

RODRIGO MOURA PEREIRA

ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E ESTRESSE HÍDRICO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM
FUNÇÃO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DADOS ORBITAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Solo e Água.

Orientador:

Prof. Dr. Derblai Casaroli

Co-orientador:

Prof. Dr. Lucas Melo Velame

Goiânia, GO – Brasil
2015

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conduzir nos momentos de dificuldade, pela força interior para superar os momentos difíceis, por mostrar o caminho nas horas incertas e por me suprir em todas as minhas necessidades.

A minha mãe Juzi Carneiro e Moura e meu irmão Marcos Umberto C. de Moura por sempre acreditarem no meu potencial e me apoiarem em todas minhas decisões.

Aos companheiros de pós-graduação: Renato Araújo, João Maurício, Déborah Lidia, Walter Maradiaga, Daniel Brandão, Luciele Vaz, Thalita Ramalho e Ana Cláudia pela agradável convivência e auxílio prestado em diversas ocasiões.

Ao professor Derblai Casaroli, pela sua orientação durante a realização deste estudo.

Ao professor e amigo Lucas Melo Velame e sua família pela acolhida e orientação tanto na vida acadêmica quanto na vida pessoal.

Aos professores e funcionários da Escola de Agronomia pelo conhecimento transmitido e amizade com que me receberam como estudante de pós-graduação.

Em especial ao meu pai Eloin Luiz Pereira (*in memoriam*) que sempre me deu força e conforto durante toda a vida e especialmente durante essa caminhada.

A todos aqueles que, embora não mencionados, sabem que contribuíram em alguma etapa do meu mestrado e da minha vida.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	3
GENERAL ABSTRACT	4
1 INTRODUÇÃO.....	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 FENOLOGIA E A PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR	7
2.2 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)	9
2.3 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA	10
2.4 ASPECTOS GERAIS DO DÉFICIT HÍDRICO	16
2.5 DEFICIÊNCIA HÍDRICA NA CANA-DE-AÇÚCAR	17
2.6 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO CERRADO	19
2.7 TEMPERATURA FOLIAR COMO INDICATIVO DE ESTRESSE HÍDRICO	20
2.8 TEOR RELATIVO DE ÁGUA NA FOLHA	22
2.9 TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE LANDSAT 8	23
3 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR DA CANA-DE-AÇÚCAR OBTIDO A PARTIR DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA CORRIGIDO	24
RESUMO	24
ABSTRACT	25
3.1 INTRODUÇÃO.....	26
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
3.4 CONCLUSÕES.....	49
4 DETECÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE.....	50
RESUMO	50
ABSTRACT	51
4.1 INTRODUÇÃO.....	52
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	53
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.4 CONCLUSÕES.....	77
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
6 REFERÊNCIAS	79
7 ANEXOS.....	89

RESUMO GERAL

PEREIRA, R. M. **Índice de área foliar e estresse hídrico da cana-de-açúcar em função de variáveis climáticas e dados orbitais.** 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.¹

A informação espectral obtida a partir de imagens de satélite possui boa relação com variáveis agrônomicas e pode contribuir com informações para o monitoramento do crescimento e de suas respostas em relação a variações das condições ambientais de cultivo em grandes áreas. Dessa forma objetivou-se estabelecer relações entre os dados orbitais nas faixas espectrais da radiação fotossinteticamente ativa e termal do satélite Landsat-8 com dados observados em campo de índice de área foliar (IAF), altura de plantas, número de folhas verdes e temperatura foliar em talhões cultivados com cana-de-açúcar, variedade CTC-04, em um ciclo de produção no estágio de cana-planta no município de Santo Antônio de Goiás-GO na safra 2013/14. O primeiro estudo teve como objetivo calibrar um modelo para medir a variação temporal do IAF da cana-de-açúcar a partir do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) obtido a partir de imagens de reflectância de superfície do satélite Landsat 8. Foi realizada a correlação entre o IAF coletado em campo e o NDVI com e sem aplicação de correção atmosférica. O modelo corrigido apresentou a melhor relação com os dados de campo. A aplicação do modelo IAF espectral foi eficiente no acompanhamento do IAF ao longo de um ciclo de cana-planta. Os resultados sugerem que a relação NDVI-IAF pode variar durante o ciclo de produção da cana-de-açúcar em função das variações de crescimento e desenvolvimento, e condições ambientais. As relações lineares se mostraram fortes durante a fase de produção e senescência das folhas ($R^2 = 0,83$), entretanto a relação mostrou-se afetada pelo ponto de saturação do NDVI em valores altos de IAF observados em campo. O segundo estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade da temperatura de superfície (LST) obtida a partir das bandas termais do Landsat-8 na correlação com a temperatura foliar da cultura, com o intuito de estabelecer relações capazes de detectar remotamente por meio de imagens, o estresse hídrico no período de ocorrência do déficit hídrico ao longo do ano de produção em cultivo de sequeiro na região do Cerrado. Os resultados mostraram que a LST, apesar de ter apresentado baixa associação direta com a temperatura foliar, possui potencial no monitoramento do eventual estresse hídrico na cana-de-açúcar na região do Cerrado, uma vez que a simulação do diferencial entre a LST e a temperatura do ar acompanha o diferencial entre a temperatura foliar e a do ar, a dinâmica do balanço de água do solo e as alterações nas taxas de crescimento da cultura que ocorrem em resposta à deficiência hídrica.

Palavras-chave: *Saccharum* spp. crescimento, deficiência hídrica, Landsat 8, índice de vegetação, temperatura de superfície.

¹Orientador: Prof. Dr. Derblai Casaroli. EA – UFG

¹Co-Orientador. Prof. Dr. Lucas Melo Velame - UFRB

GENERAL ABSTRACT

PEREIRA, R. M. **Leaf area index and water stress in sugarcane obtained by climatic and orbital data**. 2015. 94 f. Dissertation (Master in Agronomy: Soil and Water) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.²

Spectral information obtained by satellite imagery is well related to agronomic variables and can be used to monitor sugarcane growth and their responses to changes in environmental conditions of cultivation in large areas. This study is aimed to establish relationships between orbital data in the spectral ranges of the thermal and active photosynthetic radiation of Landsat-8 satellite with data observed with the leaf area index field (LAI), plant height, number of green leaves, and leaf temperature in plots planted with sugarcane, CTC-04 genotype, in a production cycle in sugarcane plant stage in Santo Antônio de Goiás-GO in the 2013/14 crop year. The first study aimed to calibrate a model to measure the temporal variation of the sugarcane LAI from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained from satellite Landsat 8's surface reflectance images. It was conducted and the correlation between the LAI collected in the field and the NDVI with and without application of atmospheric correction. The corrected model showed the best relationship with field data. The application of the spectral model was efficient to monitor LAI over a sugarcane plant cycle. The results suggest that the NDVI-LAI relationship may vary during the production cycle of sugarcane due to variations in growth, development, and environmental conditions. Spectral variable NDVI with atmospheric correction was highly correlated ($R^2 = 0,83$) with LAI but the relationship proved to be affected by the NDVI saturation point at high values of LAI observed in the field. The second study aimed to evaluate the applicability of surface temperature (LST) obtained from the thermal bands of the Landsat-8 in correlation with the leaf temperature of sugarcane, to establish relationships able to detect water stress remotely through the images, in the occurrence period of drought throughout the year production in rain fed crop in the Cerrado region. The results showed that LST, despite having low direct association with the leaf temperature, has the potential of monitoring water stress in sugarcane within the Cerrado region, since the simulation of the difference between LST and the air temperature accompanies the spread between the leaf temperature and the air, the dynamics of soil water balance and changes in crop growth rates that occur in response to water stress.

Keywords: *Saccharum* spp. growth, water deficit, Landsat 8, vegetation index, surface temperature.

²Adviser: Prof. Dr. Derblai Casaroli. EA – UFG

²Co-Adviser. Prof. Dr. Lucas Melo Velame – UFRB

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma das culturas mais antigas em exploração no Brasil, e atualmente ocupa uma das maiores áreas de cultivo, que se concentra nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, assumindo grande importância socioeconômica.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e apresentou grande expansão nas últimas três décadas do século XX. Porém, nos últimos anos, esses aumentos do cultivo vêm alcançando áreas que não possuem tradição no cultivo, principalmente nos estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (CONAB, 2013). Os critérios para a ocupação dessas novas áreas são a topografia plana para favorecer a mecanização e o baixo custo da terra, principalmente nas áreas de pastagens degradadas (Arantes, 2012). Em determinadas regiões de expansão, como o Centro-Oeste onde predomina o bioma Cerrado, o déficit hídrico ocasionado pela irregularidade das chuvas, é caracterizado como um problema, pois em determinados estádios fenológicos da cultura, como a brotação e o perfilhamento, a restrição hídrica pode ocasionar prejuízos quanto ao desenvolvimento e a produtividade do canavial (Batista, 2013).

A identificação da capacidade produtiva da cana-de-açúcar e a investigação dos efeitos do manejo da cultura são geralmente realizadas por intermédio da análise de crescimento e pela avaliação de algumas variáveis morfológicas das plantas como altura, número de plantas por metro, área foliar e produção (Almeida et al., 2008). Existem diversos instrumentos disponíveis no mercado que estimam o índice de área foliar (IAF) indiretamente com base na medida de transmissão de luz através do dossel das plantas, tais como o Decagon ceptometer e o LiCor LAI-2000. No entanto, com o crescente interesse na estimativa da variação espacial do IAF a medição em campo se mostra cara e impraticável em locais distantes ou de difícil acesso, o que, dentre outros aspectos, torna atrativa a possibilidade da utilização do sensoriamento remoto por imagens de satélite na estimativa do IAF.

A tecnologia de obtenção de dados espectrais obtidos a partir de imagens de satélite possui ampla utilização e é aperfeiçoada há anos pelos países mais desenvolvidos. O Brasil, por suas dimensões continentais e diversidade ambiental, é alvo de vários estudos que se utilizam de tal tecnologia. Atualmente, com a existência de computadores com

elevada capacidade de processamento e o surgimento de programas de processamento digital de imagens, cresce a viabilidade de sua utilização em larga escala.

Algumas características inerentes ao processo de captura das imagens de satélites, tais como, a cobertura de diferentes faixas do espectro eletromagnético, a visão sinóptica dos alvos, a revisita periódica sobre o mesmo alvo e a capacidade de recobrimento de grandes áreas em uma só imagem são fatores que favorecem o monitoramento do estado geral das lavouras. Outro fato que corrobora para a utilização do sensoriamento remoto na avaliação da cana-de-açúcar é que a cultura cobre extensas áreas, muitas vezes contíguas, o que favorece as análises devido a menor mistura dos dados espectrais por outros alvos ou feições terrestres.

A quantidade de informações presentes nas imagens de satélite é muito grande. Embora de estrutura simples, dispostos em uma matriz de linhas e colunas, os dados espectrais analisados isoladamente não são suficientes em grande parte das aplicações para se comparar comportamentos específicos de alvos de interesse. Para interpretação do conjunto de dados, faz-se necessário a utilização de ferramentas de análise estatística e a integração das informações de campo ou provenientes do banco de dados agrícola.

A reflectância obtida pelo sensor do satélite é composta pela mistura do sinal da atmosfera e da superfície, denominada reflectância planetária. Isto ocorre devido o sensor detectar não apenas a radiação solar refletida pela superfície, mas também a radiação espalhada ou refletida pela atmosfera (Tasumi et al., 2005), fato que também caracteriza a necessidade da utilização de códigos de transferência radiativa para se fazer correções atmosféricas.

Baseado no exposto, esse trabalho levanta duas hipóteses: i) que a resposta espectral do dossel da cana-de-açúcar, obtida durante seu ciclo de produção, têm relação direta com a evolução do seu índice de área foliar, e que a minimização dos efeitos atmosféricos aumenta a eficiência da relação entre os dados espectrais e os dados obtidos no campo. ii) os dados das novas faixas termais do Landsat 8 podem ser utilizados na detecção do estresse hídrico da cana-de-açúcar, com vistas a alterações em variáveis morfofisiológicas em resposta ao déficit hídrico.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FENOLOGIA E A PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (*Sacharum* spp.) é uma gramínea tropical perene, que se desenvolve na forma de touceira, com perfilhos em sua base, podendo chegar a mais de 2,0 m de altura e 0,05 m de diâmetro, a parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescência e frutos, e a subterrânea por raízes e rizomas, os quais são formados por nós, entrenós e gemas, que por sua vez formam os perfilhos da touceira (Segato et al., 2006). Como a maioria das plantas da família *Poaceae*, a cana-de-açúcar possui aparato fotossintético de metabolismo C₄, assim chamada por formar compostos orgânicos com quatro carbonos.

Os mecanismos fotossintéticos C₃, C₄ E CAM estão associados a características fisiológicas que repercutem não só sobre a eficiência fotossintética, mas também sobre o desempenho das plantas em diferentes condições ambientais. O baixo ponto de compensação de CO₂ das plantas C₄ demonstra que elas são capazes de realizar a fotossíntese positiva com uma baixa concentração intercelular de CO₂ (Taiz & Zeiger, 2004).

Plantas com fotossíntese CAM e C₄ são mais adaptadas a ambientes que apresentam limitações na disponibilidade de água. Isso é possível porque plantas desses grupos fotossintéticos podem assimilar CO₂ em condições hídricas adversas, controlando de modo específico a abertura estomática (Kerbauy, 2008) A grande capacidade da cana-de-açúcar para a produção de matéria seca reside na alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, que é influenciada pelo IAF. Além disso, o longo ciclo de crescimento da planta resulta em produções elevadas de matéria seca (Evangelista, 2011).

A cana-de-açúcar é adaptada às condições de alta intensidade luminosa, altas temperaturas, e relativa escassez de água, uma vez que a cultura necessita de uma grande quantidade de água para suprir suas necessidades hídricas, cerca de 1500 a 2500 mm por ciclo (Doorembos & Kassam, 1979). O metabolismo fotossintético C₄ da cana-de-açúcar apresenta alta eficiência de conversão da energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em 100 mg de CO₂ fixado por dm² de área foliar por hora,

entretanto, ressalta-se que essa intensa atividade fotossintética, não se correlaciona diretamente com a elevada produtividade de biomassa, uma vez que as características das variedades influenciam a eficiência fotossintética, além das condições climáticas que também são determinantes (Rodrigues, 1995).

A cana-de-açúcar pode apresentar dois ciclos, determinados em função do sistema de cultivo e da época de plantio: i) 12 meses (precoce); ii) 18 meses (tardia); denominada cana-planta em seu primeiro corte e cana-soca, para os demais cortes (Figura 2.1).

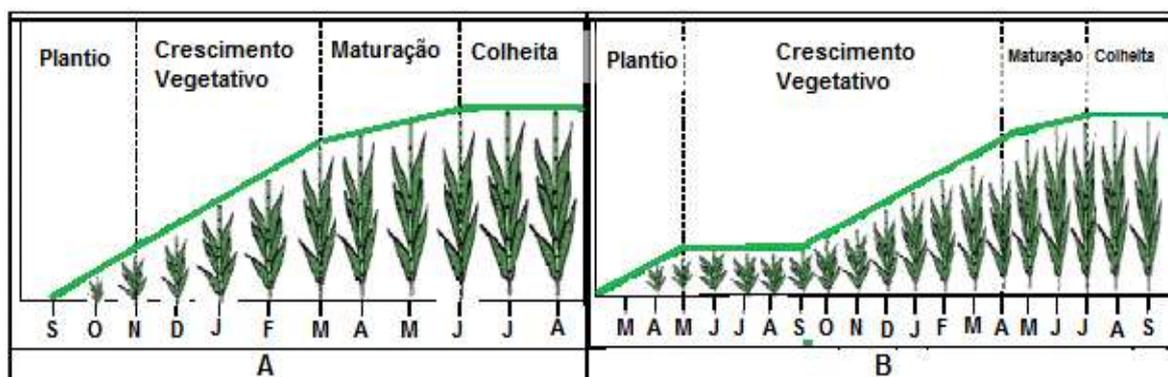


Figura 2.1. Fases fenológicas da cana-de-açúcar de ciclo de 12 meses (A) e de 18 meses (B). FONTE: Evangelista (2011).

Para favorecer a compreensão das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar, Gascho & Shih (1983) propuseram uma escala fenológica que se constitui em um conjunto de fases apresentadas em sequência, de forma a descrever o crescimento e o desenvolvimento desde sua emergência até a maturação (Figura 2.2). O desenvolvimento é dividido em quatro estádios: i) brotação e estabelecimento – onde o crescimento é lento e depende da umidade do solo, levando de 20 a 30 dias para a ocorrência da brotação; ii) perfilhamento – que tem início em torno de 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias; iii) crescimento dos colmos – começa a partir dos 120 dias após o plantio (ou corte) e dura por até 270 dias, em um cultivo de 12 meses, considera-se o estágio mais importante do cultivo, pois nele se acumulam aproximadamente 75% da matéria seca total; iv) maturação dos colmos – quando ocorrem reduções nas taxas de crescimento da planta e acúmulo de sacarose nos colmos, com início em aproximadamente 270 dias após plantio e podendo se prolongar por até 6 meses.

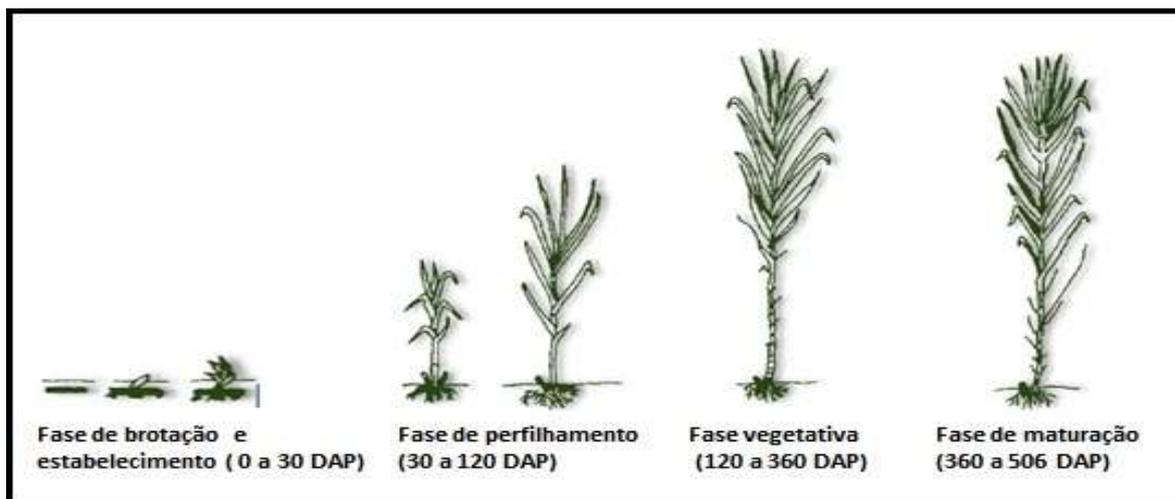


Figura 2.2 Escala fenológica da cana-de-açúcar de 18 meses e sua relação aos dias após o plantio (DAP). FONTE: Doorenbos e Kassam (1979).

2.2 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)

O IAF é uma medida adimensional da cobertura vegetal que quantifica a razão entre a área foliar total (m^2) e a área do solo (m^2) (Kerbaudy, 2008). O IAF é um parâmetro biofísico que pode ser utilizado como medida de crescimento das plantas em modelos agronômicos (González-Sanpedro et al., 2008). A produtividade de uma comunidade vegetal é intensamente dependente da interceptação da luz e, conseqüentemente, da área foliar. A fotossíntese envolve desde estruturas e processos de dimensão molecular (enzimas, complexos protéicos) até a planta individual integrada a determinada comunidade vegetal (interceptação da radiação fotossinteticamente ativa) (Kerbaudy, 2008).

O estudo da área foliar em cultivares de cana-de-açúcar permite correlacioná-la com o seu potencial produtivo, seja em massa seca, quantidade de açúcar ou taxas de crescimento, além do que, o aumento da área foliar aumenta o aproveitamento da energia solar para a realização da fotossíntese, podendo ser utilizada na avaliação do rendimento final da cana-de-açúcar (Oliveira et al., 2007). A atenuação da radiação na cobertura vegetal depende da densidade da folhagem, do arranjo das folhas no interior da vegetação e do ângulo existente entre a folha e a radiação incidente (Larcher, 2000). O conhecimento da variação do IAF ao longo do ciclo de uma cultura agrícola permite avaliar a capacidade ou a velocidade com que a parte aérea do vegetal ocupa a área do solo disponível a planta tornando possível a simulação da interceptação da radiação solar pelo

dossel (Scarpai & Beauclair, 2008). A interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) por um dossel é fortemente relacionada com a área foliar total de forma que uma cultura irá interceptar mais radiação PAR e conseqüentemente crescer mais rapidamente se sua área foliar se desenvolve rapidamente (Campbell, 1986). Na cana-de-açúcar o desenvolvimento da área foliar na cana-planta é mais lento quando comparado ao da cana-soca, onde a rebrota é reforçada por fotoassimilados armazenados (Almeida et al., 2008). O dossel onde o IAF é igual a 1 tem uma área foliar igual a área da superfície do solo na qual a planta cresce, mas isto não significa que toda a PAR é interceptada, pois algumas folhas podem estar sobrepostas gerando auto-sombreamento, além disso, nem todas as folhas estão posicionadas perpendicularmente à radiação solar incidente (Simões et al., 2005). A cana-de-açúcar em condições ideais aumenta o IAF rapidamente durante as fases iniciais, chegando até um máximo de 3 a 7, dependendo da variedade (Teruel et al., 1997; Xavier & Vetorazzi., 2004). A cana-de-açúcar requer, geralmente, de 10 a 12 meses para atingir sua maturidade. Em geral, o máximo IAF é alcançado cerca de seis meses após o plantio, e em seguida, declina lentamente, e a velocidade desse declínio pode ser afetada tanto pela variedade quanto pela condição ambiental de crescimento (Alvarez et al., 1999; Silva et al., 2012).

Durante as últimas décadas os esforços focados na estratégia de medição do IAF não se baseiam somente em medições feitas em campo, mas também na recuperação do IAF baseado na matriz atual de sensores remotos. Epiphânio et al. (1996) afirmaram que o conhecimento das relações existentes entre os parâmetros físicos das culturas, como o IAF, e seu comportamento espectral é um passo importante na avaliação do desempenho e desenvolvimento das culturas por modelos de sensoriamento remoto que utilizam índices de vegetação.

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA

O sensoriamento remoto é definido como uma técnica de aquisição e de aplicação das informações sobre um objeto sem nenhum contato físico com ele. A imagem digital gerada pelos sistemas sensores é constituída por um arranjo de elementos sobre a forma de malha ou grade regular. A área de cruzamento entre colunas e linhas dessa malha

dá-se o nome de *pixel* (*picture element*). A cada *pixel* é atribuído um valor numérico que indica a intensidade da radiação eletromagnética. Essa intensidade denomina-se nível de cinza (NC) e varia em tonalidades que vão do preto (nível mínimo) ao branco (nível máximo). A imagem digital é, portanto, uma função bidimensional da intensidade de energia eletromagnética refletida ou emitida pela área imageada, representada por uma matriz $f(x,y)$, onde os valores de f são resultantes da intensidade do brilho (reflectância) dos materiais da área correspondente ao *pixel* de coordenada (x,y) . A resolução espacial do sistema é dada pela relação entre o tamanho do *pixel* na imagem e a área por ela coberta no terreno. Do ponto de vista do sensoriamento remoto, múltiplas bandas espectrais são consideradas no imageamento. Cada banda do sensor é caracterizada por uma faixa do espectro eletromagnético e o resultado do imageamento na banda é armazenado em uma estrutura matricial (Liu, 2007). Ao ser interceptada pelo dossel, a radiação solar pode ser absorvida, transmitida e refletida em proporções variáveis, dependendo do ângulo de incidência dos raios solares e das características estruturais das plantas. Tais características estão intimamente relacionadas com a disposição espacial das folhas, ângulo de inserção foliar, índice de área foliar e propriedades óticas da vegetação (Machado et al., 1982).

As propriedades óticas da folha são influenciadas pela sua composição, morfologia e estrutura interna as quais definem a variação da resposta espectral registrada pelo sensor ao longo da faixa do espectro eletromagnético. Na faixa do visível (VIS) (0,4 a 0,7 μm) observa-se baixa reflectância devido à absorção da radiação incidente pelos pigmentos, como as clorofilas *a* e *b* e os carotenoides, na região do infravermelho próximo (NIR) (0,7 a 1,3 μm) a reflexão das folhas é alta devido às múltiplas reflexões da radiação nas paredes celulares; e na região do infravermelho médio o teor de água contido nas folhas é responsável pela absorção em 1,4 e 1,95 μm diminuindo a reflectância da folha (Gates et al., 1965).

Ao se comparar folhas maduras bem estruturadas e esponjosas com as novas compactas, as maduras absorvem 5% mais na faixa VIS e refletem 15% a mais na faixa do infravermelho próximo. Uma folha madura e saudável absorve cerca de 70% a 90% da radiação solar na faixa de 0,4 a 0,7 μm por causa da presença de pigmentos, incluindo carotenoides (cor amarela), clorofila (cor verde) e antocianina (cor vermelha). Quando as folhas envelhecem, a reflectância aumenta na faixa VIS exceto o pico em 0,55 μm (verde) e diminui na faixa NIR devido à uma diminuição de clorofila e da abundância dos pigmentos carotenoides que contribuem para o aumento de reflectância nas faixas

vermelha e azul. A reflectância também aumenta quando a área total de folhas da copa de vegetação aumenta, de forma que o IAF representa a velocidade com a qual a vegetação cobre sua área disponível de solo (Liu, 2007).

Desde a segunda metade do século XX, intensificaram-se os estudos dos fatores fisiológicos da vegetação que afetam as reflectâncias das diferentes faixas de comprimento de onda de energia eletromagnética da radiação solar, incentivados, em grande parte, pelo início dos lançamentos de satélites de monitoramento da reflectância da superfície terrestre.

O acompanhamento do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar pode ser realizado por meio de séries temporais de índices de vegetação, provenientes de imagens de sensoriamento remoto (SR). A premissa da recuperação do IAF a partir de dados de sensoriamento remoto espectral baseia-se na característica de resposta espectral de folhas verdes em comparação com outros materiais da superfície terrestre. A absorção seletiva da radiação solar de folhas verdes de luz visível em relação ao infravermelho torna possível a geração de índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Lucas & Schuler, 2007).

Wang et al. (2005) apresentam algumas considerações que devem ser feitas ao se relacionar o NDVI com um padrão de desenvolvimento fenológico das plantas. Primeiramente, há de se observar que o período de produção de folhas é um período de vigor vegetativo, mas ao menos que o IAF ocupe toda a área disponível à planta, o efeito da superfície exposta do solo pode causar desvios consideráveis. Já no período de senescência, ocorre o amarelecimento e embora o efeito do solo possa ser negligível, as folhas amarelas afetam a reflectância da vegetação, o que causa distorções semelhantes no NDVI no período de crescimento com área de solo exposto. Ou seja, o mesmo valor numérico do IAF durante a produção de folhas e de senescência não representam o mesmo NDVI, já que, no crescimento as folhas são verdes enquanto que no último estágio a cor das folhas será uma mistura de folhas mortas, verdes, amarelas e até marrons.

O novo satélite Landsat-8 (OLI) destina-se a ser amplamente compatível aos seus predecessores, no entanto sua resposta espectral é diferente em relação ao seu antecessor Landsat-7 (ETM+), e assim pode haver uma ligeira diferença nas medidas de reflectância. O Landsat-8 traz um novo instrumento chamado *Operational Land Imager* (OLI), que embora seja projetado para ser compatível com seus antecessores (ETM + e TM), também propõe uma melhora, em particular, nas bandas equivalentes aos

comprimentos de onda do infravermelho próximo, a qual foi significativamente reduzida no intuito de se evitar alguns efeitos de atenuação atmosférica, principalmente os relacionados ao vapor d'água (Flood, 2014).

O satélite Landsat-8 foi lançado no dia 11 de fevereiro de 2013 pela NASA na base aérea de Vandenberg no estado da Califórnia (EUA), operando a uma altitude de 705 km, numa órbita heliosíncrona com inclinação de $98,2^\circ$ (ligeiramente retrógrada), semelhante às órbitas das séries Landsat 5 e 7. A sua passagem na linha do equador ocorre às 10:00 horas, com diferença de 15 minutos para mais ou para menos com resolução temporal de 16 dias (USGS, 2013). A plataforma Landsat-8 opera com dois instrumentos imageadores, o primeiro denominado *Operational Land Imager* (OLI), com nove bandas espectrais incluindo a pancromática, e o segundo, *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), cujas características espectrais, de ambos os sensores, são descritas na Tabela 2.3.1.

Os dois instrumentos (OLI e TIRS) a bordo do Landsat-8 fornecem uma cobertura global a cada 16 dias, com um campo de visada de aproximadamente 15° com resolução espacial de 30 m (OLI) e 100 m (TIRS). Ao contrário dos seus antecessores que têm apenas uma banda infravermelha termal, o sensor TIRS possui uma nova tecnologia que mede a radiação termal da Terra em duas bandas (Ren et al., 2014). Os dados Landsat-8 são processados em uma imagem de 185 km x 180 km com aproximadamente 950 MB em formato Geo Tiff. Todas as bandas espectrais dos sensores OLI e TIRS são armazenadas em arquivo de número digital de 16-bits. As bandas do sensor TIRS de 100 m são redefinidas pelo método de convolução cúbica e disponibilizadas em resolução de 30 m e registradas com base nas bandas OLI. Um arquivo de metadados possui os parâmetros de compensação das bandas espectrais que permitem converter os dados de números digitais em radiância espectral facilitando a utilização dos dados pelos usuários (Roy et al., 2014).

Tabela 2.3.1. Características espectrais das bandas dos sensores a bordo da plataforma Landsat-8. Fonte: USGS (2013)

Bandas Landsat - 8	Comprimento de onda (μm)	Resolução (m)
B1 – Visível Ultra-Azul	0,43 – 0,45	30
B2 – Visível Azul	0,45 – 0,51	30
B3 – Visível Verde	0,53 – 0,59	30
B4 – Visível Vermelho	0,64 – 0,67	30
B5 – Infravermelho Próximo	0,85 – 0,88	30
B6 – Infravermelho Médio/SWIR 1	1,57 – 1,65	30
B7 – Infravermelho Médio/SWIR 2	2,11 – 2,29	30
B8 – Pancromática (PAN)	0,50 – 0,68	15
B9 - Cirrus	1,36 – 1,38	30
B10 – Infravermelho Termal/TIRS 1	10,6 – 11,19	100*
B11 – Infravermelho Termal/TIRS 2	11,5 – 12,51	100*

*Tratada e disponibilizada em 30 m.

Xavier & Vetorazzi (2004) correlacionaram o IAF da cana-de-açúcar coletado mensalmente em campo com o NDVI derivado de imagens Landsat 7/ETM+, onde observaram que além das medidas obtidas em campo, os valores mais elevados de IAF devem ser associados ao fato de que o tipo de material genético da cana é distinto e as técnicas de gerência utilizadas para a cultura são diferentes, (por exemplo: espaçamento entre plantas, adubação, irrigação, etc.), pois quando eles compararam os valores de IAF obtidos neste trabalho com valores de IAF de outros estudos houve diferença. Até o presente momento não existem publicações que avaliem o IAF da cana-de-açúcar obtido por imagens do sensor Landsat 8/OLI. Monteiro et al. (2013) avaliaram o IAF para a cultura do feijoeiro obtido a partir de imagens dos sensores HRVIR, ETM+ e Modis, e afirmaram que apesar do potencial dos sensores na estimativa do IAF, é necessário que cada sensor tenha sua resposta em relação ao IAF avaliada separadamente, uma vez que, as diferenças entre resoluções espaciais, radiométricas, altura e ângulos de visada dos sensores resultam em diferentes correlações, o que pode, para uma mesma condição de cultivo gerar resultados distintos. O fato é que, não se podem generalizar resultados obtidos por um único estudo, o que faz necessária a simulação de cada sensor, com vistas ao seu desempenho relacionado às características biofísicas da cultura em questão.

Um feixe de radiação solar que chega à superfície terrestre sofre vários tipos de interferências atmosféricas que incluem espalhamentos, absorções e reflectâncias múltiplas (Liu, 2007). Os principais efeitos observados nas imagens de satélite, devido à presença da atmosfera entre o sensor e a superfície terrestre, são a diminuição da faixa de

valores digitais possíveis registrados pelo sensor, diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem (Couto-Júnior et al., 2011). Os gases, principalmente vapor d'água, oxigênio, ozônio e dióxido de carbono e os aerossóis refletem, refratam, absorvem e espalham a radiação desde quando ela atinge a atmosfera até quando a deixa, depois de refletida pelo solo (Zullo Jr., 1996).

Existem diversos métodos para correção do espalhamento atmosférico, dentre os quais, aqueles que podem ser aplicados tanto para imagens de satélite multiespectrais quanto hiperspectrais, podendo ser divididos em métodos alternativos e métodos físicos. Os métodos alternativos não dependem de parâmetros atmosféricos ou de dados de superfície, e sim das informações da própria imagem, utilizando números digitais (DN's do inglês *digital number*) que são características inerentes dos *pixels* e representam feições específicas para determinar a contribuição da atmosfera em cada banda espectral (Lu et al., 2002). Porém, uma de suas limitações consiste na exigência de alvos específicos nas imagens analisadas, tais como, corpos d'água que absorvem a maior parte da radiação.

Nos métodos físicos, devem ser abordadas as propriedades óticas da atmosfera bem como do processo de interação da radiação com a atmosfera e com a superfície. Dentre os códigos de transferência radiativa atmosférica os mais difundidos são: 5S (*Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*), LOWTRAN e MODTRAN (*Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance*) (Latorre et al., 2002).

Para garantir a eficiência de uma correção atmosférica por métodos físicos, são necessários parâmetros que forneçam dados reais das condições atmosféricas do dia em que a imagem de satélite foi capturada. Esses parâmetros geralmente correspondem aos dados de latitude, altitude, coluna de vapor d'água, profundidade ótica das nuvens, aerossol, quantidade de CO₂ na atmosfera, data de passagem do satélite e horário de vôo (Gomes et al., 2013).

O algoritmo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) inclui uma ferramenta de correção de “efeitos adjacentes” e fornece uma opção para calcular a visibilidade média para a cena a partir da quantidade de aerossóis e névoa atmosférica. O vapor d'água é estimado pelos valores de brilho dos pixels nas bandas espectrais de absorção ocasionadas pela presença do vapor d'água atmosférico. O algoritmo de correção requer como parâmetros de entrada para a calibração radiométrica o tipo do sensor e sua altitude, resolução espacial da imagem, altitude média da região, data e hora da aquisição da imagem, latitude e longitude da cena e elevação média, juntamente

com outros parâmetros de modelagem atmosférica, tais como: seleção de um modelo atmosférico de acordo com as condições climatológicas da região, modelo de aerossol referente à visibilidade média da cena e quantidade de vapor d'água estimado (Couto Júnior et al., 2011).

2.4 ASPECTOS GERAIS DO DÉFICIT HÍDRICO

A restrição hídrica é um estresse ambiental que tem influência expressiva na agricultura. A frequência e a intensidade do déficit hídrico constituem os fatores mais importantes à limitação da produção agrícola mundial, por esse motivo esforços tem sido realizados para melhorar a produtividade dos cultivos agrícolas sob condições de seca (Oliveira et al., 2007).

O déficit hídrico pode ser definido como todo conteúdo de água de um tecido ou célula que está abaixo do conteúdo de água mais alto exibido no estado de maior hidratação, e ele ocorre quando a perda de água excede a absorção. Quando o déficit hídrico apresenta evolução suficientemente lenta para permitir mudanças nos processos de desenvolvimento, o estresse hídrico tem vários efeitos sobre o crescimento, um dos quais é a limitação da expansão foliar (Taiz & Zeiger, 2004).

Em condições adversas à disponibilidade hídrica, Taiz & Zeiger (2004) mencionam que há três linhas de defesa das plantas para amenizar os efeitos do estresse hídrico sobre o crescimento vegetal. A primeira delas é a redução da área foliar, uma vez que a redução do turgor das células é o mais precoce efeito biofísico significativo do estresse hídrico, que afeta diretamente a expansão foliar e juntamente com a senescência das folhas, a planta reduz a perda de água por transpiração. A segunda é o aprofundamento das raízes no solo úmido. A atividade fotossintética da planta é muito menos atingida que a expansão foliar, permitindo que maior proporção de assimilados vegetais seja distribuída ao sistema radicular, por último, a terceira linha de defesa é o fechamento estomático, principalmente em condições onde o começo do estresse é mais rápido ou a planta alcançou sua área foliar plena antes de iniciar o estresse. Neste caso, o estômato fechado também reduz a transpiração.

2.5 DEFICIÊNCIA HÍDRICA NA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene, da família *Poaceae*, com metabolismo fotossintético C_4 que possui um grande armazenamento de sacarose nos tecidos dos colmos, tornando-a de extrema importância comercial. A cana de ano e meio (18 meses), plantada de janeiro ao início de abril, apresenta taxa de crescimento mínimo, e em algumas situações extremas o desenvolvimento da cultura pode ser nulo. Essa queda expressiva do desenvolvimento da cultura é ocasionada pelo período de inverno na região Centro-Sul, em que as condições climáticas não são favoráveis. A fase de desenvolvimento mais acentuado da cana de ano e meio inicia-se com a retomada das precipitações regulares, aumento da intensidade luminosa e também da temperatura, e ocorre de outubro a abril, com pico de crescimento entre dezembro e abril (Rodrigues, 1995).

A demanda hídrica da cana-de-açúcar é de 1.500 a 2.500 mm por ciclo vegetativo, e pode variar conforme os diferentes estádios fenológicos da cultura, como também das condições técnicas do manejo (Doorembos & Kassam, 1979). A maior demanda hídrica ocorre no período de perfilhamento e rápido crescimento que ocorre em 60 a 150 dias após o plantio, pois nesse período a planta obtém um rápido desenvolvimento, expressiva área foliar e dessa forma ela necessita de uma maior quantidade de água para viabilizar a troca de gases com a atmosfera (Pires et al., 2008). Entretanto, Doorembos & Kassam (1979) afirmam que o primeiro estágio fenológico da cultura é o mais suscetível ao estresse hídrico, ou seja, a brotação e emergência, mas também existem relatos de que a suscetibilidade mais acentuada da cana-de-açúcar ao déficit hídrico ocorre quando as plantas estão na fase de crescimento dos colmos, o que causa prejuízos expressivos na produção de fitomassa e no rendimento de sacarose (Machado et al., 2009). Entre as principais modificações morfológicas durante a aclimação da cana-de-açúcar à deficiência hídrica destacam-se altura de plantas, número e diâmetro de colmos, número de folhas verdes e área foliar (Silva et al., 2008).

Machado et al. (2009) observaram reduções do número de folhas verdes em genótipos de cana-de-açúcar submetidos ao déficit hídrico com umidade no solo de 15,9, 17,6 e 18,1% nas fases de crescimento inicial (73 a 115 DAP), máximo crescimento (170 a 184 DAP) e de acúmulo de sacarose nos colmos (287 a 300 DAP), respectivamente. Ao

final do ciclo de produção, o menor valor dessa variável foi observado nas plantas submetidas ao déficit na fase de crescimento inicial com 2 folhas aos 155 DAP, já com a ocorrência de déficit na fase de máximo crescimento o menor número de folhas verdes foi de 3 e na fase de acúmulo de sacaroses resultou em um valor mínimo de 7 folhas verdes.

Farias et al. (2008) observaram o índice de área foliar e fitomassa de raízes na variedade SP 79 1011 em cultivo irrigado e de sequeiro no Estado da Paraíba. A taxa máxima de acúmulo de fitomassa de raízes foi de $0,7169 \text{ g dia}^{-1}$ para a cana irrigada e de $0,6974 \text{ g dia}^{-1}$ para a cana de regime de sequeiro. O máximo índice de área foliar foi 6,82, observado em torno dos 152 dias após o plantio no cultivo irrigado, e no sequeiro o IAF máximo foi de 6,80 aos 157 dias após o plantio. No final do período de cultivo, mais de 90 e de 80% da fitomassa de raízes se concentraram nos primeiros 60 cm de profundidade, nas áreas irrigadas e de sequeiro, respectivamente. Os autores observaram que a percentagem de matéria seca de raízes se apresentou significativamente diferente nos manejos estudados, com maior crescimento do sistema radicular na cana cultivada em regime de sequeiro.

Gonçalves et al. (2010) submeteram quatro variedades de cana-de-açúcar a estresse hídrico moderado (40 a 60% da CAD) e severo (0 a 20% da CAD) e observaram redução na condutância estomática, transpiração e fotossíntese, assim como na eficiência do uso da água, independente da variedade. Em relação às variáveis de trocas gasosas, para a condição de estresse hídrico moderado foram observadas reduções na condutância estomática entre 35,25 e 65,82%, e na condição de estresse hídrico severo a redução esteve entre 60,09 e 74,59%. Na transpiração foliar as reduções estiveram entre 52,20 e 59,78% e entre 57,5 e 71,59% respectivamente. Para os autores, esta relação direta entre a transpiração e condutância estomática é esperada, visto que a diminuição do fluxo de vapor d'água para a atmosfera e conseqüentemente, da transpiração, implica no fechamento dos estômatos.

Batista (2013) avaliou o índice de área foliar (IAF) em duas variedades de cana-de-açúcar em estágio de cana-soca cultivadas em regimes de irrigação e de sequeiro na região de Planaltina-DF, onde no cultivo de sequeiro realizou-se uma irrigação de salvamento de 60 mm e no cultivo irrigado a rega foi realizada em intervalos de 15 dias, totalizando ao final do período de avaliação uma lâmina de 415,7 mm. Nas avaliações realizadas aos 86, 99 e 145 dias após o corte (DAC) foi observado que na condição irrigada, as duas variedades apresentaram um IAF semelhante (2,0 e 2,5 aos 86 DAC, 3,0 e

3,5 aos 99 DAC e 2,5 e 3,0 aos 145 DAC), já para as plantas de sequeiro observou-se um menor IAF significativo em relação às plantas irrigadas, com valores de 2,0 e 2,5 aos 99 DAC e 1,0 e 1,5 aos 145 DAC.

2.6 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO CERRADO

A expansão das áreas cultivadas com cana-de-açúcar está ocorrendo em regiões em que a atividade canavieira não era comum. Em determinadas regiões de expansão, como o Centro-Oeste, onde predomina o bioma Cerrado, o déficit hídrico, característico da estação seca nesta região, é um dos grandes entraves do cultivo de cana-de-açúcar.

Na região do Cerrado a estação chuvosa inicia-se entre os meses de setembro e outubro e se estende até março e abril, destacando-se os meses de novembro, dezembro e janeiro, como os que apresentam a maior média mensal de precipitação com 191, 231 e 255 mm respectivamente (Sano et al., 2008). A estação seca é marcada por profunda deficiência hídrica em torno de 500 mm anuais, causada pela redução drástica da ocorrência de chuvas, e esta se inicia entre os meses de abril e maio e estende-se até parte dos meses de setembro a outubro, dessa forma o clima tropical estacional da região é marcado pelo período de déficit hídrico intenso, que pode chegar a sete meses sem precipitações (Tabela 2.6.1).

Tabela 2.6.1 Médias históricas mensais de precipitação na região do Cerrado, providas de normais climatológicas, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação (Sano et al., 2008)

Mês	Média (mm)	Desvio-Padrão (mm)	CV (%)
Janeiro	255,4	137,8	53,9
Fevereiro	180,7	96,4	53,3
Março	224,2	116,5	51,9
Abril	93,5	49,9	53,3
Maio	26,5	28,1	106,1
Junho	5,1	9,3	184,1
Julho	5,4	13,2	244,4
Agosto	14,6	15,9	108,7
Setembro	39,9	37,5	93,8
Outubro	128,6	86,7	67,4
Novembro	191,4	78,2	40,8
Dezembro	231,5	95,9	41,4

Por meio do Balanço Hídrico Climatológico é possível quantificar as entradas de água em um sistema (precipitação, irrigação, orvalho, escoamento superficial, drenagem lateral e ascensão capilar) e as saídas (evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem lateral e drenagem profunda). Este método proposto por Thornthwaite & Mather (1955) é uma das formas de se contabilizar o balanço de água no solo, identificando períodos de deficiência hídrica e a época de sua ocorrência. O método contabiliza o suprimento natural de água no solo, pela chuva (P), e a demanda atmosférica, expressa pela evapotranspiração potencial (ETP) ou da cultura (ETc), em um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD), apropriada ao estudo em questão, o balanço hídrico ainda fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM), podendo ser elaborado desde a escala diária até a mensal (Pereira et al., 2002).

2.7 TEMPERATURA FOLIAR COMO INDICATIVO DE ESTRESSE HÍDRICO

A transpiração das plantas é um componente do balanço de energia que determina a temperatura foliar, de acordo com fatores anatômicos (dimensões, pigmentação e massa), fatores do ambiente (radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar) e fatores biológicos que determinam o número e a distribuição dos estômatos (Leuzinger et al., 2010).

A detecção do estresse hídrico vegetal em função da temperatura da cultura parte da hipótese de que, quando uma planta transpira o efeito estabilizador da temperatura realizado pela água evaporada arrefece as folhas a uma temperatura inferior a temperatura do ar. Quando uma cultura é submetida a um déficit hídrico, os estômatos se fecham, a transpiração diminui e a temperatura da folha aumenta (Idso et al., 1981).

Alguns modelos baseados na temperatura do dossel foram desenvolvidos como indicadores do estresse das culturas, com o objetivo de estabelecer um monitoramento mais eficaz da irrigação. O índice de estresse hídrico das culturas (IEHC), proposto por Idso et al. (1981), baseia-se na determinação da taxa de transpiração atual de um cultivo pela medição da temperatura do dossel e do déficit de pressão de vapor. O método estabelece as relações lineares entre a diferença de temperatura foliar e o ar com o

déficit de pressão de vapor, as quais dependem do cultivo e das condições atmosféricas. O IEHC introduzido por Jackson et al. (1981) considera a teoria do balanço de energia em uma superfície, que separa o saldo de radiação em calor sensível do ar e calor latente, os quais influenciam as taxas transpirativas.

Trentin et al. (2011) avaliaram a transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar submetidas a diferentes potenciais matriciais no solo, em ambiente protegido. As avaliações realizadas aos 122, 150 e 185 dias após o plantio (DAP) mostraram a influência da radiação solar e do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar, na variação horária da transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar. Sem restrição hídrica, foi totalizada ao longo do período diurno uma transpiração de 349; 444 e 423 g planta⁻¹ dia⁻¹ aos 122; 150 e 185 DAP, respectivamente. Nessa condição notou-se que a transpiração aumentou até o período compreendido entre 10 e 13 horas e nos horários subsequentes houve redução até o término do período diurno. Os autores observaram que o processo de transpiração esteve associado à diferença das temperaturas folha-ar e que este diferencial se torna mais negativo à medida que ocorre transferência de energia da folha para o ar na forma de calor latente. Sob menores valores de déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar, constatado no período da manhã, a temperatura foliar esteve próxima da temperatura do ar. Para níveis de ψ entre -700 e -400 kPa, a menor disponibilidade de água reduziu a transpiração das plantas. Em decorrência disso, a temperatura foliar foi, em geral, superior à temperatura do ar, a qual também foi afetada pelas oscilações na radiação solar global. No período da manhã, sob valores de radiação solar global acima de 200 W m⁻² e déficit de pressão inferiores a 1,5 kPa, a temperatura foliar esteve na maior parte do tempo acima da temperatura do ar. Nessa condição de estresse hídrico severo o valor máximo do diferencial entre a temperatura da folha e do ar foi de + 6,6°C, o qual foi constatado às 12h aos 156 DAP, sob valores de saldo de radiação de 800 W m⁻² e déficit de pressão de 1,6 kPa.

A temperatura foliar também tem sido estudada em conjunto com outras variáveis de resposta que podem indicar uma condição de estresse hídrico da cultura, uma vez que a combinação entre a disponibilidade hídrica e a temperatura pode gerar efeitos aditivos e interativos sobre a planta. Koonjah et al. (2006) avaliaram a taxa de fotossíntese (PN), interceptação da luz (LI), taxa de crescimento de colmos (PER), temperatura foliar (T) e potencial hídrico foliar (ψ_L) na cana-de-açúcar em plantas submetidas a estresse e sem restrição hídrica. Os resultados mostraram que as diferenças de PN entre as plantas

bem irrigadas e as submetidas ao estresse foram observadas a partir de uma diminuição do ψ_L ao valor de -700 kPa. Uma forte relação ($R^2 = 0,97$) foi verificada ao se correlacionar a PN com o ψ_L onde a cada diminuição de 100 kPa em ψ_L resultava em uma redução na PN de $1,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A temperatura foliar das plantas estressadas foi maior, acompanhando o aumento da resistência estomática e diminuição da taxa de transpiração. A correlação entre os valores de PN e a temperatura foliar em uma faixa de 25 a 40°C mostraram que a PN nas plantas estressadas diminui linearmente em $0,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para cada °C aumentado na temperatura foliar. Na comparação entre as taxas de crescimento os autores observaram que após nove dias de diminuição do potencial de água no solo, diferenças significativas foram observadas entre as plantas com e sem irrigação. A taxa de crescimento das plantas foi reduzida quando o potencial de água no solo caiu para -60 kPa com potencial hídrico foliar de -700 kPa, e a taxa se aproximou de zero quando o potencial do solo foi de -270 kPa ao meio dia com ψ_L em -1500 kPa.

A cana-de-açúcar apresenta potencial máximo de produção quando, em sua fase vegetativa, a temperatura encontra-se entre 22°C e 30°C. O crescimento em temperaturas inferiores a 20°C é muito reduzido, com paralisação aos 10°C. Para germinação, o ótimo está em 32°C (Barbieri et al., 1979). Em temperaturas abaixo de 25°C, e superior a 35°C, o crescimento é lento e rápido entre 30 e 34°C (Alfonsi et al., 1987). Para uma colheita rentável, a cana precisa de um período quente e úmido para brotar, emergir e perfilhar, e outro, relativamente seco e/ou frio, para acumular sacarose, requerendo assim, temperaturas altas (30°C) na fase inicial, entre 25 e 30°C na fase de crescimento vegetativo, e média mensal, no mês mais frio, abaixo de 21°C na fase de maturação (Segato, 2006).

2.8 TEOR RELATIVO DE ÁGUA NA FOLHA

O teor relativo de água (TRA) na folha é definido como a quantidade de água de um tecido comparada com a máxima quantidade de água que ele poderá reter em um dado momento. O TRA é considerado como a variação de massa de água do tecido, a qual, por sua vez, decorre da variação da massa de água da célula e, conseqüentemente, da variação do volume celular, entre a turgescência plena e a perda da turgescência (Pincelli, 2010). São várias as alterações ocorridas nas plantas devido à escassez de água, porém, é

comum observar que a redução de 25% no TRA é responsável por ocasionar uma repressão em todo o aparato fotossintético (Smit & Singels, 2006)

2.9 TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE LANDSAT 8

A temperatura de superfície terrestre (LST) estimada por imagens orbitais têm sido relacionada ao balanço de energia na superfície e o balanço hídrico, em nível de escala local e global e aceita como de grande importância em uma ampla variedade de aplicações, tais como alterações climáticas, clima urbano, agrometeorologia e monitoramento da vegetação (Chapin et al., 2005; Lazarim & Zullo Júnior, 2011; Coelho & Correa, 2013; Rajeshwari & Mani, 2014). Com o crescente reconhecimento da importância científica da LST, métodos para sua estimativa são continuamente desenvolvidos ao longo dos anos, de forma que as suas variações espaço-temporais medidas pelos sensores a bordo de satélites possam ser utilizadas na estimativa de diversas variáveis geofísicas, como a evapotranspiração, estresse hídrico da vegetação e umidade do solo (Sepulcre-Cantó et al., 2006; Allen et al., 2007; Er-Raki et al., 2010).

Nas últimas décadas, sensores como o *Moderate-resolution Spectroradiometer* (MODIS) e o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) têm disponibilizado ao domínio público, dados termais globais a cada dois dias. Os satélites da série Landsat, especialmente os sensores Landsat-5 *Thematic Mapper* (TM) e o Landsat-7 *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) forneceram dados termais em uma banda do infravermelho de onda longa (LWIR) com resolução espacial de 250 m e resolução temporal de 16 dias. Uma vez que a detecção remota por satélite fornece uma visão sinóptica e repetitiva da superfície terrestre em curtos intervalos de tempo, faz com que ela se torne uma ferramenta vital no monitoramento da LST.

3 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR DA CANA-DE-AÇÚCAR OBTIDO A PARTIR DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA CORRIGIDO

RESUMO

Os estudos de área foliar em cana-de-açúcar permite correlacioná-la ao seu potencial produtivo, tanto em termos de acúmulo de fitomassa seca e/ou de teor de açúcar, quanto de taxas de crescimento. Atualmente, devido as grandes extensões de terras agrícolas produtivas, cada vez mais têm se utilizado dados de satélite no monitoramento das culturas. Entretanto, os constituintes da atmosfera interferem nos valores de reflectância captados pelos sensores imageadores, assim, visando minimizar estes efeitos, são propostas alternativas para melhorar os resultados estimados. Objetivou-se estimar o Índice de Área Foliar (IAF) da cana-de-açúcar em função do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) com correção atmosférica. Foram coletados dados de IAF real da cana-de-açúcar em talhões cultivados com a variedade CTC-4 na região de Santo Antônio de Goiás – GO em ciclo de cana-planta, no ano safra 2013/14 e dados de NDVI obtidos do satélite Landsat 8 sensor OLI (*Operational Land Imager*), da mesma área cultivada. Estes dados foram correlacionados no tempo, em dez datas de passagem. O NDVI foi obtido a partir de dados de reflectância do sensor, submetidas à correção pelo algoritmo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) implementado no software ENVI 5.1, no intuito de minimizar os efeitos atmosféricos nos dados de reflectância. Posteriormente, realizou-se uma comparação baseada em índices estatísticos (índice “d” de Willmott, raiz do quadrado do erro médio (RMSE) e o erro absoluto médio (MAE)), entre os modelos gerados pelo trabalho e de outros já relatados na literatura. O modelo com utilização do NDVI com correção atmosférica apresentou os melhores resultados ($R^2 = 0,84$; $d = 0,95$ MAE = 0,44 e RMSE = 0,55) e então aplicado na estimativa do IAF durante o ciclo de cana-planta no ano safra 2013/14, o qual obteve IAF máximo de 4,8 na fase de crescimento vegetativo da cana-de-açúcar e 2,3 no final da fase de maturação. Contudo, recomenda-se a utilização de imagens orbitais do satélite Landsat 8, com correção atmosférica, para a estimativa do IAF da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: crescimento vegetal *Saccharum* spp. análise de imagem.

SUGARCANE LEAF AREA INDEX OBTAINED FROM CORRECTED NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX

ABSTRACT

Studies of leaf area in sugarcane correlates to productive potential, both in terms of dry matter accumulation or sugar content, as growth rates. Currently, because of the large areas of productive farmland, satellite data have been increasingly used in monitoring of sugarcane crops. However, the constituents of the atmosphere affect the reflectance values obtained by imaging sensors, to minimize these effects are alternative proposals for improving the estimated results. This study aimed to estimate the Leaf Area Index (LAI) of sugarcane by the vegetation index (NDVI) with atmospheric correction. LAI was collected at the field from sugarcane grown period on plots with the CTC-4 genotype in Santo Antonio de Goiás - GO in the first harvest cycle of 2013/14, and NDVI data obtained from satellite Landsat 8 OLI sensor (Operational Land Imager) at the same acreage. These data were correlated in time in ten dates of satellite imagery. The NDVI was derived from sensor reflectance data submitted to correction by FLAASH algorithm (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercube) implemented in ENVI 5.1 to minimize the atmospheric effects on reflectance data. Later, there was a comparison based on statistical indices (index "d" Willmott, root mean square error (RMSE) and the mean absolute error (MAE)), between models generated by this study and others that are reported in this study. The model that used NDVI with atmospheric correction showed the best results ($R^2 = 0.84$, $d = 0.95$ MAE = 0.44 and RMSE = 0.55) and then applied in the estimate of LAI during the sugarcane cycle plant in crop year 2013/14, which obtained maximum LAI of 4.8 in the vegetative growth phase of sugarcane and 2.3 at the end of the maturation phase. However, it is recommended to use satellite images from Landsat 8 with atmospheric correction, to estimate the sugarcane LAI.

Keywords: vegetal biomass *Saccharum spp.* image analysis.

3.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma cultura de grande destaque no agronegócio brasileiro, que atualmente é o maior produtor mundial, com estimativa de área cultivada de nove milhões de hectares, na safra 2014/15 e o estado de Goiás possui a segunda maior área plantada no país, estimada em 896 mil hectares para a safra 2014/15 (CONAB, 2014). A produtividade da cana-de-açúcar é função de características da espécie e do meio ambiente. Dentre as características da espécie destaca-se a área foliar, ou seja, a capacidade das plantas de interceptar energia radiativa. As folhas são responsáveis diretas pela transformação da energia solar em energia química, a partir da fotossíntese. A fração de luz interceptada é determinada pelo índice de área foliar (IAF) definido como a área total das folhas verdes pela área de solo (Watson, 1947). Ainda, o desenvolvimento foliar durante o ciclo da cultura pode ser relacionado ao acúmulo de graus-dia (Teruel et al., 1997), pois para cada estágio da cultura existem valores distintos de IAF (Almeida et al., 2008), além da variação espacial existente nos ambientes de produção (Scarpari & Beauclair, 2008).

O avanço das técnicas de sensoriamento remoto tornou possível o monitoramento de áreas agrícolas, sendo observado o potencial de diversos sensores, em especial do sistema Landsat, utilizado para fornecer informações referentes à cultura da cana-de-açúcar, pois esta cultura cobre extensas áreas, muitas vezes contíguas, o que permite uma menor mistura dos dados espectrais por outros alvos ou feições terrestres e que favorece o uso do sensoriamento remoto no seu monitoramento (Machado, 2003; Benvenuti, 2005; Giongo et al., 2010).

Por outro lado, algumas dificuldades entravam os estudos que envolvem dados orbitais, sobretudo em termos das relações entre estas imagens e os dados de plantas coletados em campo durante os diferentes estágios de desenvolvimento da cultura (Simões et al., 2005). Alguns estudos relacionam os produtos das técnicas de sensoriamento remoto e o monitoramento do crescimento vegetal, com vistas ao estabelecimento de um padrão de crescimento das plantas ao longo do tempo a partir da correlação com índices de vegetação, como exemplo, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), determinado pela razão entre a diferença e a soma das refletâncias nas bandas do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR) (Wiegand et al., 1991; Jackson & Huete, 1991).

Entretanto, existe uma carência de informações na correlação entre os estádios de desenvolvimento e os índices de vegetação, para que se determinem manejos adequados e específicos em cada momento ao longo do ciclo da cultura, bem como, realizar uma estimativa da produtividade, a qual é função do incremento de matéria seca vegetal, que pode ser detectada pela densidade de vegetação, cobertura vegetal, biomassa e índice de área foliar (Liu, 2007).

Ressalta-se que a atmosfera interage com a radiação eletromagnética interferindo na identificação dos alvos terrestres captados pelas imagens de sensores remotos. Como consequências, observam-se alterações na faixa de valores digitais registrados pelo sensor, alteração do brilho de cada ponto da imagem e diminuição do contraste entre superfícies próximas (Zullo Júnior et al., 1996; Couto Júnior et al., 2011; Eduardo et al., 2011). O Landsat-8 com seu novo instrumento imageador (OLI), foi concebido para manter a continuidade dos dados fornecidos pelos imageadores anteriores (ETM+ e TM), além de propor uma melhora no instrumento, em particular, nas bandas equivalentes aos comprimentos de onda da região do infravermelho próximo, que foram significativamente alteradas no intuito de diminuir efeitos da atenuação atmosférica, com ênfase à interferência do vapor de água (Flood, 2014).

Em sensoriamento remoto, a correção dos efeitos atmosféricos é realizada para minimizar a influência dos gases e aerossóis sobre a radiação refletida por um determinado alvo e captada pelos sensores (De Paula et al., 2012). A dificuldade para obter os dados atmosféricos necessários à correção de seus efeitos nas imagens, bem como a dificuldade de seleção dos procedimentos mais confiáveis para essa correção, faz com que esta seja muitas vezes desconsiderada. Além disso, o satélite Landsat 8 é o mais recente de sua série, lançado em 11 de fevereiro de 2013, portanto, estudos que avaliem seus dados em relação à parâmetros da vegetação ainda são incipientes.

Sendo assim, os objetivos desse trabalho foram: i) calibração de um modelo para medir a variação temporal do IAF da cana-de-açúcar a partir do NDVI submetido à correção atmosférica; ii) analisar a variação temporal do IAF e de dados fenométricos da cultura da cana-de-açúcar obtidos em campo; iii) comparar os dados obtidos pelo modelo aplicado neste estudo aos dados determinados por outros modelos que relacionam o IAF com o NDVI derivado de imagens orbitais; iv) identificar o melhor método para a estimativa e o acompanhamento do IAF ao longo de um ciclo de cana-planta.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na Fazenda Louzandira, em Santo Antônio de Goiás - GO (16° 29' 21,93" S; 49° 18' 46,60" O; 769 m), classificado segundo Köppen, de clima Aw, tropical de savana, megatérmico. A temperatura média anual do ar é de 23,0°C, e o mês de junho apresenta a menor média de temperatura mínima (14,4°C), enquanto o mês de setembro apresenta a maior média de temperatura máxima do ar (31,7°C). O regime pluvial é bem definido, com um período chuvoso (outubro-abril) e outro seco (maio-setembro). A precipitação pluvial média anual é de 1.498 mm, e a umidade relativa do ar, média anual, é de 70%, cujo o mês de agosto é o mais seco (47%). A perda de água média anual para a atmosfera, estimada pelo método de Penman Monteith, é da ordem de 1.559 mm (Silva et al., 2012). A área de cultivo, onde estava inserido o experimento, foi de 280 ha arrendada pela destilaria CentroÁlcool S.A., cultivada com cana-de-açúcar, variedade CTC-04, caracterizada como de maturação média a tardia, e tolerante à seca (CTC, 2013). O preparo do solo foi realizado com a aplicação de calcário (4 ton ha⁻¹) e gesso (2 ton ha⁻¹), o sistema de plantio adotado foi o semi-mecanizado com mudas pré-brotadas, a adubação de cobertura foi realizada em maio/2013 aos 30 dias após o plantio (DAP) e as aplicações de herbicidas realizadas aos 36 e 207 DAP seguindo as recomendações técnicas da destilaria CentroÁlcool S.A.

Os dados meteorológicos foram coletados em estações meteorológicas instaladas na Escola de Agronomia – UFG, no município de Goiânia-GO, situada a 17 km da área de estudo, e na EMBRAPA-Arroz e Feijão no município de Santo Antônio-GO, situado a 7 km, e em uma estação automática (Modelo DAVIS, Hayward, CA, USA) instalada próxima aos talhões cultivados com cana-de-açúcar.

As avaliações de crescimento e desenvolvimento foram realizadas por um período de 18 meses, correspondente ao ciclo de cana-planta (primeiro corte), obtidas a partir de medidas em campo e estimativas. Estas foram coletadas em dez datas coincidentes com a passagem do satélite entre as fases de crescimento de colmos e maturação.

Os dados de planta foram obtidos no período de janeiro a agosto de 2014, entre os 281 e 506 dias após o plantio (DAP), que correspondeu ao final da fase de crescimento de colmos e a fase de maturação. Os índices biométricos avaliados foram:

- i) Altura de colmo: para a medida de altura de colmo, foram utilizadas três plantas marcadas para cada três pixels amostrados, em quatro pontos de coleta, totalizando 12 plantas no talhão. A medida foi realizada com uma fita métrica medindo a distância do solo até a inserção da folha +1 como padrão de altura de colmo das plantas, conforme descrito por Silva et al. (2012).
- ii) Número de perfilhos por m²: foram contabilizados o número de perfilhos por metro linear e posteriormente foi calculado o número de perfilhos por m² (NP), conforme a metodologia proposta por Nassif (2010) em variedades CTC.

$$NP = \frac{P5}{7,5} \quad [1]$$

em que NP é o número de perfilhos por m² e P5 o número de perfilhos em 5 metros lineares (n° 5 m⁻¹)

- iii) Número de folhas verdes: Nas plantas marcadas foram realizadas contagens do número de folhas verdes totalmente expandidas e capazes de realizar fotossíntese.
- iv) Área foliar por perfilho: Determinou-se a área foliar por perfilho (AF) a partir da contagem do número de folhas verdes e pelas medições nas folhas + 3, sendo obtidos o comprimento e a largura da folha na porção mediana, segundo metodologia descrita por Hermann & Câmara (1999):

$$AF = C \cdot L \cdot 0,75 \cdot (N + 2) \quad [2]$$

em que AF é a área foliar por perfilho (cm²), C o comprimento da folha +3 (cm), L a largura da folha +3 (cm), 0,75 o fator de correção para área foliar da cultura da cana-de-açúcar, e N o número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde. Já o índice de área foliar (IAF, m² m⁻²) foi calculado como sendo a relação entre a área foliar e a área ocupada pela planta:

$$IAF = \frac{NP \cdot AF}{S} \quad [3]$$

em que NP é o número de perfilhos por m² (NP m⁻²), AF a área foliar por perfilho (m²) e S a área do terreno (m²).

Para a estimativa de graus-dias (GD, °C dia⁻¹) para a cana-de-açúcar, foram utilizadas as seguintes equações propostas por Villa Nova et al. (1972):

Quando T_m > T_b, tem-se:

$$GD = \left(\frac{T_M + T_m}{2} \right) - T_b \quad [4]$$

Entretanto, se T_m ≤ T_b, tem-se:

$$GD = \frac{(TM-Tb)^2}{2(TM-Tm)} \quad [5]$$

em que TM é a temperatura máxima do ar diária (°C), Tm a temperatura mínima do ar diária (°C) e Tb a temperatura basal da cana-de-açúcar, a qual foi utilizado o valor de 18°C (Bachi & Souza, 1978).

Seguindo a metodologia proposta por Teruel et al. (1997) os valores de GD foram padronizados para cada dia a partir da relação entre a insolação diária (N) e o período de 12 horas de acordo com a Equação 6:

$$GD_{aj} = GD \cdot \frac{N}{12} \quad [6]$$

A base de dados espectrais foi obtida a partir do download de imagens Landsat 8/OLI, no banco de dados do sistema *Earth Explorer*, com a seleção de imagens capturadas entre as datas de plantio (abril/2013) e colheita (agosto/2014) da cana-de-açúcar. Estas imagens foram obtidas gratuitamente na USGS (*United States Geological Survey*), a partir dos sites *EarthExplorer*, *Global Visualization Viewer* (GloVis) e *LandsatLookViewer*, as quais consistem em arquivos digitais no formato *.tiff* quantificados em valores de número digital ou nível de cinza (DN). Esse valor é utilizado para descrever os valores de pixels que ainda não foram calibrados em unidades fisicamente significativas. Os dados em DN são convertidos em reflectância no topo da atmosfera (TOA) a partir da utilização de coeficientes de redimensionamento radiométricos, fornecidos no arquivo de metadados disponibilizado juntamente com as imagens (USGS, 2013).

O pré-processamento de imagens consistiu no empilhamento das imagens digitais em ambiente SIG com posterior inspeção visual para avaliação da qualidade das imagens com relação a critérios pré-estabelecidos, tais como: a ocorrência de *pixels* escuros, incidência de nuvens e identificação de feições dos talhões da área de estudo.

A organização dos dados espectrais iniciou-se com a obtenção das imagens órbita/ponto (222/72), sem incidência de nuvens sobre os talhões cultivados com cana-de-açúcar, variedade CTC-04, na região de Santo Antônio de Goiás - GO, com intervalo de aquisição de 16 dias e resolução espacial de 30 m. A seleção de imagens durante o ciclo de crescimento da cana-de-açúcar resultou em 18 cenas entre os anos de 2013 e 2014.

Posteriormente, procedeu-se a obtenção dos dados de reflectância, a qual baseia-se nos parâmetros das Equações 7 e 8 (USGS, 2013), sendo compilados no software ENVI 5.1 a partir da ferramenta *Radiometric Calibration* das bandas 4 (vermelho) e 5

(infravermelho próximo), que possibilitou converter os valores de DN da imagem em radiância (Equação 7):

$$L \lambda_i = M_{Li} \cdot Q_{cal} + A_{Li} \quad [7]$$

em que, $L \lambda_i$ é a radiância espectral do sensor na banda “i” ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), M_L o fator multiplicativo de redimensionamento da banda “i” (adimensional) A_L o fator de redimensionamento aditivo específico da banda “i” (adimensional) e Q_{cal} o número digital do pixel (DN) (nível de cinza).

Posteriormente, determinaram-se os valores de reflectância no topo da atmosfera (TOA) (%)

$$\rho \lambda_i = \frac{\pi \cdot L \lambda_i \cdot d^2}{\text{sen } \theta} \quad [8]$$

sendo $L \lambda_i$ a radiância espectral do sensor na banda “i” ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), d a distância Terra-Sol em unidades astronômicas (ua) e θ a elevação solar (graus).

Na Tabela 3.2.1 são descritos os parâmetros das Equações 7 e 8 extraídos do arquivo de metadados das imagens, além das datas de aquisição, sua relação aos dias após plantio (DAP) e horário de passagem do satélite.

Tabela 3.2.1. Data de passagem do satélite, relação da imagem aos dias após o plantio (DAP), hora de passagem do satélite e parâmetros do arquivo de metadados das imagens Landsat 8/OLI: M_L (fator multiplicativo de redimensionamento da banda “i”), A_L (fator aditivo específico da banda “i”), B4 e B5 (bandas 4 e 5, respectivamente), d (distância Terra-Sol em unidades astronômicas) e θ (elevação solar em graus).

Data	DAP	Hora	M_L		A_L		d	θ
			B4	B5	B4	B5		
01/05/2013	26	13:22:41	9,839E-03	6,021E-03	-49,196	-30,105	1,007	48,41
17/05/2013	42	13:22:54	9,761E-03	5,977E-03	-48,835	-29,884	1,011	45,35
18/06/2013	74	13:22:50	9,678E-03	5,922E-03	-48,389	-29,612	1,016	41,58
04/07/2013	90	13:22:53	9,665E-03	5,914E-03	-48,325	-29,572	1,016	41,56
05/08/2013	122	13:22:54	9,709 E-03	5,941E-03	-48,547	-29,708	1,014	45,79
21/08/2013	138	13:22:56	9,764E-03	5,975E-03	-48,822	-29,877	1,011	49,71
06/09/2013	154	13:22:56	9,834E-03	6,018E-03	-49,172	-30,091	1,007	54,32
24/10/2013	202	13:22:40	1,0101E-03	6,181E-03	-50,504	-30,906	0,994	65,59
28/01/2014	298	13:22:00	1,030E-03	6,302E-03	-51,497	-31,514	0,984	59,14
02/04/2014	362	13:21:06	9,998E-03	6,118E-03	-49,992	-30,592	0,999	53,66
04/05/2014	394	13:20:33	9,825E-03	1,495E-03	-49,129	-30,064	1,008	47,51
20/05/2014	410	13:20:24	9,757E-03	5,970E-03	-48,784	-29,853	1,011	44,52
05/06/2014	426	13:20:33	9,705E-03	5,939E-03	-48,525	-29,695	1,014	42,28
21/06/2014	442	13:20:37	9,674E-03	5,920E-03	-48,370	-29,600	1,016	41,15
07/07/2014	458	13:20:44	9,666E-03	5,915E-03	-48,330	-29,576	1,016	41,38
23/07/2014	474	13:20:46	9,680E-03	5,923E-03	-48,401	-29,619	1,015	43,05
08/08/2014	490	13:20:56	9,718E-03	5,947E-03	-48,591	-28,735	1,013	46,06
24/08/2014	506	13:20:59	9,774E-03	5,981E-03	-48,871	-29,906	1,011	50,12

As correções nas imagens de TOA foram realizadas a partir dos procedimentos para obtenção das imagens de reflectância de superfície (RS). Nessa etapa utilizou-se o modelo MODTRAN de transferência radiativa, compilado ao algoritmo FLAASH (Tabela 3.2.2), implementado na ferramenta *atmospheric correction* do software Envi 5.1.

Tabela 3.2.2. Parâmetros fixos de entrada para aplicação do algoritmo FLAASH de correção atmosférica.

Parâmetros	Seleção
Coordenadas centrais	16° 28' 54,30" S; 49° 20' 57,36" O
Sensor	Landsat 8/OLI
Altitude do sensor	705 Km
Altitude média da região	769 m
Tamanho do pixel	30 m
Modelo Atmosférico	<i>Mid-Latitude Summer</i>
Modelo de aerosol	Rural

Neste modelo, a correção dos efeitos atmosféricos é realizada com base na Equação 9:

$$L \lambda_i = \left(\frac{A \cdot \rho}{1 - \rho_e \cdot S} \right) + \left(\frac{B \cdot \rho_e}{1 - \rho_e \cdot S} \right) + L_a \quad [9]$$

em que $L \lambda_i$ é a radiância espectral no sensor ($W \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), ρ a reflectância de superfície do pixel (%), ρ_e a média da reflectância de superfície do pixel e da região vizinha (%), S é o albedo esférico da atmosfera (adimensional), L_a a radiância retroespalhada na atmosfera ($W \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), A e B são parâmetros que dependem das condições da atmosfera e da geometria de iluminação. O MODTRAN é capaz de estimar os valores de A , B , S e L_a para uma dada condição atmosférica e assim, determinar a radiância da superfície e em seguida a reflectância.

A estimativa do conteúdo de vapor de água na atmosfera (w , $g \text{ cm}^{-2}$) foi obtida pela equação de Leckner (Iqbal, 1983):

$$w = 0,493 \cdot UR \cdot \frac{e_s}{T_{ar}} \quad [10]$$

em que T_{ar} é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), UR a umidade relativa média no dia de aquisição (%), e e_s a pressão exercida pelo teor saturante de vapor de água (kPa), estimada pela equação de Tetens (Pereira et al., 2002):

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}} \quad [11]$$

A partir das imagens de TOA e RS foi possível obter os valores de $NDVI_{AP}$ (índice de vegetação por diferença normalizada, sem correção atmosférica) e $NDVI_{COR}$ (índice de vegetação por diferença normalizada, com correção atmosférica), respectivamente, onde extraiu-se os dados em quatro janelas de três pixels, delimitadas sobre um dos talhões da área de cultivo (93,6 ha). O recorte das imagens foi realizado com base no mapa georreferenciado dos talhões, com o intuito de se considerar somente as áreas cultivadas com a mesma variedade, época de plantio e preparo do solo. O NDVI, extraído das imagens de TOA e RS, foi estimado pela Equação 12.

$$NDVI = \frac{\rho_{nir-} - \rho_{red}}{\rho_{nir+} + \rho_{red}} \quad [12]$$

em que ρ_{nir-} é a reflectância na banda do infravermelho próximo (%), e ρ_{nir+} a reflectância na banda do vermelho (%).

Outros dois métodos foram utilizados para obtenção do IAF em função do NDVI:

i) Método descrito por Picoli (2007): primeiramente foi obtido o fator de correção de cobertura do solo (F_c) de Choudhury et al. 1994:

$$F_c = 1 - \left(\frac{NDVI_{\max} - NDVI}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^{0,9} \quad [13]$$

em que $NDVI_{\max}$ é o valor máximo do NDVI na imagem, $NDVI_{\min}$ o valor mínimo do NDVI da imagem, $NDVI$ é o valor obtido em cada pixel da janela adotada, e 0,9 o valor ajustado por Picoli (2007) para a cana-de-açúcar. Após isto, determina-se o IAF pela Equação 14:

$$IAF = -2\ln(1 - F_c) \quad [14]$$

ii) Método descrito por Xavier e Vetorazzi (2004):

$$IAF = 4,546NDVI^{3,496} \quad [15]$$

A Figura 3.2.1 apresenta um fluxograma que representa os procedimentos de processamento de imagens Landsat 8/OLI para a obtenção dos modelos de IAF da cana-de-açúcar.

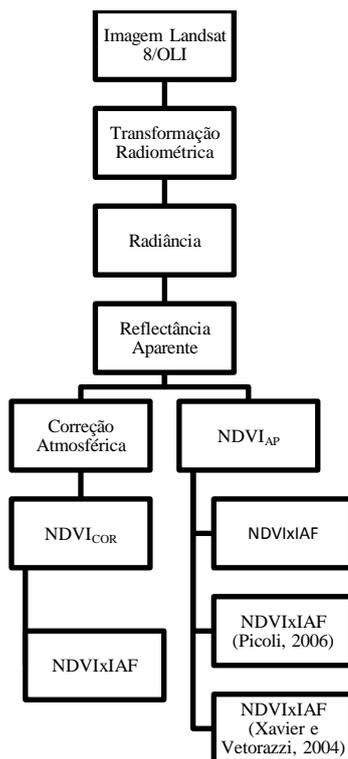


Figura 3.2.1. Fluxograma de processamento das imagens Landsat 8/OLI.

3.2.1 ESTATÍSTICA EXPERIMENTAL

Os valores de $NDVI_{AP}$ e $NDVI_{COR}$ dos talhões foram correlacionados aos dados de IAF obtidos em campo na área das janelas de três pixels, obtendo-se equações de regressão simples ao longo do ciclo de crescimento da cultura da cana-de-açúcar.

Para avaliar o desempenho dos métodos aplicados para a obtenção do IAF, no que tange à sua precisão e acurácia, utilizaram-se os índices estatísticos: a) índice de concordância de Wilmott (d); erro máximo (E_{max}); erro absoluto médio (EAM); raiz quadrada do erro médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2) (Camargo & Sentelhas et al., 1997). Esses índices foram obtidos a partir das seguintes equações:

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right) \quad [16]$$

$$E_{max} = \max(|P_i - O_i|)_{i=1}^n \quad [17]$$

$$E_{Amed} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \right] \quad [18]$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \cdot \left(\frac{100}{O} \right) \quad [19]$$

em que O_i corresponde aos dados de IAF observados em campo; P_i os dados obtidos pelos modelos que relacionam o IAF ao NDVI; n o número de observações, e O a média dos valores de IAF observados em campo em cada data de passagem do satélite Landsat-8.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise temporal das variáveis de crescimento permitiu relacioná-las ao acúmulo de graus dias identificando a resposta da cultura às unidades térmicas demandadas para o seu crescimento. O aumento do IAF foi acentuado até 362 DAP ou 1184 GDA na cana-planta, quando o IAF atingiu o pico de 5,4 (Figura 3.3.1a). Estes resultados corroboram aos encontrados na literatura, onde os IAF's máximos para a cana-de-açúcar, ciclo de cana-planta, são encontrados entre 750 e 1500 GDA, entretanto, os valores de IAF são conflitantes, pois em alguns estudos este IAF máximo está em torno de 6 e 7 para a variedade CB 47-355 na região de Araras-SP (Teruel et al., 1997), em torno de 4,0 e 1200 GDA para a variedade RB92579 e 3,5 com 1250 GDA para a variedade SP791011 no ciclo de cana-planta, na região dos tabuleiros costeiros de Alagoas (Almeida et al., 2008). As diferenças devido às diferentes variedades utilizadas nos estudos também podem ocorrer

em função das características do ambiente (clima, fertilidade do solo, características físico-hídricas dos solos). O efeito da disponibilidade hídrica na expressão do IAF da cana-de-açúcar foi observado por Farias et al. (2007) que ao avaliaram a aplicação de lâminas suplementares de 25, 50, 75 e 100% da ETc para a variedade SP 79-1011 na região de Capim-PB, observaram que somente as parcelas que receberam 100% de reposição hídrica expressaram o IAF máximo de 4,0 aos 180 DAP na época de maior incidência de radiação solar.

A partir de 1184 GDA foi observado um declínio do IAF com valor médio de 1,56 aos 506 DAP e 1566 GDA. Até a expressão do IAF máximo observaram-se taxas médias de expansão de IAF iguais a $0,04 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, após isto, a ocorrência de taxas negativas de IAF indicaram o decréscimo da área foliar. O período de maior declínio do IAF foi observado entre 410 e 426 DAP a uma taxa de $-0,07 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Quanto à altura de plantas observaram-se taxas de crescimento até os 442 DAP e 1424 GDA com 3,86 m de altura média de plantas (Figura 3.3.1c), com a maior taxa média de crescimento ($0,02 \text{ m dia}^{-1}$) registrada no período compreendido entre 298 DAP (início das medições) e 336 DAP (Figura 3.3.1d). Após este período observaram-se menores taxas de crescimento, com a menor taxa média verificada em 490 DAP ($0,19 \text{ cm dia}^{-1}$), ocorrida na fase de maturação, que se caracterizou pela estabilização da ALT, em cana-planta, onde o crescimento da cultura é bastante lento devido ao direcionamento de fotoassimilados para o acúmulo de sacarose, em detrimento da elongação do colmo (Keating et al., 1999). Os resultados de ALT se aproximam aos encontrados por Nassif (2010) que obteve valores máximos de altura de plantas, para a CTC-04, iguais a 3,3 m aos 400 DAP, na região de Pradópolis-SP.

O NFV apresentou valores máximos e mínimos de 11 e 2 folhas por colmo durante o período de avaliação, no qual se observou uma média de 10 folhas verdes por colmo durante o período de expansão foliar. A média de NFV durante a fase de taxas negativas foi de 6,7 (Figura 3.3.1d), com o menor valor médio de 3,48 na última avaliação aos 506 DAP com 1566 GDA (Figura 3.3.1f). Após o final do período de expansão foliar, verificado entre 298 e 362 DAP (1184 GDA), a cultura reduz o gasto de energia para produção de folhas verdes e aumenta realocação dos carboidratos para a produção de açúcar (Segato et al., 2006). Os resultados foram semelhantes aos encontrados na literatura que comprovam que a senescência e a substituição das folhas ocorrem durante todo o ciclo da planta com permanência de um número médio em torno de nove folhas vivas por colmo (Monteiro, 2012). A relação entre o NFV e o IAF mostrou uma tendência positiva entre as

duas variáveis, de forma que quando o NFV atingiu seu pico de 10,5 o IAF apresentou seu valor máximo de 5,4. À medida que o NFV diminuiu com a expressão de taxas negativas entre 394 e 506 DAP o IAF acompanhou a mesma tendência (Figuras 3.3.1b e 3.3.1f). No início do declínio de NFV aos 394 DAP observou-se uma média de 9,7 folhas por colmo, onde o IAF foi 5, e a partir disto, a diminuição das duas variáveis ocorreu até a última avaliação aos 506 DAP com NFV de 3,4 e IAF de 1,5. Silva et al. (2012) mostraram uma tendência positiva do IAF da cana-de-açúcar com o NFV, onde, quando o IAF foi próximo de $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, o NFV foi de 7,2, e quando o IAF foi próximo de $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, o NFV tornou-se igual a 8,0, por outro lado, quando o NFV reduziu-se para 6,2 o valor de IAF diminuiu para $4,33 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. A senescência observada após a expressão do IAF máximo de 5,4 foi semelhante a resultados encontrados na literatura, pois se sabe que o fechamento do dossel ocorre quando o $\text{IAF} > 4$, ocorrendo a partir deste ponto uma maior senescência foliar devido ao auto-sombreamento (Bezuidenhout, 2003). Estudos realizados por Nassif et al. (2010), com a variedade de cana-de-açúcar CTC-04, encontraram valores diferentes aos apresentados neste trabalho ($\text{IAF}=3,3$; $\text{NFV}=7,2$ folhas colmo⁻¹), isto para a região de Piracicaba-SP.

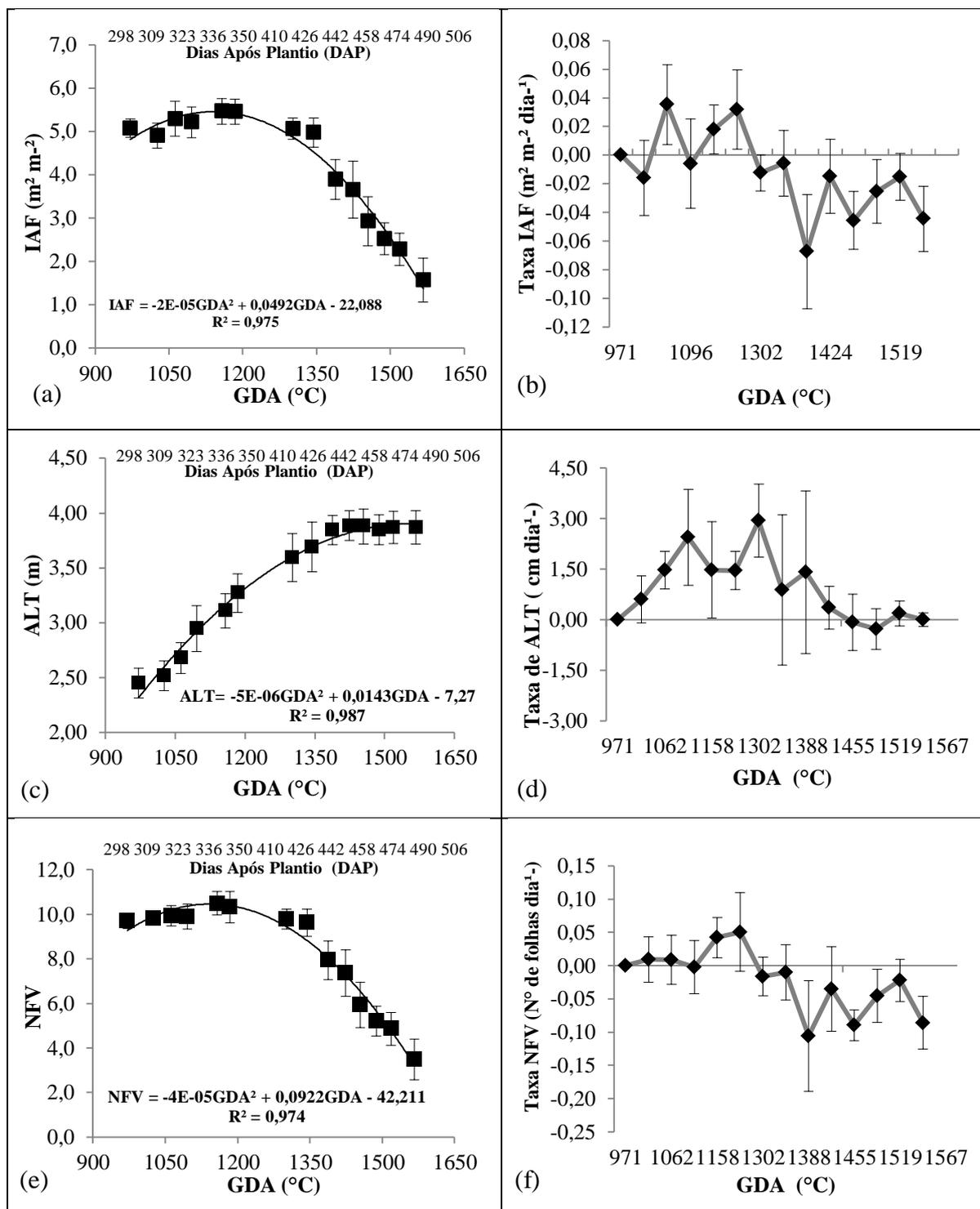


Figura 3.3.1. Variação temporal e respectivas taxas dos valores observados de índice de área foliar (A e B), altura de plantas (C e D) e número de folhas verdes (E e F) da cana-de-açúcar em função dos graus dias acumulados (GDA) entre os 298 e 506 dias após o plantio (DAP) em Santo Antônio de Goiás - GO.

O recorte de imagens com base no mapa georreferenciado dos talhões permitiu que somente pixels puros de cana-de-açúcar fossem selecionados (Figura 3.3.1). As amostras de pixels puros são capazes de representar áreas homogêneas sem que haja perda de precisão no monitoramento do ciclo de uma cultura agrícola (Duveiller & Defourny, 2010).

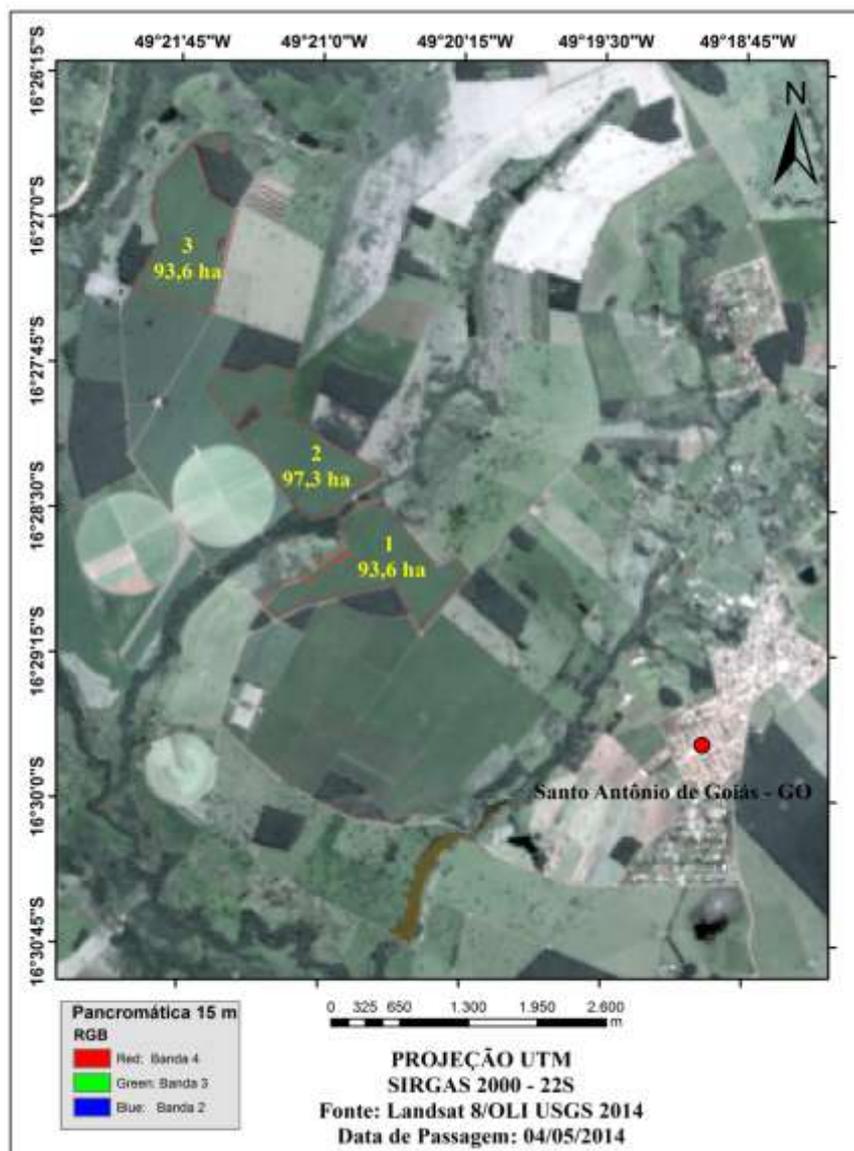


Figura 3.3.2 Localização e áreas dos talhões cultivados com cana-de-açúcar em Santo Antônio de Goiás-GO no ano safra 2013/14 no ciclo de cana-plantar.

Na Tabela 3.3.1 são descritos os valores de temperatura do ar (Tar), umidade relativa (UR), pressão de saturação de vapor d'água (e_s) e conteúdo de vapor d'água estimado (w) durante o ciclo de produção da cana-de-açúcar em estágio de cana-

planta no ano safra 2013/14 em Santo Antônio de Goiás – GO, os quais foram utilizados na aplicação da correção atmosférica para determinação do NDVI_{COR}

Tabela 3.3.1. Valores obtidos de temperatura média do ar (Tar), umidade relativa (UR), pressão de saturação do vapor d'água (e_s) e conteúdo de vapor na atmosfera (w) nas datas de passagem do satélite Landsat 8/OLI durante o ciclo de cana-planta no ano safra 2013/14 em Santo Antônio de Goiás – GO.

Data de aquisição	Tar (°C)	UR (%)	e_s (kPa)	w (g m ⁻²)
01/05/2013	22,28	59,2	2,69	3,52
17/05/2013	22,02	63,7	2,65	3,78
18/06/2013	22,44	61,5	2,72	3,67
04/07/2013	20,12	64,5	2,36	3,72
05/08/2013	22,40	36,0	2,71	2,15
21/08/2013	21,70	43,5	2,60	2,57
06/09/2013	23,48	51,7	2,89	3,14
24/10/2013	20,30	67,0	2,38	3,88
28/01/2014	24,10	65,0	3,00	3,99
02/04/2014	26,00	79,0	3,36	5,04
04/05/2014	25,00	72,0	3,17	4,50
20/05/2014	22,70	74,0	2,76	4,43
05/06/2014	22,80	64,0	2,78	3,84
21/06/2014	21,20	63,0	2,52	3,69
07/07/2014	19,60	61,0	2,28	3,50
23/07/2014	20,40	65,0	2,40	3,73
08/08/2014	19,90	54,0	2,32	3,11
24/08/2014	21,80	55,0	2,61	3,25

Os valores de NDVI_{AP} variaram entre 0,79 e 0,39 (Figura 3.3.3a) e os de NDVI_{COR} estiveram entre 1,03 e 0,45 (Figura 3.3.3b) entre 298 e 506 DAP no período entre o final da fase de crescimento de colmos e maturação da cana-de-açúcar e no qual foram realizadas as avaliações da cultura no campo. A maior diferença entre os valores de NDVI foi observada na imagem de maio/2014 (410 DAP) onde a correção atmosférica resultou em um aumento de 69% no NDVI. Variações mais acentuadas foram observadas no valores de NDVI_{AP} em relação aos valores obtidos em função da correção atmosférica (NDVI_{COR}), pois neste caso, os efeitos de absorção e do espalhamento dos fluxos incidentes e refletidos foram minimizados. A queda repentina do valor de NDVI observada na imagem de maio/2014 (410 DAP) pode ser atribuída a um conjunto de fatores que podem alterar a qualidade dos valores de reflectância, principalmente no que diz respeito à condição atmosférica no momento de aquisição. Os menores valores de NDVI_{AP} ocorrem

devido à presença dos efeitos atmosféricos de espalhamento e absorção ocasionados pelos aerossóis, vapor d'água e do ozônio, que alteram os valores reais que deveriam ser registrados pelo sensor. Do ponto de vista da cultura, o período representou a fase de maturação da cana-de-açúcar que resulta em uma esperada redução na reflectância na faixa do infravermelho com conseqüente redução nos valores de NDVI (Wiegand et al., 1991).

A partir da análise dos desvios-padrão foi possível detectar diferenças entre o $NDVI_{AP}$ e $NDVI_{COR}$ (Figura 3.3.3c) em que os valores de $NDVI_{COR}$ foram superiores ao $NDVI_{AP}$ em todos os tempos de avaliação, com erros relativos entre 11% e 43% (Figura 3.3.3d). Os valores de NDVI de imagens não corrigidas e de imagens corrigidas para os efeitos atmosféricos em áreas de vegetação, solo exposto, pastagem e água, podem apresentar diferenças médias de 5,12, -79,16, -11,86 e 135% entre as imagens corrigidas e não corrigidas, respectivamente (Eduardo et al., 2013). As diferenças entre dados espectrais corrigidos já foi relatada em estudos relevantes. Turner et al. (1999) avaliaram o efeito da correção atmosférica na correlação entre NDVI e IAF derivada de imagens Landsat 5 TM em diferentes fitofisionomias (pastagens e florestas) em regiões de clima temperado e observaram coeficientes de determinação (R^2) de 0,51 e 0,74 para os dados não submetidos à correção e os dados corrigidos, respectivamente. Os autores afirmam que tal ganho deve ser esperado, uma vez que a geometria entre o sol, superfície e sensor é diferente entre as imagens, devido a variação das propriedades ópticas da atmosfera que podem gerar ruídos nas relações espectrais. Além disso, os autores afirmam que o NDVI calculado a partir da reflectância aparente sempre será menor, devido aos efeitos atmosféricos, enquanto que o obtido por diferentes algoritmos de correção serão sempre maiores.

Ainda, verificou-se que os menores erros relativos foram encontrados no período mais próximo da colheita da cana-de-açúcar, onde no campo observou-se que a área dos talhões que compunham os pixels da imagem era em sua maioria formada pela composição de constituintes vegetais (folhas, colmos e palha), que resultou em valores de NDVI entre 0,5 e 0,4 aos 506 DAP. Os menores valores de NDVI observados nessa fase estiveram mais próximos na comparação entre as imagens com e sem aplicação de correção atmosférica, com menores erros relativos observados (Figura 3.4d). No final do ciclo de produção da cana-de-açúcar a média das diferenças relativas foi de 15%, corroborando com os resultados encontrados por Agapiou et al. (2011), que avaliaram o efeito da correção atmosférica no NDVI obtido por imagens Landsat 7 ETM+ e obtiveram

valores médios de diferença relativa iguais a 20% para $NVDI < 0,40$ e diferenças superiores a 50% para valores de $NDVI > 0,40$. Imagens adquiridas antes do início da colheita fornecem melhores correlações entre o índice vegetativo e a produtividade agrícola da cana-de-açúcar, pois neste período os valores de NDVI tendem a estabilizar, coincidindo com o maior acúmulo de biomassa da cultura (Machado, 2003). Ao correlacionar dados de reflectância na faixa do visível dos sensores TM e ETM+ com variáveis indicadoras de crescimento da cana-de-açúcar, Simões et al. (2009) observaram que os melhores ajustes ocorreram a partir da aplicação de curvas cúbicas e senoidais, onde a fase assintótica representa a saturação das respostas espectrais e estabilização do aumento de biomassa. Além disso, os autores observaram a partir da análise de nove imagens submetidas à correção atmosférica pelo modelo 5S (*Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire*) desenvolvido por Tanré et al. (1990), correlações acima de 83% entre índices espectrais e índice de área foliar, produtividade, biomassa total e número de plantas por metro, para a variedade SP80-1842 de quarto e quinto corte, cultivada em sistema de colheita mecanizada na região de Araras-SP.

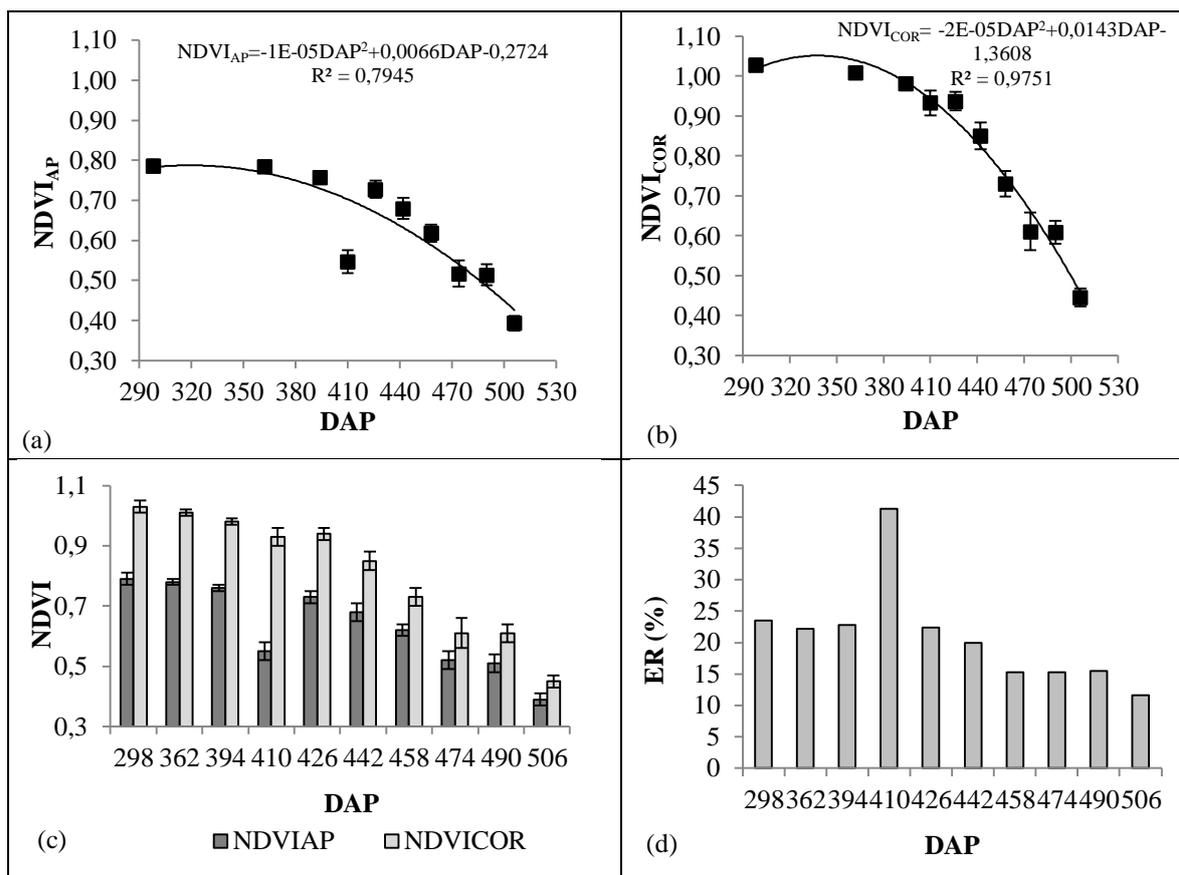


Figura 3.3.3. Valores médios de NDVI sem correção atmosférica ($NDVI_{AP}$) e com correção atmosférica ($NDVI_{COR}$) da cana-de-açúcar em função dos dias após o plantio (DAP), bem como seus desvios-padrão e o erro relativo ($ER\% = 100 \cdot (NDVI_{COR} - NDVI_{AP}) / NDVI_{COR}$) em Santo Antônio de Goiás – GO, safra 2013/14.

A relação entre o IAF e NDVI, ajustou equações de regressão linear simples (Figuras 3.3.4a e 3.3.4b), com maior dispersão dos dados no ajuste do IAF com o $NDVI_{AP}$ ($R^2 = 0,60$), em relação ao ajuste com $NDVI_{COR}$ ($R^2 = 0,84$). Um maior coeficiente angular foi observado no ajuste com o $NDVI_{AP}$ (8,11) comparado ao $NDVI_{COR}$ (6,44), indicando que há um maior aumento do IAF em um “range” menor de NDVI. Assim, o ponto de saturação do $NDVI_{AP}$ e do $NDVI_{COR}$ foi alcançado com valor de aproximadamente 0,80 e 1,0, respectivamente, correspondente a um IAF $\approx 5,4$, para ambos. Sugawara & Rudorff (2011) observaram alta variabilidade do NDVI nos períodos de desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, tal variabilidade diminui nos períodos finais de crescimento, onde mesmo com o aumento de biomassa, o NDVI satura-se próximo a valores de 0,9, ou seja, acima deste valor o NDVI não seria capaz de expressar o aumento de biomassa.

Wang et al. (2005) estudaram a relação IAF/NDVI obtida a partir de dados de vários sensores em florestas na Europa e verificaram que ao longo dos anos as correlações em um mesmo local e estágio fenológico apresentaram valores de R^2 diferentes (0,82 e 0,28). Segundo os autores uma possível razão é que o NDVI fica saturado com altos valores de IAF, de modo que, acima de alguns limites, novos aumentos do IAF não alteram o NDVI, onde em alguns anos o IAF pode aumentar para além do limiar e em outros anos isso pode não ocorrer.

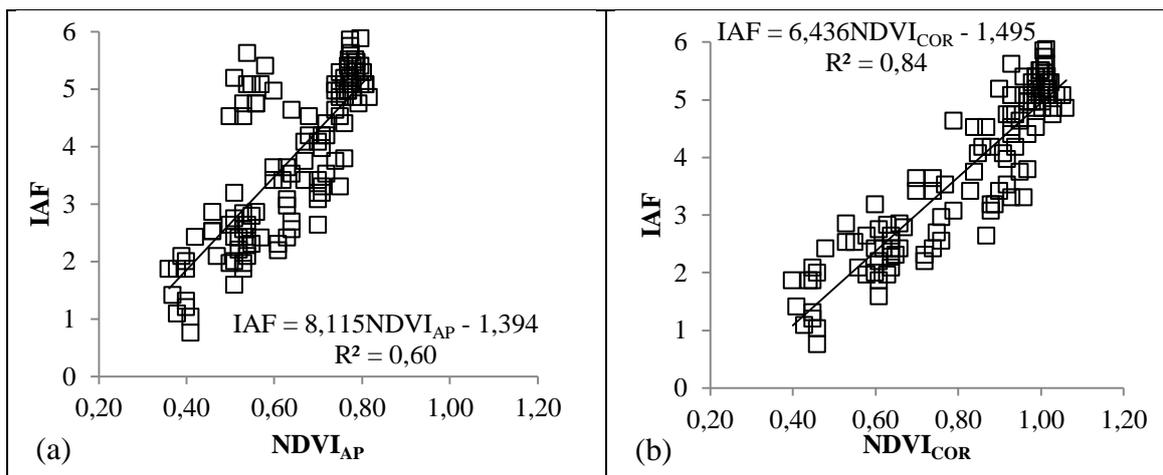


Figura 3.3.4. Modelos de estimativa do IAF da cana-de-açúcar a partir do $NDVI_{AP}$ sem correção atmosférica (a) e do $NDVI_{COR}$ corrigido (b) em Santo Antônio de Goiás – GO na safra 2013/14.

Todos os modelos utilizados para estimar o IAF mostraram um decréscimo ao longo do tempo, onde foi possível destacar uma acentuada subestimativa de IAF no modelo proposto por Picoli (2007) até 426 DAP e posteriormente, o modelo de Xavier e Vetorazzi (2004) apresentou maior subestimativa em relação ao IAF observado em campo, evidenciando assim, a necessidade de comparação entre diferentes modelos de estimativa do IAF da cana-de-açúcar quando se pretende analisar o comportamento temporal da cultura (Figura 3.3.5).

A partir dos índices estatísticos (Figura 3.3.6) utilizados para comparar o IAF observado em campo (IAF_O) aos IAFs estimados por diferentes modelos, foi possível verificar que o método que apresentou a menor dispersão em relação a uma reta 1:1 ($IAF:NDVI$), determinado pelo índice “d”, foi a estimativa de IAF em função do NDVI com correção atmosférica, o qual apresentou também os menores RMSE, EA_{max} e EA_{med} . Os piores índices foram detectados na metodologia de Picoli (2007). Tais diferenças

podem ser reflexo da variação estrutural do dossel da cana-de-açúcar nos talhões, quando comparada com amostragens localizadas, o que sugere a necessidade do aumento de amostragens em campo no intuito de que as diferenças entre os valores reais de IAF se aproximem dos valores estimados por modelos espectrais, que de certa forma generalizam o espaço de variação do IAF. As diferenças também podem ser atribuídas às diferentes condições e sensores utilizados por cada um dos modelos avaliados.

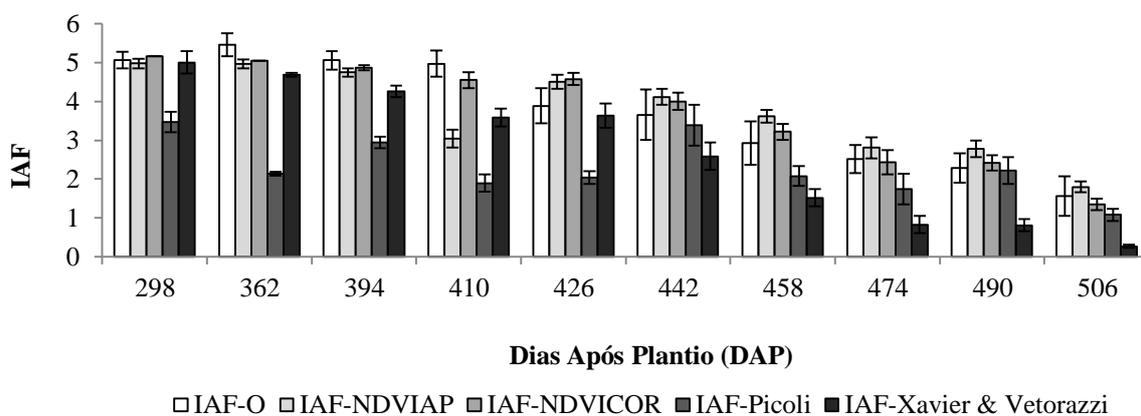


Figura 3.3.5 Índice de área foliar da cana-de-açúcar observado em campo (IAF-O), obtido a partir do NDVI sem correção atmosférica (IAF-NDVI_{AP}), com correção atmosférica (IAF-NDVI_{COR}), pelo modelo proposto por Picoli (IAF-Picoli) e por Xavier e Vetorazzi (IAF-Xavier & Vetorazzi) em Santo Antônio de Goiás na safra 2013/14.

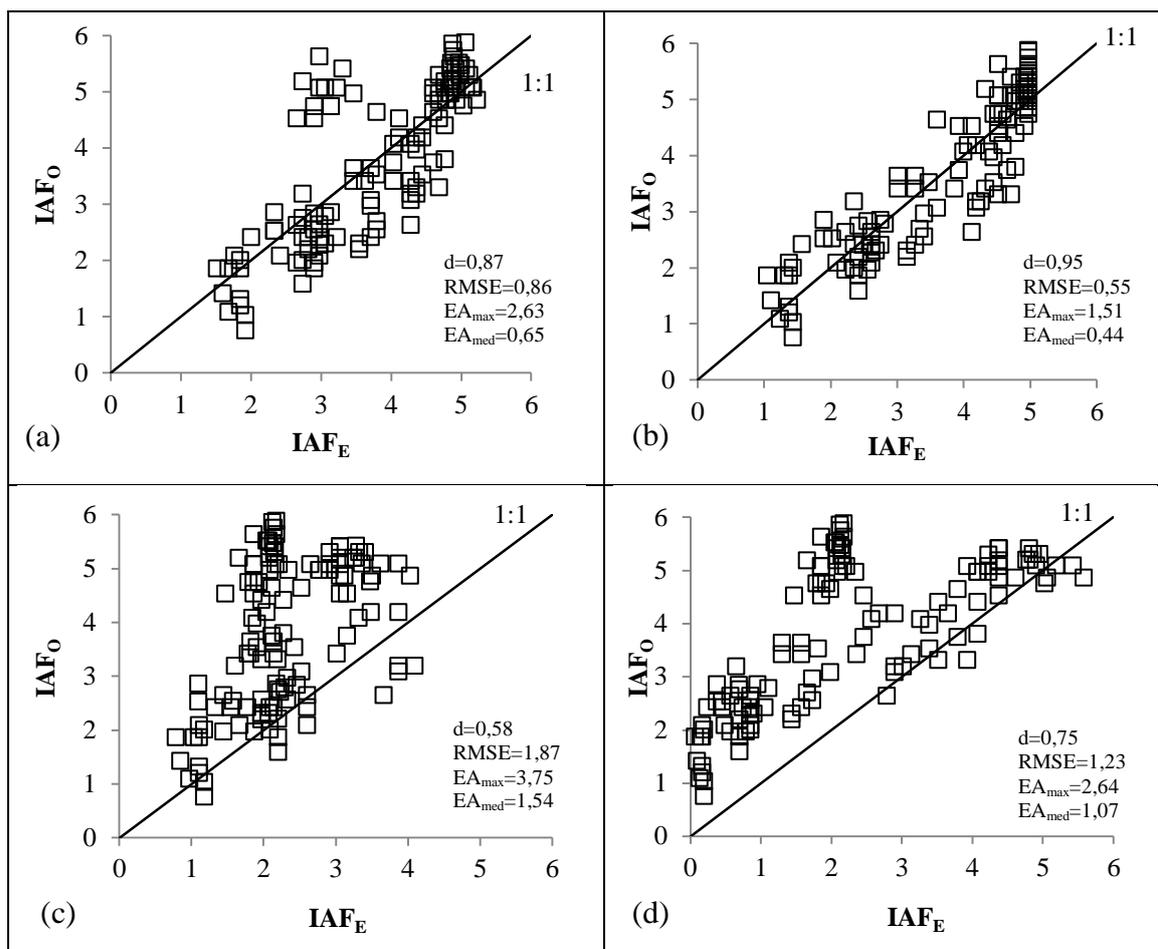


Figura 3.3.6 Relação entre o índice de área foliar da cana-de-açúcar observado em campo (IAF_O) e os estimados (IAF_E) pelos modelos obtidos pelo NDVI sem correção atmosférica [NDVI_{AP} (a)] e com correção atmosférica [NDVI_{COR} (b)], Picoli (2007) (c) e Xavier & Vetorazzi (2004) (d), bem como, seus respectivos índices estatísticos “d” de Wilmot, raiz do erro quadrático médio (RMSE) erro absoluto máximo (EA_{max}) e erro absoluto médio (EA_{med}) em Santo Antônio de Goiás – GO na safra 2013/14.

A partir do método que obteve as melhores estimativas, que utilizou o NDVI_{COR}, foi possível realizar uma análise temporal do IAF para todo o ciclo de cana-planta em estudo (safra 2013/14). Os valores médios de NDVI_{COR} estiveram entre 0,02 e 1,03 cujo o menor valor foi observado na fase de estabelecimento da cultura e o maior constatado no período de máximo crescimento de colmos, o que gerou IAF's de 0,1 e 4,6, respectivamente. Incremento e diminuição do NDVI ao longo de um ciclo estão associados ao aumento de densidade de biomassa, devido ao estabelecimento e desenvolvimento das espécies vegetais (Wang et al., 2005). Na literatura são encontrados estudos que

possibilitam a modelagem da fenologia da cana-de-açúcar em função do NDVI (Machado, 2003; Lucas et al., 2007), corroborando aos resultados encontrados no presente estudo, mesmo com emprego de sensores distintos, o que comprova que os dados do satélite Landsat-8 são eficientes para este tipo de estimativas, porém, há a necessidade de realizar calibrações prévias.

A evolução temporal do IAF_{COR} durante o ciclo de produção da cana-planta (Figura 3.3.7) mostra que a variabilidade intra-anual do IAF_{COR} médio dos talhões segue o desenvolvimento fenológico da cana-de-açúcar. A partir da curva temporal é possível distinguir diferentes subpadrões de comportamento do IAF_{COR} . No intervalo entre 26 e 138 DAP observa-se uma relação positiva até o NDVI de 0,42 que resultou em um $IAF = 1,98$ no final da fase de perfilhamento, onde, até esse momento a precipitação acumulada foi de 116,6 mm. Com o aumento das precipitações e início da estação chuvosa, na fase vegetativa, observa-se um aumento vigoroso do NDVI com o valor máximo observado no mês de janeiro/2014 ($NDVI = 1$) aos 298 DAP e IAF de 4,81, já se aproximando ao final da fase vegetativa e início da maturação. Ressalta-se que entre os meses de outubro/2013 e janeiro/2014 obtiveram-se poucas imagens corrigidas, pois são meses da estação chuvosa e nesta época as imagens apresentam grande cobertura de nuvens. No período de aquisição das imagens posteriores a janeiro/2014, no intervalo 298 – 426 DAP, a precipitação acumulada foi de 568,2 mm, o suficiente para que o NDVI permanecesse em patamares próximos a 1 até o início do mês de junho (426 DAP, $NDVI = 0,95$, $IAF = 4,49$). A partir de junho com uma diminuição acentuada da precipitação e já na fase de maturação, o NDVI apresentou queda acentuada, onde a condição de céu claro deste período permitiu que as imagens adquiridas entre junho e agosto/2014 identificassem a depleção do IAF de forma satisfatória de forma que ao final do ciclo de produção o NDVI de 0,49 na imagem de 506 DAP em agosto/14 resultou em um IAF de 2,3.

Lucas et al. (2007) analisaram o NDVI/NOAA em cana-de-açúcar no litoral norte de Pernambuco e concluíram que o comportamento do NDVI é semelhante ao da precipitação, onde o valor máximo de NDVI de 0,6 ocorreu após o mês de maior incidência de chuvas, e com a diminuição das precipitações de 585,2 mm para 97,2 e depois 25,9 mm o NDVI começa a decair, a partir de valores próximos a 0,59 para 0,43 e depois para 0,27 em resposta às respectivas lâminas. Em relação ao ciclo da cultura, os autores encontraram em uma mesma imagem valores de NDVI de 0,4 em talhões na fase de maturação e 0,3 em talhões recém-colhidos, devido ao estágio inicial onde a rebrota

exerce baixa influência na resposta espectral e a grande área de solo exposto resulta em baixos valores de NDVI. Já com a cana a três meses de idade os autores observaram NDVI de 0,51, influenciado pelo crescimento da cultura e da precipitação de 659,8 mm nos dois meses anteriores à aquisição da imagem. Sugawara et al. (2011) estudaram o NDVI obtido a partir de dados do sensor MODIS/Terra e observaram uma variação do NDVI entre 0 e 0,99 entre as fases iniciais e de máximo crescimento em áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Na região estudada pelos autores, a colheita acontece entre abril e setembro, período no qual se verifica a queda acentuada do NDVI de valores superiores a 0,75 para valores inferiores a 0,4 no final do período de colheita, além disso, relata-se que embora a cana-de-açúcar seja colhida em diferentes datas ao longo do período seco do ano, o aumento do NDVI após a colheita só ocorre após o início do período chuvoso. Romani et al. (2011) estudaram o comportamento temporal do NDVI em áreas de cana-de-açúcar obtido do satélite AVHRR/NOAA em talhões de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, onde verificaram valores de 0,2 caracterizados por solo exposto e pouca vegetação e de 0,8 em áreas que se encontravam no maior estágio de desenvolvimento.

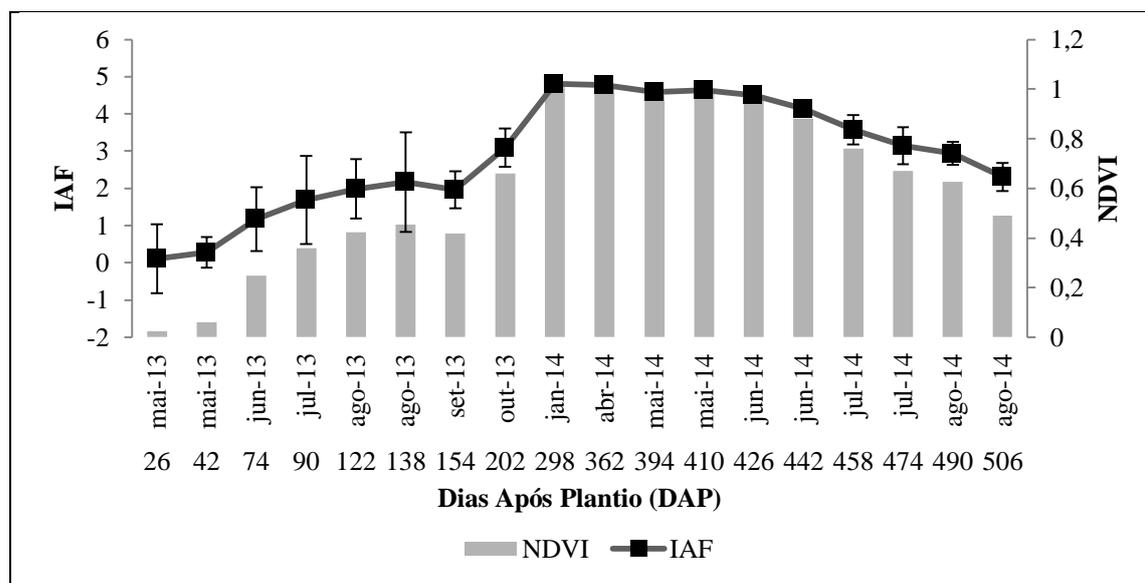


Figura 3.3.7 Evolução temporal do NDVI_{COR} e do IAF espectral em função dos dias após o plantio (DAP) durante o ciclo de produção da cana-planta em Santo Antônio de Goiás – GO na safra 2013/14.

3.4 CONCLUSÕES

Foi possível estimar o índice de área folia da cana-de-açúcar durante um ciclo de produção em estágio de cana-planta a partir das medidas de NDVI extraídas de imagens orbitais do satélite Landsat-8.

Recomenda-se a aplicação de correção atmosférica nos dados de reflectância que originam o índice de vegetação, pois assim, aumenta-se a qualidade dos dados espectrais minimizando os efeitos da atenuação atmosférica, gerando ganhos qualitativos nas correlações entre dados espectrais e de superfície.

A calibração do NDVI submetido à correção atmosférica permitiu estimar o IAF durante todo o ciclo da cana-planta, mesmo com a correlação realizada já na fase em que a cultura atingiu seu máximo crescimento, entretanto, sugere-se que a correlação entre os dados orbitais e os obtidos em campo possa gerar resultados melhores quando o acompanhamento ocorre desde as fases iniciais da cultura, como recomendado por diversos autores que utilizaram o NDVI na estimativa do IAF da cana-de-açúcar.

Sugere-se a correlação das diferentes faixas espectrais do sensor com variáveis de crescimento da cultura, de forma a identificar um ajuste do comportamento espectral da resposta da cultura da cana-de-açúcar ao comportamento padrão da vegetação para as diferentes faixas do espectro eletromagnético.

A interferência de outros fatores na relação $IAF \times NDVI$, como a concentração de clorofila por unidade de área foliar e o auto-sombreamento de folhas podem influenciar na porção de folhas que efetivamente contribuem para a reflectância do dossel captada pelo sensor, tais influências não puderam ser avaliadas neste estudo mas podem ser alvo de pesquisas futuras.

4 DETECÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE

RESUMO

O cultivo da cana-de-açúcar possui grande importância socioeconômica e ambiental para o Brasil e para o Estado de Goiás, entretanto, em vista de sua extensa área de produção, esta espécie encontra condições de déficit hídrico que podem promover quebras de produtividade. Este trabalho objetivou estimar o grau de estresse hídrico da cana-de-açúcar nas condições climáticas do Cerrado goiano. Para isto, foram avaliadas as diferenças entre a temperatura foliar e a temperatura do ar ($T_c - T_a$) durante a variação da disponibilidade hídrica do solo em cultivo de sequeiro. Além disto, uma metodologia alternativa a medida de temperatura foliar foi adotada, a temperatura de superfície obtida pelas bandas termais do satélite Landsat-8, a qual foi correlacionada, para fins de calibração, com a temperatura foliar da cana-de-açúcar. Além disto, foram realizadas medidas biométricas das plantas em campo. As avaliações foram feitas em talhões cultivados com cana-de-açúcar, em um ciclo de cana-planta (18 meses; safra 2013/14), em área experimental, do município de Santo Antônio de Goiás, GO. Para avaliar o efeito da disponibilidade de água utilizou-se balanço hídrico climatológico, além de medidas de umidade do solo em campo. Durante as datas de aquisição de imagens e medidas de campo, a temperatura de superfície apresentou erros relativos entre 5 e 20% em relação à temperatura foliar da cana-de-açúcar obtida por termômetro infravermelho de mão. Observou-se uma média do diferencial entre a temperatura de superfície e do ar de $7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ e de $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ no período de ocorrência de déficit hídrico nas fases de perfilhamento e maturação da cana-de-açúcar, respectivamente. Conclui-se que a estimativa da temperatura do dossel da cana-de-açúcar a partir da temperatura de superfície bem como sua utilização no indicativo de estresse hídrico ao nível de talhão possui maior potencial quando no acompanhamento do status hídrico da cana-de-açúcar nas fases iniciais, sugerindo-se correções para o acompanhamento nas fases finais de desenvolvimento.

Palavras chave: *Saccharum spp.* temperatura de superfície, estresse hídrico.

ESTIMATE OF SUGARCANE WATER STRESS FROM SATELLITE IMAGERY

ABSTRACT

The sugarcane crop has a great socio-economic importance for Brazil and for the state of Goiás, however, in view of its demand for extensive areas of production and occurrence of drought in the Cerrado region, this species is susceptible to water stress that can promote productivity breaks. This study aimed to estimate the degree of water stress of sugarcane in the climatic conditions of Goiás in the Cerrado region. For this, the differences between leaf temperature and the air temperature ($T_c - T_a$) were evaluated during variation of the soil water availability in dry land farming. In addition, an alternative methodology to measure leaf temperature was adopted, called land surface temperature (LST) obtained by the application of split window algorithm (SW) in thermal bands of the Landsat-8 (TIRS) satellite, which was correlated for calibration purposes with the leaf temperature of sugarcane. In addition, biometric measurements of the plants in the field were carried out. The evaluations were made in plots cultivated with sugarcane on a first harvest cycle (18 months; 2013/14) in the experimental area of Santo Antônio de Goiás - GO. To evaluate the effect of water availability climatic water balance was used, and moisture measurements of the soil were taken in the field. During the acquisition dates of images and field measurements, the surface temperature presented relative errors between 5 and 20% in relation to the leaf temperature of sugarcane obtained by handheld infrared thermometer. There was an average of 7.9°C and -1.9°C in the difference between the surface temperature and air temperature in the period of occurrence of water deficit during tillering and maturation of sugarcane, respectively. It is concluded that the temperature of the sugarcane canopy estimated from LST can be used as the indicator of water stress at the field level in the early phases, suggesting corrections for monitoring in the final stages of crop development.

Keywords: *Saccharum spp.* land surface temperature, water stress.

4.1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de déficit hídrico em plantas cultivadas afeta o seu crescimento e o desenvolvimento vegetal e é tida como uma situação comum à produção agrícola, podendo apresentar um impacto negativo substancial na produtividade. Assim, de modo a minimizar este efeito as plantas desenvolvem mecanismos morfofisiológicos, que as conduzem a economizar água (McCree & Fernández, 1989). Plantas sob estresse hídrico podem apresentar diminuição da eficiência fotossintética que culmina na redução da área foliar, redução do crescimento dos perfilhos, além de estimular a senescência de folhas (Graça et al., 2010; Inman-Bamber, 2005; Pinceli, 2010).

Quando a cultura é submetida a um estresse hídrico, os estômatos se fecham, a transpiração diminui e a temperatura foliar aumenta, de forma que quando uma planta transpira sem restrição hídrica a temperatura foliar poderá estar entre 1 e 4°C, inferior em relação à temperatura do ar e à medida que a transpiração decresce a temperatura da folha pode aumentar de 4 a 6°C em relação à temperatura do ar (López et al., 2009). A aplicação do diferencial entre a temperatura foliar e a do ar ($T_c - T_a$) na quantificação do estresse hídrico pode ser obtida a partir da utilização de sensores infravermelhos disponíveis comercialmente e que podem ser montados em campo (Clarke, 1997; Emekli et al., 2007). Sob condições de estresse hídrico severo ($\psi > 11,0$ bars), baixa velocidade do vento radiação solar global acima de 300 W m^{-2} , Trentin (2010) detectou um valor médio da $T_c - T_a$ de 3,8°C na cana-de-açúcar, variedade RB867515, cultivada em ambiente protegido.

A diminuição do fluxo de calor latente nas plantas (transformação de água líquida em vapor) resulta em um aumento da temperatura foliar. Assim, a diferença entre a temperatura do dossel vegetativo e a temperatura do ar demonstrou ser uma forma eficiente na detecção do estresse hídrico das culturas, de forma que a água evaporada por uma superfície vegetal funciona ao mesmo tempo como um estabilizador da temperatura das folhas ante a demanda evapotranspirativa da atmosfera. (Idso, 1981, Clarke, 1997; Durigon, 2011)

Contudo, a medição da $T_c - T_a$ em alguns locais pode não fornecer uma indicação adequada das condições de estresse hídrico representativas de um campo de cultivo, especialmente devido à heterogeneidade espacial das condições de umidade do solo e as extensas áreas cultivadas. Os termômetros infravermelhos utilizados na medição

da temperatura foliar podem ser de difícil aplicação no início do ciclo dos cultivos, devido à cobertura parcial do dossel (López et al., 2009). Desta forma, uma alternativa que tem sido estudada é o uso de imagens de sensoriamento remoto obtidas por satélite, ou aeronaves, dentro da faixa infravermelha termal, que é capaz de capturar a variabilidade espacial da temperatura de superfície.

Torrion et al. (2014) avaliaram imagens suborbitais de temperatura de superfície na aplicação do diferencial Tc-Tar em áreas cultivadas com algodão na região do Texas-USA, onde o monitoramento de parcelas irrigadas plenamente, com irrigação deficitária e cultivadas em sequeiro permitiu identificar diferenças de Tc-Tar em todos os tratamentos avaliados. Nas parcelas que receberam 100% da suplementação hídrica a Tc-Tar foi nula, nas parcelas com 50 % de suplementação hídrica o diferencial Ts-Ta variou entre 3 e 11°C e nas cultivadas em sequeiro os valores de Ts-Ta estiveram sempre acima de 11°C.

Contudo, os objetivos deste estudo foram: i) avaliar a aplicabilidade de imagens de temperatura de superfície da faixa do infravermelho termal do satélite Landsat-8 na correlação com a temperatura foliar em talhões cultivados com cana-de-açúcar durante o ciclo de produção em estágio de cana-planta; ii) Aplicar os diferenciais entre a temperatura de superfície e a do ar na detecção do estresse hídrico da cana-de-açúcar baseado no monitoramento da temperatura foliar, balanço de água no solo, variáveis climáticas e biométricas da cultura.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na Fazenda Louzandira, em Santo Antônio de Goiás – GO (16° 29' 21,93" S; 49° 18' 46,60" O; 769 m), em área de 194 ha arrendada pela destilaria CentroÁlcool S.A. Segundo a classificação de Köppen, o município de Santo Antônio de Goiás, GO apresenta clima Aw, tropical de savana, megatérmico. A temperatura média anual do ar é de 23,0°C e o mês de junho apresenta a maior média de temperatura mínima do ar (14,4°C), enquanto o mês de setembro apresenta a maior média de temperatura máxima do ar (31,7°C). O regime pluvial é bem definido, ou seja, período chuvoso de outubro a abril e período seco de maio a setembro. A precipitação pluvial média anual é de 1.498 mm, e a umidade relativa do ar, média anual, é de 70%, com mês de agosto apresentando o menor índice (47%). A perda de água para a atmosfera, média

anual, estimada pelo método de Penman Montheith é da ordem de 1.559 mm (Silva et al., 2012). A variedade cultivada na área foi a CTC-4 que apresenta como características, excelente brotação, maturação de média a tardia e tolerante à seca (CTC, 2013).

O solo predominante da região é o Latossolo Vermelho-distrófico, textura argilosa, fase cerradão subperenifólio, relevo plano (Silva et al., 2012).

Tabela 4.2.1. Granulometria do solo coletado em diferentes camadas, em Santo Antônio de Goiás, GO, na área cultivada com cana-de-açúcar.

Camadas (cm)	AREIA	SILTE	ARGILA
 g kg ⁻¹		
0-20	600	130	270
20-40	560	130	310
40-60	600	130	270
60-80	530	180	290

Foram realizadas medições da temperatura foliar com um termômetro infravermelho portátil (Minipa MT-330), com resolução de 0,1°C, para uma faixa de temperatura de -60 a 550°C, e precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$. O monitoramento foi realizado nas datas de passagem do satélite Landsat 8, a partir do dia 28/01/2014, aos 298 dias após o plantio (DAP), até o dia 24/08/2009 (506 DAP), totalizando 10 datas de correlação entre dados de imagem e de campo. A temperatura foliar foi obtida em quatro pontos distintos da superfície foliar de cada uma das doze plantas utilizadas nas medições, a uma distância de aproximadamente 3,0 cm da lâmina foliar. A incidência de nuvens sobre os talhões entre 309 e 362 DAP (fevereiro e abril/2014) impediu a utilização de imagens neste período, entretanto as avaliações de campo continuaram a ser realizadas, no intuito de se acompanhar a dinâmica da cultura mesmo com a impossibilidade de utilização dos dados espectrais.

As avaliações de campo foram conduzidas em quatro parcelas, na área das quatro janelas de três pixels da imagem, constituídas por cinco fileiras de plantas com 3,0 metros de comprimento espaçadas a 1,5 metros, onde quinze colmos da fileira central foram identificados aleatoriamente, totalizando 60 perfilhos, nos quais todos os parâmetros biométricos foram avaliados. As avaliações biométricas foram realizadas em catorze datas, no estágio de cana-planta entre a fase de crescimento de colmos e maturação em 298, 309, 323, 336, 345, 362, 394, 410, 426, 442, 458, 474, 490 e 506 DAP.

Foram avaliados os seguintes índices biométricos:

- i) Altura de colmo: para a medida de altura de colmo, foram utilizadas três plantas marcadas por ponto de coleta, totalizando 12 plantas no talhão. A medida foi realizada com uma fita métrica medindo a distância do solo até a inserção da folha +1 (Silva, 2007) como padrão de altura de colmo das plantas.
- ii) Número de folhas verdes: Nas plantas marcadas foram realizadas contagens do número de folhas verdes totalmente expandidas e capazes de realizar fotossíntese.
- iii) Teor relativo de água (TRA): Para determinação do TRA seguiu-se a metodologia proposta por Jamaux et al. (1997) onde extraiu-se 13 discos (0,69 cm² cada), da folha +1, determinando-se a massa seca do tecido fresco (Wf) dos discos em balança analítica. Após reidratação dos discos em água destilada durante o período de 24h obteve-se a massa do tecido túrgido (Wt). Em seguida os discos foram secos em estufa de ventilação forçada (48h/65°C) para obtenção da massa do tecido seco (Wd). Assim, o TRA foi determinado pela Equação 1.

$$\text{TRA} = [(Wf - Wd) \cdot (Wt - Wd) - 1] \cdot 100 \quad [1]$$

em que Wf é a massa do tecido fresco (g), Wd a massa do tecido seco (g) e Wt a massa do tecido túrgido.

- iv) Umidade do solo: utilizou-se uma sonda de capacitância (modelo Diviner 2000, Sentek Pty Ltd, Austrália); trata-se de um equipamento que consiste de um display com teclado e coletor de dados (datalogger) acoplado, via cabo, a uma sonda que ao ser inserida no tubo de acesso instalado no solo, provê automaticamente leituras do conteúdo de água a cada 0,1 m de profundidade. Oito tubos de acesso feitos de PVC (De = 56,5 mm; Di = 51 mm; comprimento de 1,5 m) foram instalados próximos as soqueiras avaliadas em quatro pontos de amostragem onde cada ponto representava a área abrangida por três pixels da imagem Landsat 8 sobre os talhões cultivados com cana-de-açúcar.

Os dados obtidos pela sonda foram calibrados pela Equação 2 (Lima Filho et al., 2013) em solo de textura franco-argilo-arenosa, semelhante ao encontrado na área de estudo, determinado a partir da análise textural.

$$\theta = 0,492 * \text{FR}^{2,757} \quad [2]$$

em que θ é a umidade volumétrica (m³ m⁻³) e FR a frequência relativa lida pela sonda.

v) Evapotranspiração de Referência: A evapotranspiração de referência (ET_o) foi obtida a partir do método empírico proposto por Hargreaves & Samani, onde a ET_o é obtida em função da temperatura e da radiação extraterrestre:

$$ET_o = 0,0023 * Q_o * (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0,5} (T_{med} + 17,8) \quad [3]$$

em que Q_o é a radiação extraterrestre (mm dia⁻¹), T_{máx} a temperatura do ar máxima diária (°C), T_{mín} a temperatura do ar mínima diária (°C), e T_{med} a temperatura do ar média diária (°C).

Para o processamento do balanço hídrico sequencial da cultura, na escala semanal, foi empregado o método de Thornthwaite & Mather (1955), elaborado em planilha eletrônica. A capacidade de água disponível (CAD, mm) foi obtida pela Equação 4:

$$CAD = \left(\frac{CC - PMP}{100} \right) \cdot Z_e \cdot d_g \quad [4]$$

onde CC é a capacidade de campo do solo (38 %), PMP o ponto de murcha permanente do solo (13 %), Z_e a profundidade média de exploração de 80% das raízes (78 cm) e d_g a densidade do solo (1,0 g cm⁻³).

Os limites dos talhões da área de interesse foram vetorizados com base no mapa georreferenciado da fazenda fornecido pela destilaria CentroÁlcool S.A. e processado no programa Autocad 2012, em seguida as imagens foram empilhadas no SIG ArcGis 10.1 (ESRI, 2014) juntamente com o vetor limite dos talhões para posterior recorte e extração dos dados espectrais da área delimitada pelos talhões cultivados com cana-de-açúcar. A correlação entre os dados espectrais e a temperatura foliar foi determinada a partir da utilização de quatro janelas de três pixels sobre um dos talhões cultivados com cana-de-açúcar onde em cada janela avaliaram-se três plantas pelas medidas de temperatura foliar e variáveis biométricas.

vi) Índice de área foliar (IAF): para a análise do IAF durante todo o ciclo de crescimento utilizou-se o índice estimado pela relação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada submetido à correção atmosférica e o IAF medido no campo. A relação encontrada entre o IAF (m² m⁻²) e o NDVI_{COR} é descrita pela Equação 5.

$$IAF = 6,4365NDVI - 1,4949 \quad [5]$$

A temperatura de superfície (LST, °C) foi calculada a partir da aplicação do algoritmo Split-Window proposto por Rozenstein et al. (2014), na qual relaciona a temperatura de brilho das bandas 10 e 11 do sensor TIRS com a média e a diferença da emissividade da superfície do alvo de interesse. A base deste método é de que a atenuação atmosférica da

radiância emitida da superfície é proporcional à diferença entre a radiância no sensor medida simultaneamente em dois canais térmicos distintos. A LST é então obtida a partir da aplicação da Equação 6.

$$LST = TB_{10} + C_1(TB_{10} - TB_{11}) + C_2(TB_{10} - TB_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4W)(1 - \varepsilon) + (C_5 + C_6W)\Delta\varepsilon \quad [6]$$

em que TB_{10} e TB_{11} são as temperaturas de brilho das bandas 10 e 11 ($^{\circ}C$), C_0 , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 e C_6 são os coeficientes do algoritmo Split-Window, correspondendo aos valores: -0,268; 1,378; 0,183; 54,3; -2,238; -129,2; 16,4, respectivamente (Sobrino et al., 2003; Shaouhua Zhao et al., 2009; Skokovic et al., 2014), ε é a média entre as emissividades das bandas 10 e 11, w é a estimativa do teor de vapor d'água na atmosfera no momento de aquisição da imagem e $\Delta\varepsilon$ a diferença entre as emissividades das bandas 10 e 11.

Inicialmente, a radiância foi obtida pela Equação 7.

$$L \lambda_i = M_{Li} \cdot Q_{cal} + A_{Li} \quad [7]$$

em que $L\lambda_i$ é a radiância espectral do sensor na banda "i" ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), M_L o fator multiplicativo de redimensionamento da banda "i", A_L o fator de redimensionamento aditivo específico da banda "i", e Q_{cal} o número digital do pixel (DN).

A radiância registrada pelo sensor se origina na superfície e ao atravessar a atmosfera sofre modificações em diferentes intervalos espectrais. A temperatura de brilho (TB) corresponde a radiância registrada pelo sensor a qual é calculada pela inversão da função de Planck (Equação 8).

$$T_i = \frac{K2_i}{\ln\left(\frac{K1_i}{L\lambda} + 1\right)} + 273,15 \quad [8]$$

onde T_i é a temperatura efetiva no satélite ($^{\circ}C$) na banda "i", $K2_i$ a constante de calibração da banda "i", $K1_i$ a constante de calibração 1 da banda "i", $L\lambda$ a radiância espectral do sensor ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) e 273,15 o fator de conversão da temperatura absoluta (K) para graus Celcius ($^{\circ}C$).

A emissividade da superfície para as bandas 10 e 11 foi estimada pela Equação 9.

$$LSE = \varepsilon_s(1 - FVC) + \varepsilon_v * FVC \quad [9]$$

em que ε_s e ε_v são as emissividades do solo e da vegetação para as bandas 10 ($\varepsilon_s = 0,971$; $\varepsilon_v = 0,987$) e 11 ($\varepsilon_s = 0,977$; $\varepsilon_v = 0,989$).

O fator de cobertura do solo (FVC) foi estimado para cada pixel das janelas utilizadas na correlação entre a temperatura de superfície e a temperatura foliar:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \quad [10]$$

onde NDVI é o índice do pixel alvo no talhão de cana-de-açúcar, $NDVI_S$ o índice em área de solo exposto e $NDVI_V$ o índice em área de vegetação em área de mata adjacente ao talhão avaliado.

As bandas 4 e 5 do sensor OLI foram utilizadas para determinação do NDVI para os pixels de cana-de-açúcar, solo e vegetação. A determinação da média e diferença entre as emissividades foram obtidas pelas Equações 11 e 12.

$$\varepsilon = \frac{(LSE_{10} - LSE_{11})}{2} \quad [11]$$

$$\Delta\varepsilon = LSE_{10} - LSE_{11} \quad [12]$$

em que ε é a média entre as emissividades de superfície das bandas 10 e 11 do sensor TIRS, $\Delta\varepsilon$ a diferença entre as emissividades, LSE_{10} a emissividade de superfície da banda 10 e LSE_{11} a emissividade de superfície da banda 11.

A estimativa do conteúdo de vapor de água na atmosfera (w , g cm^{-2}) foi obtida pela equação de Leckner (Iqbal, 1983):

$$w = 0,493 \cdot UR \cdot \frac{e_s}{T_{ar}} \quad [13]$$

onde UR é a umidade relativa do ar, e_s a pressão do vapor na saturação (kPa) e T_{ar} a temperatura média do ar ($^{\circ}C$).

4.2.1 ESTATÍSTICA EXPERIMENTAL

Foram realizadas análises de regressões e ainda, para avaliar a relação entre as temperaturas de brilho do sensor, a LST e a temperatura foliar utilizou-se o erro relativo:

$$ER\% = \frac{T_{sS} - T_c}{T_c} \cdot 100 \quad [14]$$

em que ER% é o erro relativo, T_s a temperatura de brilho das bandas 10 e 11 e a LST e T_c a temperatura foliar.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observaram-se tendências distintas entre a temperatura de superfície (LST), temperaturas de brilho (TB10 e TB11) e temperatura foliar (T_c), tanto a TB10 quanto a TB11 apresentaram valores menores em relação à T_c durante todo o período de avaliação (Figura 4.3.1a). Observou-se que T_c esteve abaixo da de T_{ar} até maio/2014 (410 DAP), e a partir deste momento, ocorre um aumento da T_c em relação a T_{ar} , o que resultou em

valores maiores que 35°C em julho/2014 (474 DAP) (Figura 4.3.1b), a data caracteriza-se pelo final do ciclo da cana-planta e pela acentuação do déficit hídrico na região do Cerrado. Por outro lado, a LST esteve próxima à Tc até junho/2014 (426 DAP), com erro relativo (ER%) inferior a 10% (Figura 4.3.1c). O erro relativo (ER%) entre TB10, TB11 e LST, em relação à Tc mostram que a aplicação da LST diminui a diferença entre o dado obtido via imagem termal e a temperatura foliar medida em campo, entretanto, para algumas datas, ainda apresenta um ER% alto ($\approx 20\%$), principalmente no período em que a Tc foi maior que a Tar, indicando o momento de estresse da cultura (Figura 4.3.1b).

Em relação aos diferenciais entre as temperaturas foliar e do ar (Tc-Ta) e de superfície com a do ar (TB10-Ta, TB11-Ta, e LST-Ta) (Figura 4.3.1d), observa-se que a aplicação da LST-Ta apresentou tendência mais próxima à Tc-Ta, principalmente nos períodos de baixa temperatura foliar que indicaram momentos sem ocorrência de estresse hídrico. Fato comprovado pelos baixos erros relativos observados entre a LST e a Tc nesse período. Já no final do período de avaliação onde se observa um aumento do diferencial Tc-Ta, a LST aparentemente não obteve o mesmo desempenho observado anteriormente. Entretanto, com base na análise do erro relativo a LST ainda se apresenta mais próxima à Tc em relação as temperaturas de brilho das bandas 10 e 11 do satélite Landsat-8.

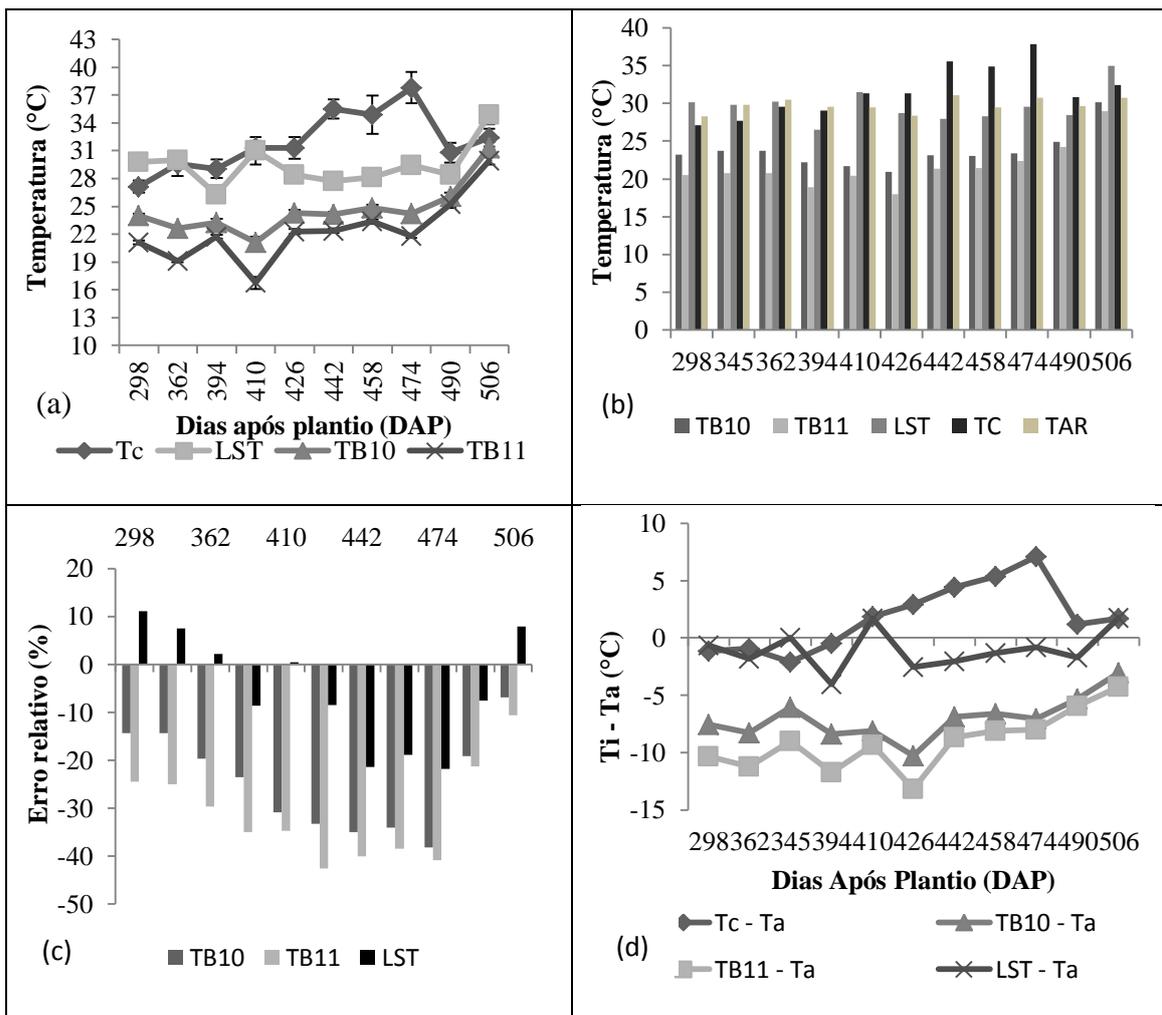


Figura 4.3.1. Variação temporal da temperatura foliar da cana-de-açúcar (Tc), temperatura de superfície (LST), temperatura de brilho da banda 10 (TB10) e banda 11 (TB11) (A), diferencial entre as diferentes temperaturas e o ar (B), relação entre os valores médios de temperaturas foliar, obtidas por imagem e a temperatura do ar (C) e erro relativo (ER%) entre TB10, TB11 e LST, em relação à temperatura foliar, para o período de 298 a 506 dias após o plantio (DAP), correspondente a fase de crescimento de colmos e maturação da cana-de-açúcar, em Santo Antônio de Goiás-GO.

A incidência de nuvens entre os meses de fevereiro e março impediram a aquisição de imagens nos talhões. Tal fato pode ser comprovado pela análise da Figura 4.3.2. que mostra as características atmosféricas de Santo Antônio de Goiás – GO a partir da razão de insolação. Quando n/N tende a zero, demonstra-se uma situação de elevada nebulosidade ou número de horas de brilho solar igual a zero, e quando n/N tende a 1, ocorre ausência total de nuvens ou máximo de horas de brilho solar.

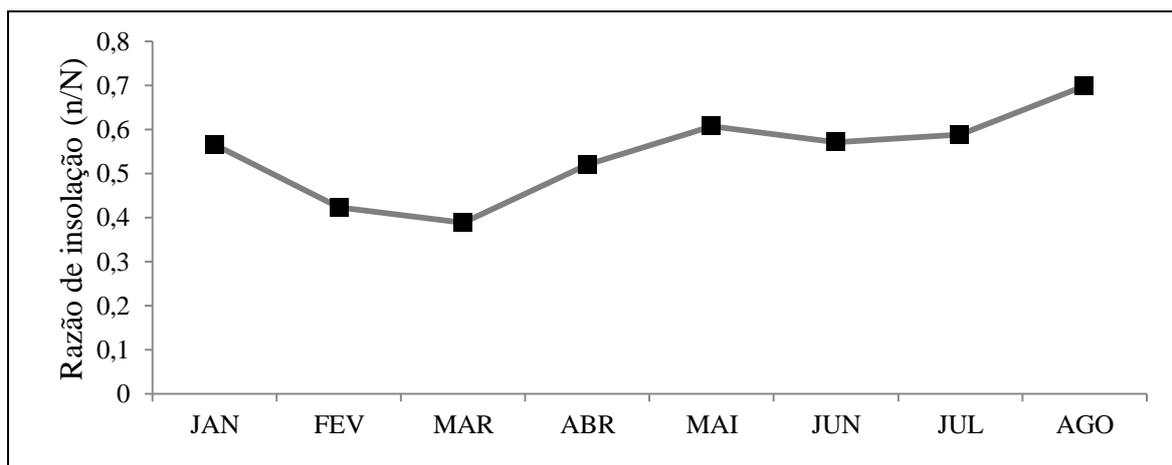


Figura 4.3.2 Evolução temporal da razão de insolação (a) em Santo Antônio de Goiás-GO no ano de 2014.

A análise de regressão entre LST e Tc mostrou uma alta dispersão dos dados que, com $R^2 < 0,50$ (Figura 4.3.3), evidenciando pouca eficiência no método de LST para a estimativa de uma temperatura foliar. Entretanto, alguns aspectos podem ser discutidos para explicar estes resultados, dentre os quais se destaca a quantidade e a forma de efetuar a leitura da temperatura foliar no campo. A quantidade de leituras por janela de três pixels pode ter sido insuficiente para estabelecer uma melhor associação entre a Tc e a LST, uma vez que a LST é obtida de um valor que representa a área de um pixel (900 m²), já a temperatura foliar foi obtida em quatro pontos em 900 m², o que para esse caso pode ser insuficiente na representação da variação média da temperatura foliar na área de um pixel. A instalação de sensores infravermelhos no topo do dossel com automação das leituras é uma forma de mitigar os eventuais erros que podem ocorrer quando da utilização da leitura manual da temperatura. Sepulcre-Cantó et al. (2006) utilizaram sensores infravermelhos calibrados e instalados a 1m do topo da copa de oliveiras na região de Córdoba – Espanha em comparação com a temperatura de superfície obtida por sensores instalados a bordo de avião em sobrevôo a 1 km de altura. Na comparação entre 300 leituras a cada 5 min no topo do dossel com 3 imagens remotas obtidas as 07:30, 9:30 e 12:30 GMT os autores encontraram correlações (R^2) de 0,5, 0,45 e 0,57 respectivamente.

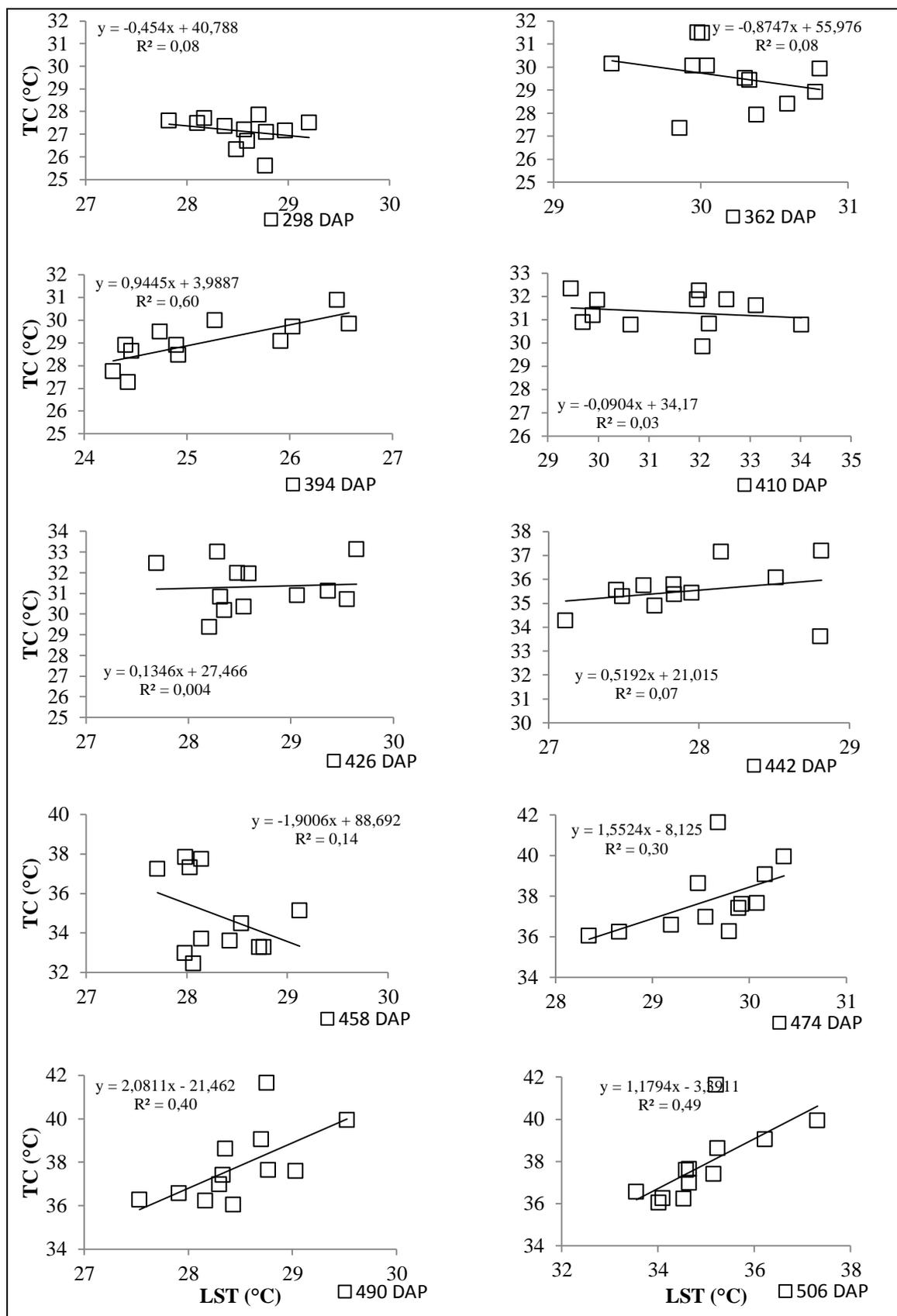


Figura 4.3.3. Relação entre a temperatura de superfície (LST) e a temperatura foliar (TC) nas imagens Landsat-8 adquiridas entre 298 e 506 dias após o plantio (DAP).

Embora não se tenha verificado uma alta correlação entre a temperatura de superfície e a temperatura foliar, as diferenças Tc-Tar obtidas tanto de forma direta (foliar) quanto indireta (temperatura de superfície) identificaram os momentos de déficit hídrico da cultura de cana-de-açúcar. A relação entre os valores médios do diferencial Tc-Tar com a evapotranspiração da cultura (ETc) (Figura 4.3.4a), precipitação acumulada entre as avaliações (P) (Figura 4.3.4b), balanço hídrico (Figura 4.3.4c) e índice de área foliar (IAF) (Figura 4.3.4c), evidencia que o aumento da temperatura foliar e consequentemente de Tc-Tar foi capaz de indicar um estresse hídrico gradual em função da diminuição dos valores das variáveis indicadoras de disponibilidade hídrica (ETc, IAF, BH e IAF).

Durante o período em que a ETc esteve acima de 6 mm dia^{-1} os valores de Tc-Tar permaneceram em patamares negativos, indicando que entre 298 e 410 DAP a cultura teve maior transpiração com consequente resfriamento das folhas (Figura 4.3.4a). A maior ETc observada nesse período esteve associada à uma boa disponibilidade hídrica, o que foi demonstrado pela precipitação acumulada entre as avaliações realizadas no campo e pela lâmina de excedente hídrico determinada pelo balanço hídrico climatológico (Figuras 4.3.4b e 4.3.4c). Outro fator que corrobora a transpiração sem restrição hídrica no período em que Tc-Tar é negativo é o valor observado de IAF, que com valores próximos de 5 indicaram uma alta superfície foliar que em momentos de deficiência hídrica é um dos primeiros indicadores a mostrar a ocorrência de estresse (Inman-Bamber, 2005). O menor valor observado de Tc-Tar (-2°C) ocorreu no mês de fevereiro/14 aos 313 DAP que de acordo com a escala fenológica já era considerado o período considerado de maturação, paralelamente à isso ocorreu uma ETc de 7 mm dia^{-1} e IAF de 4,8. Os valores de Tc-Tar permaneceram negativos até o mês de maio/14, aos 394 DAP. Com a alteração dos indicadores de disponibilidade hídrica, representados pela diminuição da precipitação e aumento da lâmina de déficit hídrico, foi observada uma tendência de diminuição do IAF, e consequentemente da ETc. Nessa situação os valores de Tc-Tar apresentaram tendência de aumento, atingindo valores positivos a partir do final de maio/14 aos 410 DAP. Na região do Cerrado, o mês de maio e os subseqüentes são caracterizados pelo cessar das precipitações e ocorrência de déficit hídrico, fatos estes observados pela precipitação acumulada e balanço hídrico neste período. Além da baixa disponibilidade hídrica o aumento de Tc-Tar também esteve associado à uma drástica diminuição da superfície transpirante, representada pela queda do IAF, entretanto, o período de ocorrência do estresse hídrico detectado pela temperatura foliar ocorreu na fase de maturação, o que para

a cultura é bem vindo, uma vez que a ocorrência do estresse favorece o acúmulo de sacarose nos colmos melhorando a qualidade industrial da cana-de-açúcar. O maior valor de Tc-Tar de 7,11 °C foi observado no mês de julho/14 aos 474 DAP, com uma ETc de 4,2 mm dia⁻¹, IAF de 2,5 e uma lâmina de déficit de 23 mm, acumulada a partir da avaliação anterior aos 458 DAP.

Pincelli & Silva (2012) estudaram alterações morfológicas foliares (NFV e área foliar) em quatro cultivares (SP81-3250, SP83-2847, RB855453 e RB72454) submetidas ao déficit hídrico a partir de 84 DAP com manutenção da umidade do solo em 50% da capacidade de campo. Ao comparar os cultivares cultivados sem restrição hídrica com os submetidos ao estresse, os autores observaram diferenças significativas de NFV e área foliar em todos os cultivares a partir de 28 dias de aplicação do déficit hídrico. Com base nos resultados os autores afirmam que esta característica pode ser um indicativo de estresse, devido a interdependência entre as variáveis, pois as cultivares de cana-de-açúcar com maior número de folhas verdes possuem maior área foliar. Além disso, a redução da área foliar em situações de déficit hídrico causa a diminuição da interceptação da radiação solar, o que leva à queda da transpiração e da fotossíntese, além de senescência foliar precoce.

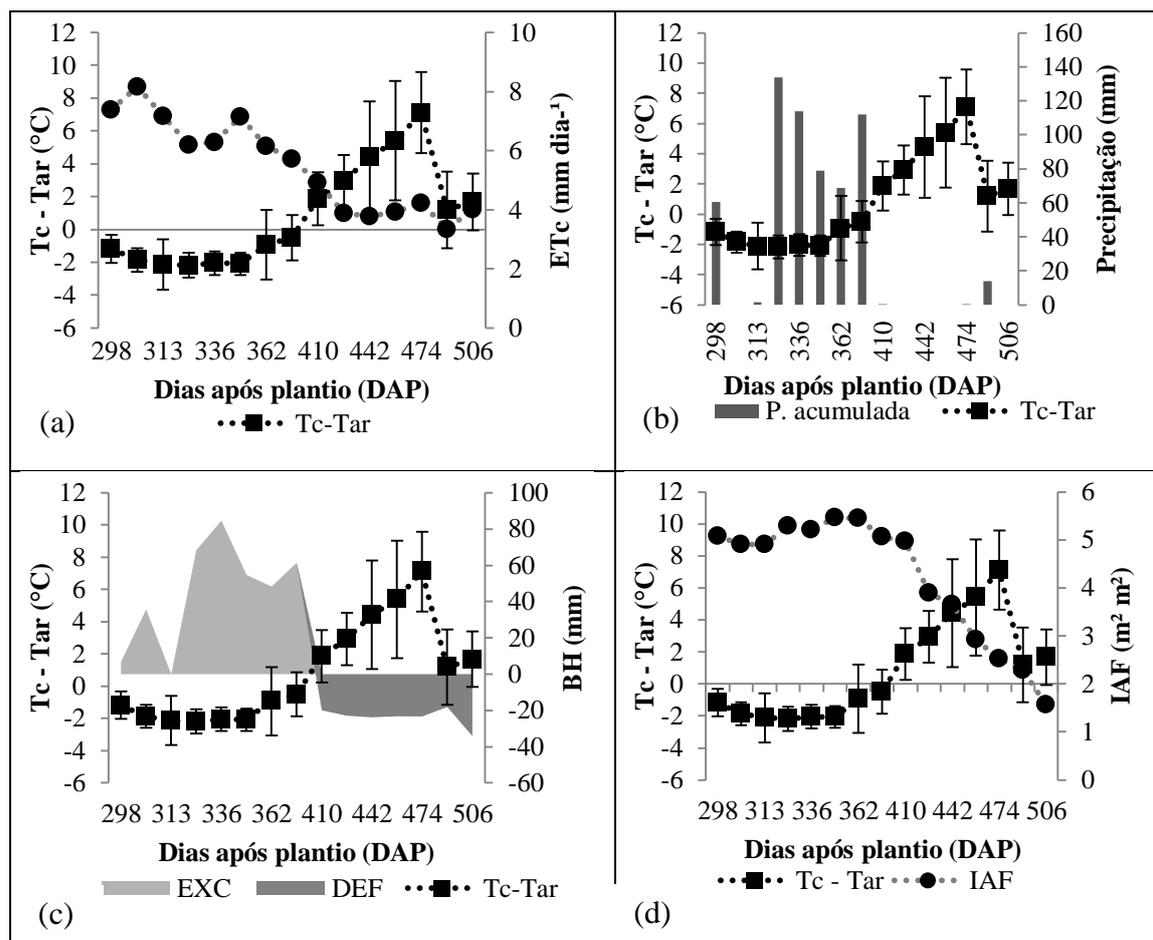


Figura 4.3.4. Diferencial entre a temperatura foliar e a do ar medida às 13:00 h (Tc-Tar) e sua relação com a evapotranspiração da cultura (a), precipitação acumulada entre as avaliações (b), balanço hídrico (c) e o índice de área foliar (d) entre 298 e 506 dias após o plantio em talhões cultivados com cana-de-açúcar no município de Santo Antônio de Goiás – GO na safra 2013/14.

Durante o período de avaliação da temperatura foliar, o diferencial LST-Tar apresentou tendências que variaram em função dos fatores de disponibilidade hídrica e da cultura (Figura 4.3.5), entretanto seus valores médios mostram que para que a informação da LST represente o estresse hídrico da cultura é necessário algumas considerações. A partir da análise dos valores médios de LST-Tar é possível observar que a LST indicou apenas dois momentos de estresse hídrico da cultura com valores positivos em maio/14 aos 410 DAP e agosto/14 aos 506 DAP. Ao comparar com o diferencial Tc-Tar observado no campo (Figura 4.3.4) fica evidente a discrepância entre o dado observado e o estimado por imagem de satélite. Entretanto, ao observar a tendência do comportamento da LST é possível verificar que em momentos de boa disponibilidade hídrica o diferencial LST-Tar

se torna mais negativo, e com os indicadores climáticos e de cultura indicando déficit hídrico, observa-se uma tendência de aproximação à valores positivos no diferencial LST-Tar. Na última estimativa de LST, realizada aos 506 DAP em um momento em que a cultura apresentava um IAF de 1,56, ETc de 4,0 mm dia⁻¹ e um déficit hídrico de 165 mm acumulado desde maio/14, o diferencial LST-Tar apresentou um valor de aproximadamente 2°C que foi superior em relação à avaliação anterior aos 490 DAP que obteve um diferencial de -1,7°C situado fora da tendência de aumento da LST-Tar que vinha sendo observada a partir de 426 DAP, o que pode ter ocorrido em função de uma precipitação de 14 mm próxima a data de passagem do satélite Landsat-8 aos 490 DAP.

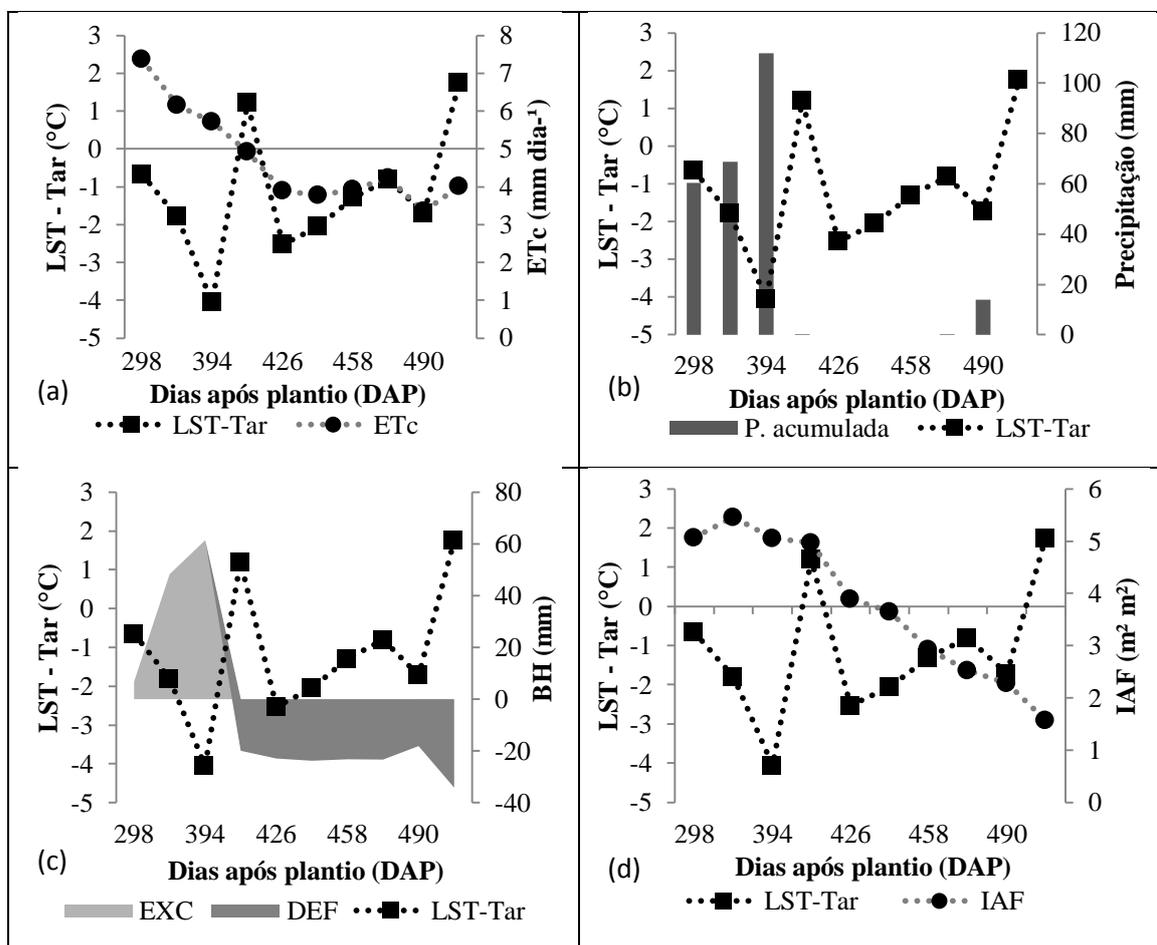


Figura 4.3.5 Diferencial entre a temperatura de superfície e a do ar medida às 13:00 h (LST-Tar) e sua relação com a evapotranspiração da cultura (A), precipitação acumulada entre as aquisições de imagens (B), balanço hídrico (C) e o índice de área foliar (D) entre 298 e 506 dias após o plantio em talhões de cana-de-açúcar no município de Santo Antônio de Goiás - GO.

Corroborando a análise de temperatura foliar como indicativo de estresse hídrico, a análise das taxas de crescimento da cana-de-açúcar evidencia os momentos em que a cultura, em resposta ao déficit hídrico diminui seu crescimento e conseqüentemente, suas taxas (Figura 4.3.6). A partir da Figura 4.3.6a se observa que a taxa de crescimento de ALT foi acentuada até 340 DAP ou 1095 GD, além disso, o período dispunha de uma boa disponibilidade hídrica, quantificada pelo excedente de aproximadamente 80 mm. A partir dos 360 DAP, de acordo com a escala fenológica, a cultura inicia o estágio de maturação e ainda com a ocorrência de excedente hídrico observa-se uma diminuição das taxas de ALT, porém ainda positivas até 1300 GD e estabiliza-se por volta de 440 DAP e 1400 GD – exigência térmica dentro da faixa 1200 GD, a 1800 GD conforme Liu et al. (1999), no período subsequente até 1520 GD constata-se um déficit hídrico acumulado de 77 mm, aliado ao avanço do período de maturação e aproximação da colheita que inicia-se por volta de 506 DAP.

A taxa de expansão foliar é quantificada pela variação das taxas de NFV e IAF (Figuras 4.3.6b e 4.3.6c), nas quais o comportamento também se mostra relacionado à disponibilidade hídrica, acúmulo de graus dia e estágio fenológico da cana-de-açúcar. No período de excedente hídrico (298 a 394 DAP) as taxas de NFV permanecem estáveis, com variações positivas, enquanto que o IAF apresenta maior variabilidade, o que demonstra que nesse período o aumento da área foliar individual se deu de forma mais intensa do que o aumento do número de folhas, tal constatação confirma-se pela análise dos desvios de IAF, que demonstram a variabilidade da expansão foliar no período de estabilização do NFV.

Relacionando as taxas de ALT, IAF e NFV no período de excedente hídrico e com acúmulo de 1300 GD, é possível constatar que a fase final de crescimento das plantas esteve mais relacionada ao aumento da área foliar individual do que em função do aumento do número de folhas verdes por colmo. Comportamento semelhante ao encontrado por Almeida et al. (2008), que estudaram o desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, variedades RB92579, RB931530 e RB93509 na região de Rio Largo - AL e observaram que o crescimento de plantas mostrou-se rápido e linear no período de excedente hídrico de aproximadamente 100 mm e entre 750 e 1500 GD na cana-planta, no qual o IAF aumentou de forma continuada até 3,5, período que resultou em 70% do crescimento total da cana alcançando estatura média de 1,70m onde a alongação do colmo coincidiu com o aumento da área foliar. No início do período de déficit hídrico ainda

observam-se taxas médias positivas de ALT, entretanto os valores de NFV e IAF já se encontram em declínio, demonstrado pelas respectivas taxas negativas das duas variáveis. Tal fato pode ser confirmado pela tendência de redução do TRA (Figura 4.3.6d) que ocorre paralelamente em resposta ao déficit hídrico no início da ocorrência de taxas negativas de NFV e IAF. As plantas submetidas ao déficit hídrico inicialmente reduzem o turgor celular, responsável pelo alongamento das células que promovem a expansão foliar (Smith, 2005).

Em uma segunda análise do TRA, é possível observar que sua variação mostra um declínio ao longo do período analisado (298 a 506 DAP), sendo a maior média registrada aos 298 DAP (55,43%) e a menor aos 506 DAP (36,83%) indicando uma redução de 18,6% entre o início e final das avaliações (Figura 4.3.6d), o que pode ser explicado devido ao horário de obtenção dos dados (16:00 h), em que as plantas passaram por um período de desidratação, não tendo tempo para se reidratar. Entretanto, os valores encontrados ao final do período de déficit hídrico se assemelham aos observados por Graça et al. (2010), que ao avaliarem o TRA em ambiente protegido nas cultivares tolerantes (SP83-2847 e CTC15) e sensível (SP86-155), verificaram que a partir de dez dias de suspensão das irrigações as reduções do TRA foram de 61,04% (SP83-2847), 69,33% (CTC15) e de 58,52% (SP86-155), o que resultou em valores de TRA de aproximadamente 40, 20 e 60% respectivamente.

Os resultados diferem dos encontrados por Silva et al. (2007) que avaliaram, dentre outras variáveis, o TRA na seleção de oito genótipos de cana-de-açúcar tolerantes à seca na região do Texas (USA). Nos genótipos cultivados em condição de campo, o tratamento com déficit hídrico consistiu no acompanhamento da depleção de 80% na umidade do solo a partir de 150 DAP. Os horários de obtenção do TRA variaram entre 09:00 e 15:00 em 0, 45 e 90 dias após a suspensão da irrigação aos 150 DAP, no período de intenso crescimento de colmos. Após 90 dias de aplicação de déficit hídrico os autores observaram valores de TRA entre 65,77 e 80,22% nos genótipos considerados susceptíveis ao estresse hídrico e entre 82,95 e 86,18% nos genótipos tolerantes à seca.

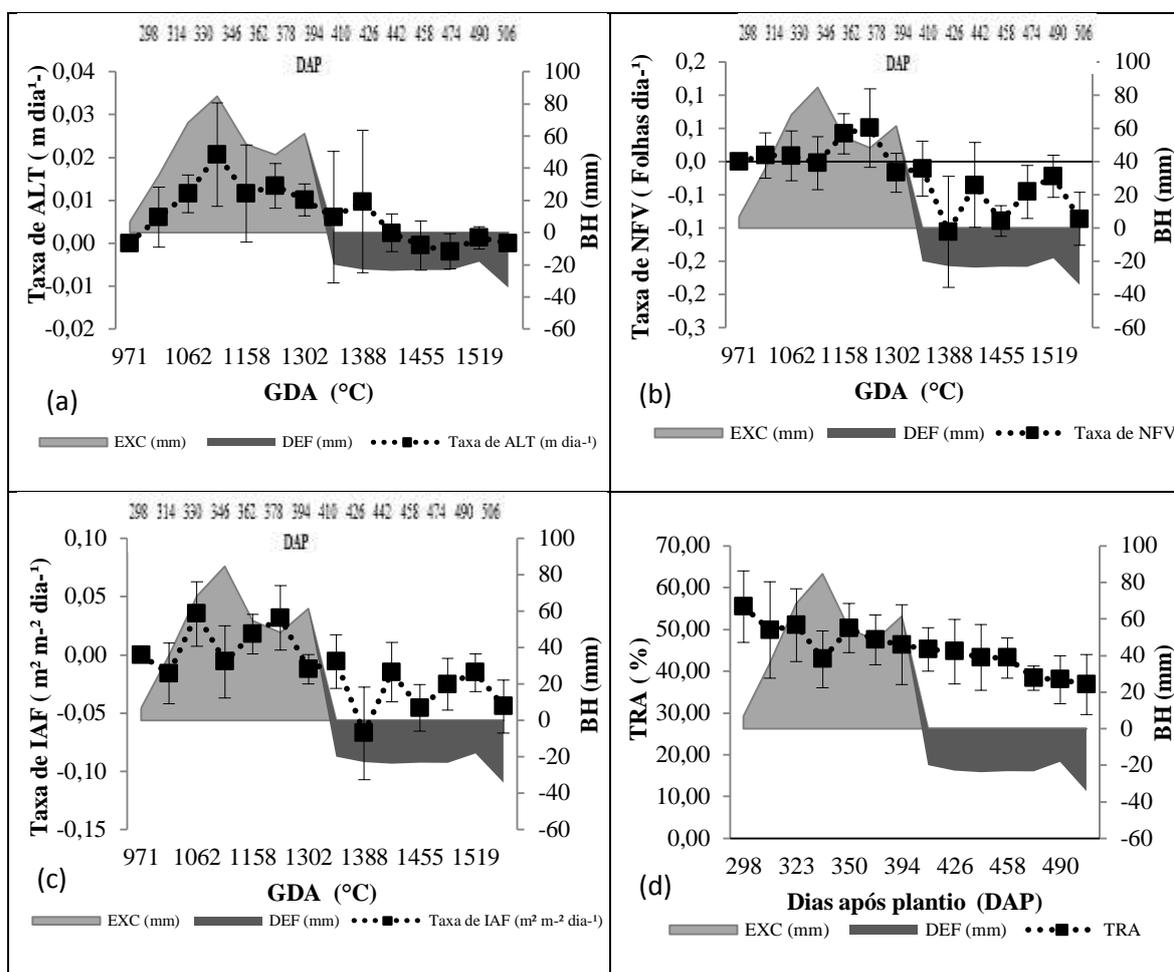


Figura 4.3.6 Taxas de crescimento de altura de plantas (a), número de folhas verdes (b), índice de área foliar (c) e teor relativo de água (d) em função do balanço hídrico e acúmulo de graus dias entre 298 e 506 dias após o plantio da cana-de-açúcar em ciclo de cana-planta em Santo Antônio de Goiás – GO na safra 2013/14.

Os dados diários de temperaturas máxima, mínima e mensais de precipitação na safra 2013/2014 são apresentados na Figura 4.5. Até os dois meses após o plantio, entre abril e junho/2013 houve precipitação de 116,6 mm, a partir de julho a ausência de chuvas foi acompanhada por baixas temperaturas mínimas com valores abaixo de 18°C até o mês de setembro, onde com o início da estação chuvosa as temperaturas foram levadas para acima de 18°C. A temperatura máxima e mínima diária do ar durante o ciclo de produção variou em um intervalo entre 6,6°C e 36°C. No período vegetativo as

temperaturas estiveram, na maior parte do tempo entre os limiares de 18 e 35°C, indicando condição favorável para o crescimento da cultura. Os valores abaixo de 18°C ocorreram entre os meses de abril e agosto de 2013 e 2014. Os dois períodos são marcados pelas fases de estabelecimento e maturação, respectivamente.

A cana de ano-e-meio (18 meses), plantada de janeiro ao início de abril, tem uma taxa de crescimento restrita, nula, ou mesmo negativa, em função das condições climáticas de maio a setembro; havendo boas condições de precipitação, a fase de maior desenvolvimento da cultura se processa de outubro a abril, com pico máximo de crescimento, de dezembro a abril (Casagrande, 1991). Os resultados indicam que a temperatura do ar na região estudada, permaneceu na fase de crescimento, na maior parte do tempo, na faixa ótima para o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar (Figura 4.5), que na fase de crescimento tem exigências de um tempo quente e úmido, com temperaturas variando entre 19 e 32°C (Marin, 2007).

A evapotranspiração potencial da cultura variou entre 1,01 e 5,23 mm dia⁻¹, com média de 2,65 mm dia⁻¹, totalizando 1338,73 mm durante o mesmo período (Figuras 4.3.7b e 4.3.7c). Apesar de a precipitação total ter sido superior à evapotranspiração potencial da cultura, a má distribuição pluviométrica resultou em períodos de deficiência hídrica. Entre os meses de abril e junho de 2013 ocorreu excedente hídrico de 50 mm concentrado no mês de abril e posteriormente, até o final do mês de junho um déficit hídrico acumulado de 40 mm e no mesmo período a ETc acumulada foi de 110,52 mm (média de 1,23 mm dia⁻¹). Em seguida, no mês de julho, o déficit hídrico acentua-se com uma lâmina de déficit acumulada de 135 mm no final de setembro/13 e a ETc nesse período foi de 255 mm (média de 2,83 mm dia⁻¹). Após o término da estação chuvosa, um novo período de deficiência hídrica é observado no final do ciclo de produção, já na fase de maturação, entre os meses de maio e agosto de 2014, onde o déficit acumulado foi de 145 mm e a ETc nesse período foi de 223,27 mm (média de 1,86 mm dia⁻¹). Entretanto, a deficiência hídrica nessa fase é recomendada, pois contribui no acúmulo de sacarose nos colmos.

Ainda, analisando a Figura 4.3.7 observa-se que o excedente hídrico durante a fase de brotação e estabelecimento da cultura foi de 50 mm em 30 dias, logo após, na fase de perfilhamento verifica-se ocorrência de déficit hídrico totalizando 94,40 mm no período de perfilhamento da cultura.

Na fase de crescimento dos colmos, com o início da estação chuvosa a precipitação acumulada foi de 1475,20 mm, resultando em um excedente hídrico de 663,01 mm. Esse período concentrou 85,0% da precipitação total durante o ciclo de produção. Os resultados mostram que a precipitação durante a fase de crescimento de colmos esteve próxima ao total recomendado para um crescimento favorável, pois segundo Doorenbos & Kassam (1979), dependendo do clima, requerimentos de água de 1500 a 2500 mm são exigidos ao longo do ciclo vegetativo da cana-de-açúcar, principalmente, nos estádios fenológicos de crescimento. Rodrigues (1995) afirma que a fase de desenvolvimento mais acentuado da cana de ano e meio inicia-se com a retomada das precipitações regulares, aumento da intensidade luminosa e também da temperatura, e que na região Centro-Sul, ocorre de outubro a abril, com pico de crescimento entre dezembro e abril.

O período de maturação da cana-de-açúcar teve baixa precipitação (53,80 mm) e um déficit hídrico de 227,49 mm propiciando uma condição favorável à maturação da cana-de-açúcar. Gheller (2001) afirma que as condições propícias para a maturação da cana-de-açúcar se resumem na somatória de quedas gradativas de temperatura aliadas à redução e interrupção da precipitação que retardam e/ou inibem o desenvolvimento vegetativo da planta, enquanto que o processo de fotossíntese continua ocorrendo normalmente, com a produção de sacarose, a qual é transportada e armazenada no vacúolo das células parenquimáticas nos entrenós do colmo. Com a redução da umidade no solo, o teor de água nos tecidos da planta diminui, e a desidratação força a conversão de açúcares redutores em sacarose. Além disso, a ocorrência de chuvas durante o período de colheita prejudica o planejamento operacional das usinas de cana-de-açúcar, uma vez que o corte, o carregamento e o transporte são afetados. Sendo que durante os períodos em que o tráfego de máquinas é intenso sobre o canavial, o excesso de umidade favorece a compactação do solo, afetando a produtividade da safra seguinte (Marin et al., 2008).

Singh et al. (2007), em solo arenoso, observaram uma média total de ETc da cana-de-açúcar em 1.362 e 1.161 mm ano⁻¹ em estágio de cana-planta e cana-soca, respectivamente. Na Tailândia, estudos mostraram que a ETc da cana-de-açúcar varia, em média, de 3,7 a 4,2 mm dia⁻¹. (qual variedade? Em que quantidade de água no solo?) (Moroizumi et al., 2009). Entretanto, na Austrália e Suazilândia (África), utilizando o método da razão de Bowen, alguns autores encontraram ETc máxima de 8,0 e 7,0 mm dia⁻¹, respectivamente, e em medidas lisimétricas 6,8 mm dia⁻¹, na Austrália (Inman-Bamber & Smith, 2005).

O requerimento hídrico, medido pela evapotranspiração potencial da cultura (ETc) da cana-de-açúcar irrigada, na região semiárida do submédio do Vale do São Francisco, correspondentes à fase de brotação e estabelecimento foi de $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$, no perfilhamento $3,8 \text{ mm dia}^{-1}$, e na fase de crescimento máximo $5,1 \text{ mm dia}^{-1}$, totalizando respectivamente 50, 299 e 1211 mm. Na fase de maturação, com a suspensão da irrigação, a ETc acumulada foi de 147 mm. Assim, observou-se um total de ETc igual a 1710 mm, durante todo o ciclo de produção (Silva et al., 2012).

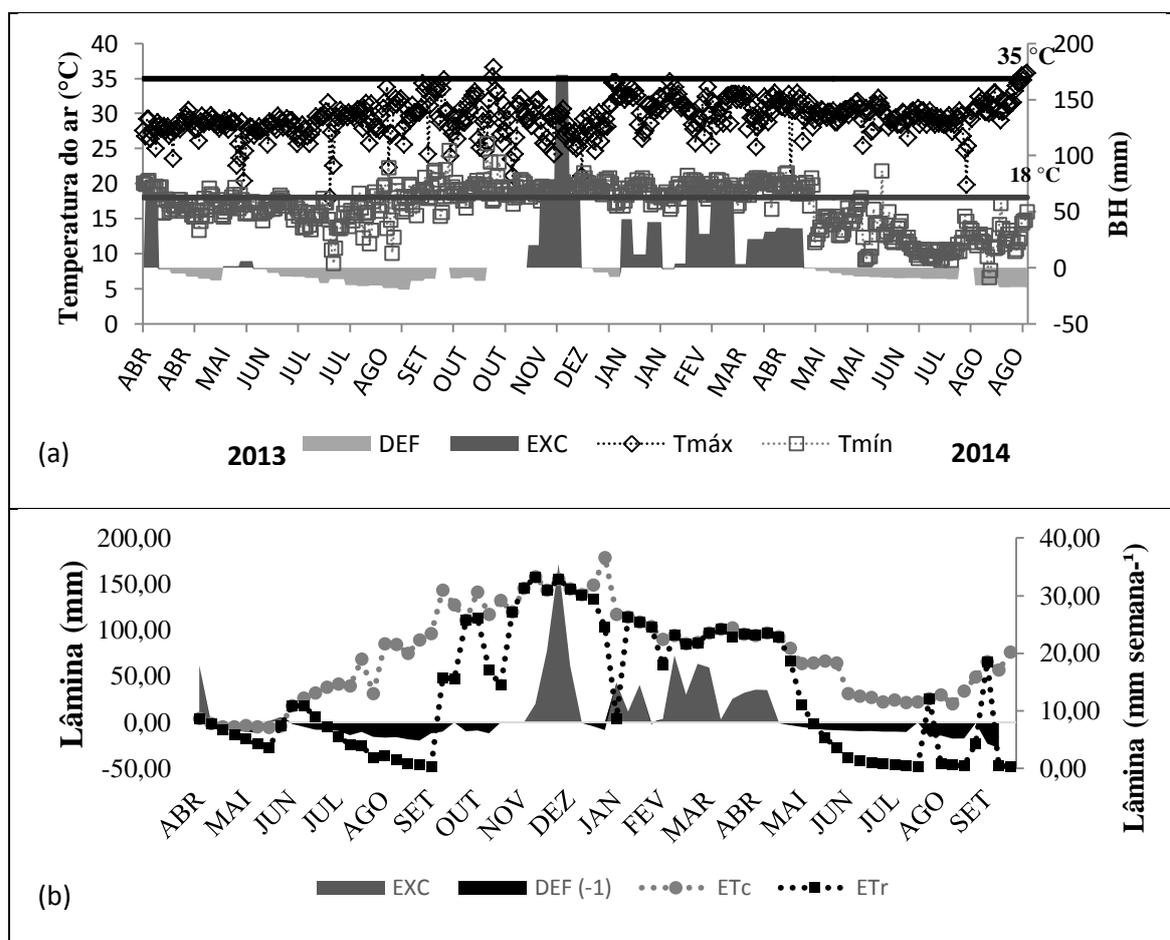


Figura 4.3.7. Temperatura do ar, máxima diária (Tmáx) e mínima diária (Tmín) (a), evapotranspiração real e potencial da cana-de-açúcar (b) em relação ao balanço hídrico climatológico no período entre Abril de 2013 e Setembro de 2014 na região de Santo Antônio de Goiás - GO.

Foram encontradas variações de IAF e suas taxas de IAF em função do balanço hídrico climatológico (Figuras 4.3.8a e 4.3.8b). Devido à presença de nuvens sobre a área de estudo, não foi possível a obtenção de dados de IAF estimados a partir de

imagens de satélite, para os meses de novembro e dezembro de 2013, e fevereiro e março de 2014. Observou-se um aumento do IAF entre abril e maio de 2013, apresentando taxas médias de $0,028 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, sendo estes meses caracterizados pelo plantio e fase inicial da cultura, onde determinou-se uma lâmina de déficit hídrico de aproximadamente 12 mm. Após isto, houve uma pequena lâmina de excedente hídrico (16,5 mm), no qual registraram-se taxas médias de $0,033 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, para o mês de junho/2013 (90 DAP), na fase de perfilhamento. Após este período observou-se um diminuição da taxa de crescimento do IAF para $0,009 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em agosto/2013 (138 DAP) já na fase de crescimento de colmos, essa redução foi acompanhada de uma lâmina de déficit de 165,62 mm acumulada no final do mês de setembro/2013 (154 DAP). Entre a aquisição da imagem de agosto/2013 e outubro de 2013 foi observado um novo aumento da taxa de expansão do IAF, partindo de uma retração de $-0,01 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em setembro/2013 para uma expansão de $0,024 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em outubro/2013. Entre esses meses ocorreu uma lâmina de excedente hídrico de aproximadamente 150 mm. Plantas em estresse hídrico podem sofrer alterações na fotossíntese ocasionando uma severa redução na síntese de carboidratos e na expansão foliar, porém, no momento em que ocorre a reposição de água, ela retoma imediatamente o crescimento em ritmo constante (Batista, 2013). Durante a estação chuvosa observou-se uma taxa de expansão do IAF de $0,018 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ entre os meses de outubro/2013 e janeiro/2014, onde, segundo a escala fenológica representou a fase de intenso crescimento de colmos, a qual foi favorecida pelo excedente hídrico de 372,97 mm. A partir de janeiro de 2014, com a diminuição da precipitação e final da fase de crescimento de colmos observou-se um decréscimo do IAF à uma taxa de $-0,006 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em maio/2014 (394 DAP), período este que já compreendia a fase de maturação da cana-de-açúcar. O decréscimo do IAF a partir desse período pode estar relacionado à fase de maturação e a ocorrência de um novo período de deficiência hídrica, onde, a partir de junho/2014 (426 DAP) constatou-se uma redução do IAF a uma taxa de $-0,009 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ chegando à $-0,039 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em agosto/2014 (506 DAP).

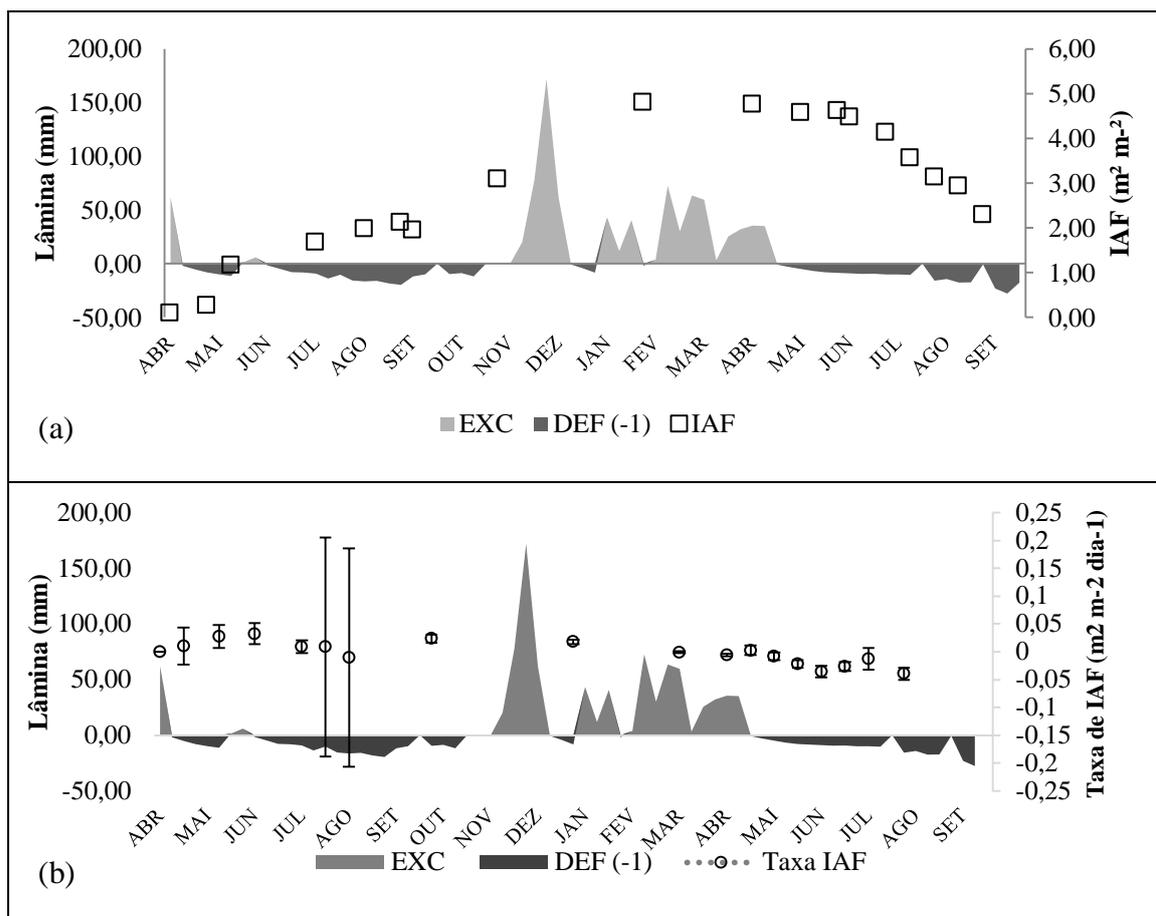


Figura 4.3.8. Taxa de expansão e decréscimo do-2 IAF (a), análise temporal do IAF estimado pelo NDVI durante o ciclo de crescimento da cana-de-açúcar em função do balanço hídrico (b).

A variação do diferencial entre a temperatura de superfície (LST, bandas 10 e 11) e a temperatura máxima do ar ($T_{\text{máx}}$) podem ser visualizadas na Figura 4.3.9. Esta diferença ($T_s - T_{\text{ar}}$) foi relacionada à variação da lâmina de déficit hídrico acumulada entre as datas de aquisição das imagens durante o ciclo de produção da cana-planta.

Assim, observou-se que a utilização da LST na estimativa da temperatura do dossel da cana-de-açúcar permitiu identificar diferenças positivas nos períodos de ocorrência de déficit hídrico até os 202 DAP. A partir do início do período de excedente hídrico, onde a lâmina de déficit é nula (202 a 362 DAP), o diferencial LST - $T_{\text{máx}}$ diminui até atingir valores negativos no período que também é caracterizado pelo intenso crescimento da cultura. Ao se analisar, no mesmo período (26 a 362 DAP), o diferencial aplicado às temperaturas de brilho das bandas 10 ($T_{b10} - T_{\text{máx}}$) e banda 11 ($T_{b11} - T_{\text{máx}}$), é possível observar que apesar de apresentarem valores maiores no período de déficit

hídrico, não se observa patamares positivos, o que indica que a utilização isolada das bandas sem aplicação de correções não é suficiente para indicar momentos de estresse hídrico na cana-de-açúcar no período que compreende as fases iniciais (brotação, perfilhamento) até o final da fase vegetativa. Para todas as estimativas de T_s O aumento do diferencial T_s - $T_{máx}$ ocorre novamente quando se inicia o período de déficit hídrico, já na fase de maturação da cana-de-açúcar (394 DAP). Jackson 1985 afirma que um solo seco exposto pode ter ao meio dia uma temperatura de até 20°C superior em relação à temperatura do ar e de 30°C em relação à um dossel sem estresse hídrico. O horário de aquisição das imagens sobre a área de estudo, por volta das 13:00 h, pode, para o primeiro período de déficit hídrico (26 a 154 DAP) ter recebido influência das altas temperaturas do solo exposto, uma vez que até o início da fase de intenso crescimento, favorecida pelo excedente hídrico, a cobertura do dossel ainda não atinge 100%. Tal afirmação pode ser confirmada no segundo período de déficit hídrico, a partir de 394 DAP, onde se observa uma nova tendência de aumento dos diferenciais T_s - $T_{máx}$. Nessa fase T_s - $T_{máx}$ aumenta, mas não alcança os valores das fases iniciais da cultura, o que pode ser atribuído pelo fato de que a composição da leitura remota de temperatura é feita basicamente por constituintes vegetais (folhas verdes, em senescência e palhada), diferentemente das fases iniciais onde o solo exerce maior influência na composição do pixel da imagem de temperatura.

É importante ressaltar que a LST utiliza em seu algoritmo a estimativa de temperatura de brilho das bandas 10 e 11 e os baixos valores observados quando da aplicação isolada da banda 11 podem ter influenciado na baixa estimativa da LST no segundo período de déficit hídrico. A precisão da estimativa de temperatura de superfície a partir de dados do satélite Landsat-8 é relatada por Yu et al. (2014) que ao compararem a estimativa da LST a partir da aplicação do algoritmo Split-Window com medidas de temperatura de superfície ao nível do solo, em áreas de culturas agrícolas, pastagens nativas, florestas e pastagens antrópicas em quatro regiões dos Estados Unidos, observaram que para a banda 10 o erro quadrático médio (RMSE) para as quatro localidades foi de 0,87 K, 1,01 K, 0,93 K e 0,57 K, enquanto que para a banda 11, os valores de RMSE foram 1,17 K, 1,19 K e 0,75 K. Os autores afirmam que a incerteza da calibração esteve mais associada aos dados da banda 11, uma vez que essa banda é mais afetada pela absorção da radiação pelo vapor d'água atmosférico, o que implica em maiores erros relacionados ao perfil atmosférico na aquisição da temperatura de superfície.

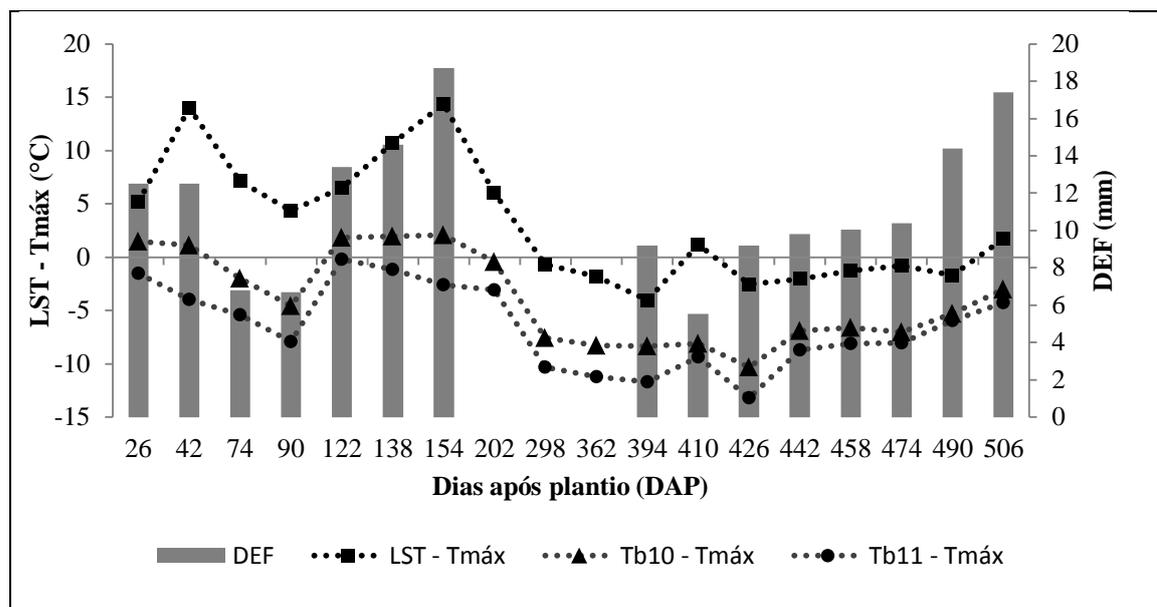


Figura 4.3.9. Evolução temporal de TS – TA da LST, banda 10, e banda 11 em relação ao déficit hídrico estimado ao longo do ciclo de produção da cana-de-açúcar em Santo Antônio de Goiás - GO no ano safra 2013/14.

A Figura 4.3.10 apresenta a variação da umidade do solo entre os 321 e 464 dias após o plantio (DAP) entre as profundidades de 20 cm e 80 cm, coletadas nos pontos que representaram as quatro janelas de três pixels sobre os talhões cultivados com cana-de-açúcar. A equação no gráfico representa a calibração efetuada nos dados de frequência relativa obtidos pela sonda de capacitância (Lima-Filho et al., 2013). Com base na variação de armazenamento de água no solo estimada pelo balanço hídrico em que a capacidade de campo $CC = 38\%$ ($0,380\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$) e o ponto de murcha permanente $PMP = 13\%$ ($0,130\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$) observa-se que a umidade do solo esteve próxima à CC nas camadas intermediárias (30 a 80 cm) e próxima a PMP nas camadas superficiais (0 a 20 cm), onde a evaporação da água do solo exerce maior influência. Entre as datas de leitura da umidade do solo observa-se que a depleção de umidade do solo ocorre ao longo de todo o perfil entre 321 e 464 DAP.

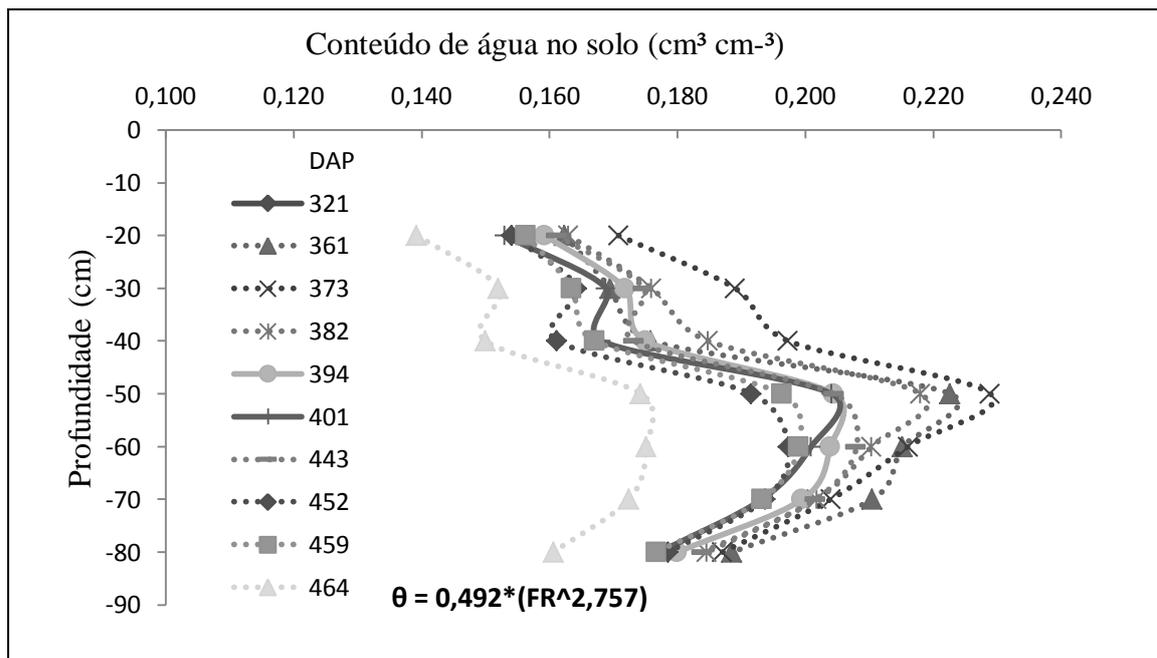


Figura 4.3.10. Conteúdo de água no solo, em vários dias após o plantio (DAP), em cultura de cana-de-açúcar, cultivada em condição de sequeiro.

4.4 CONCLUSÕES

As imagens Landsat 8 possuem potencial para o acompanhamento da temperatura foliar da cana-de-açúcar em escala local. Em comparação com a temperatura foliar medida em campo a temperatura de superfície estimada a partir das bandas termais do sensor TIRS mostrou-se com potencial no acompanhamento da temperatura foliar em períodos de ocorrência de déficit e excedente hídrico no solo.

Os valores do diferencial $TS - TA$ acompanharam o comportamento do balanço de água no solo, mostrando valores negativos para o período de excedente hídrico e valores positivos para o período de deficiência hídrica. Ao utilizar imagens orbitais para o acompanhamento da cultura é necessário considerar o efeito do solo exposto na fase inicial da cultura, onde a cobertura vegetal do solo ainda não atingiu valores próximos de 100%.

A principal desvantagem no uso do sensoriamento remoto no monitoramento do status hídrico das culturas é o fato de que ele fornece um estado instantâneo da cultura no momento em que a imagem é adquirida. No entanto, as imagens processadas podem ser utilizadas em conjunto com os modelos existentes de estimativa da evapotranspiração. Os modelos monitoram constantemente as condições meteorológicas para estimar o consumo hídrico da cultura, e as imagens LST obtidas periodicamente

poderiam ser utilizadas na verificação da precisão do modelo propondo ajustes com base no status hídrico do dossel da cana-de-açúcar.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de dados espectrais tem sido estudada ao longo de muitos anos com reconhecida aplicabilidade no monitoramento de diversas culturas. Mas ainda assim os índices biofísicos devem ser relacionados aos dados espectrais fornecendo assim, uma explicação mais detalhada da variação dos dados espectrais em relação à cultura, uma vez que o tratamento do dado de imagem de forma isolada sem considerar as alterações da planta em cada estágio fenológico pode levar a conclusões precipitadas sobre o status da cultura, seja em relação ao seu crescimento ou status hídrico.

As variáveis ambientais que influenciam no crescimento da cultura devem sempre ser monitoradas e relacionadas ao comportamento temporal dos dados espectrais, trazendo assim maior confiabilidade aos resultados.

O satélite Landsat-8 fornece dados que permitem o acompanhamento da cultura ao longo do seu ciclo de produção na escala em nível de talhão, entretanto o tratamento dos dados, principalmente em relação aos efeitos de atenuação atmosférica devem ser levados em consideração, para que se reduzam as falhas de interpretação em relação ao status da cultura, e também garantir uma melhor qualidade da imagem, principalmente em momentos de pouca aquisição, recorrente nos períodos chuvosos ou de nebulosidade na área de estudo.

6 REFERÊNCIAS

AGAPIOU, A.; HADJIMITSIS, D. G.; PAPOUTSA, C.; ALEXAKIS, D. D.; PAPADAVID, G. The importance of accounting for atmospheric effects in the application of NDVI and interpretation of satellite imagery supporting archaeological research: The case studies of Palaepaphos and Nea Paphos sites in Cyprus. **Remote Sensing**, Basel, v. 3, p. 2605-2629, 2011.

AL-FARAJ, A.; MEYER, E. G.; HORST, L. G. A crop water stress index for tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) irrigation decision-making a traditional method. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 31, p. 107-124, 2001.

ALFONSI, R. R.; PEDRO JR, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, v.1, n.135, p.42-81, set. 1987.

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; FILHO, G. M.; FERREIRA J. R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, set./out., 2008.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware, v. 133, n. 4, p. 395-406, 2007.

ALVAREZ, I. A.; CAMARGO E CASTRO, P. R.; Crescimento da parte aérea da cana crua e queimada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1069-1079, out-dez. 1999.

ARANTES, M. T. **Potencial de cultivares de cana-de-açúcar sob os manejos irrigado e sequeiro**. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu, 2012.

BACHI, O. O. S.; SOUZA, J. A. G. C. Minimum threshold temperature for sugar cane growth. In: International society of sugar cane technologists, 1978, São Paulo, **Proceedings...** São Paulo, 1978, v. 2, p. 1733-1741.

BATISTA, L. M. T. **Avaliação morfofisiológica da cana-de-açúcar sob diferentes regimes hídricos**. 2013, 125f, Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília, UNB, Brasília, 2013.

BARBIERI, V.; BACCHI, O. O. S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979. Mossoró. **Anais ...** Mossoró: SB Agro, p. 192-197, 1979.

BEZUIDENHOUT, C. N.; O'LEARLY, G. J.; SINGELS, A.; BAJIC, V. B. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. **Agricultural Systems**, New York, v.76, p. 589-599, 2003.

BENVENUTTI, F. A. **Relação entre índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos**. 2005. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

CAMPBELL, G. S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven v. 36, n. 4, p. 317-321, 1986.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 1991. 157p.

CHAPIN, F.; STURM, M.; SERREZE, M.; McFADDEN, J.; KEY, J.; LLOYD, A.; McGUIRE, A.; RUPP, T.; LYNCH, A.; SCHIMMEL, J. Role of land surface changes in Arctic summer warming. **Science**, v. 310, p. 657-660, 2005.

CLARKE, T. R. An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. **Horticultural Technology**, Phoenix, v.7, n.1, p.9-16, 1997.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA – CTC. **Revista variedades CTC**, disponível em: <<http://www.ctcanavieira.com.br/downloads/variedades2013WEB3.pdf>> Acesso em 10 dez 2013.

CHOUDHURY, B. J.; AHMED, N. U.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 50, p. 1-17, 1994.

COELHO, A. L. N.; CORREA, W. S. C. Temperatura de superfície do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geografia Acadêmica**, Boa Vista, v. 7, n. 1, p. 31-45, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v. 1 - Safra 2014/15, n. 3 – Terceiro levantamento, Brasília, 2014, 27p.

COUTO-JÚNIOR, A. F.; MENESES, P. R.; SANO, E. E. Desempenho da correção atmosférica baseada no algoritmo Flaash e sua avaliação para o processamento digital de imagens do sensor Landsat 7-ETM+ dentro do bioma Cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Resumos...** São José dos Campos: INPE, 2011, p. 7317-7323.

DAVIDSON, A.; CSILLAG, F. The influence of vegetation index and spatial resolution on a two-date remote sensing-derived relation to C4 species coverage. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 75, p. 138-151, 2001.

DE PAULA, S. C.; VEDOVATO, L. B.; GOMES, D.; VICENTE, L. E. Avaliação de procedimento para correção de efeitos da atmosfera em ambiente tropical utilizando dados Landsat 5/TM. Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica (CIIC), 6., 2012, Jaguariúna. **Anais eletrônicos...** Jaguariúna, 2012. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/933311/avaliacao-deprocedimento-para-correcao-de-efeitos-da-atmosfera-em-ambiente-tropical-utilizando-dados-landsat-tm-5>>. Acesso em 01 fev. 2015.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979, 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

DUVEILLER, F.; DEFOURNY, P. A conceptual framework to define the spatial resolution requirements for agricultural monitoring using remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, p. 2637-2650, 2010.

DURIGON A. Soil-plant-atmosphere water transfer mechanisms and their relation to crop water stress. 2011, 143f. Tese (Doutorado em Ciências)–Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

EDUARDO, B. F. S.; SILVA, A. F. J. M. Avaliação da influência da correção atmosférica no cálculo do índice de vegetação NDVI em imagens Landsat 5 e RapidEye. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2011, Foz do Iguaçu. **Resumos...** São José dos Campos: INPE, 2013, p. 1442-1449.

EMEKLI Y.; BASTUG, R.; BUYUKTAS, D.; EMEKLI, N. Y. Evaluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of bermudagrass. **Agricultural Water Management**, Auckland, v. 90, p. 205-212, 2007.

EPIPHÂNIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, p. 471-478, 1996.

ER-RAKI, S.; CHEHBOUNI, A.; DUCHEMIN, B. Combining satellite remote sensing data with the FAO-56 dual approach for water use mapping in irrigated wheat fields of a semi-arid region. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, p. 375-387, 2010.

EVANGELISTA, B. A. **Projeção de cenários atuais e futuros de produtividade de cana-de-açúcar em ambiente de Cerrado**. 2011. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

FLOOD, N. Continuity of reflectance data between Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI, for both top-of-atmosphere and surface reflectance: A study in the Australian Landscape. **Remote Sensing**, Basel, v. 6, p. 7952-7970, 2014.

GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SCHLETER, J. C.; WEIDNER, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Washington, v. 4, p. 11-20, 1965.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GHELLER, A. C. A.; MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F.; NASCIMENTO, R. Metodologia para estimativa da produtividade industrial da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 8, Recife, 2002, **Anais...** Recife: STAB, 2001, p.483-486.

GIONGO, P. R.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; ROCHA, H. R.; MEDEIROS, S. R. R.; NAZARENO, A. C. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n. 3, p. 279-287, 2010.

GOMES, D.; VICENTE, L. E.; SILVA, R. F. B.; DE PAULA, S. C.; MAÇORANO, R. P.; VICTORIA, D. C.; BATISTELLA, M. Uso de dados MODIS e AIRS para obtenção de parâmetros de correção atmosférica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Resumos...** São José dos Campos: INPE, 2013, p. 8019-8026.

GONÇALVES E. R.; FERREIRA, V. M.; SILVA, J. V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T. P.; DUARTE, W. G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 4, p. 378-386, 2010.

GONZÁLES-SANPEDRO, M. C.; LE TOAN, T.; MORENO, J.; KERGOAT, L.; RUBIO, E. Seasonal variations of leaf area index of agricultural fields retrieved from Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 3, p. 810-824, 2008.

GRAÇA, J. P.; RODRIGUES, F. A.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N.; HOFFMAN-CAMPO, C. B.; ZINGARETTI, S. M. Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas v. 22, n. 3, p. 189-197, 2010.

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Revista da STAB**, Piracicaba, v. 17, p. 32-34, 1999.

INMAM-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, n. 92, p. 185-202, 2005.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v.24, p. 45-55, 1981.

INAGAKI, M. N.; NACHIT, M. M. Visual monitoring of water deficit stress using infrared thermography in wheat. **Cereal Research**, New York, v. 35, p. 1603-1608, 2007.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Library of congress cataloging in publication data. Academic Press Canadian, 1983, 390p.

JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R. J.; PINTER, P. J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water resources research**, Malden, v.17, n.4, p.1133-1138, 1981.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Journal of Preventive Veterinary Medicine**, Amsterdam, v. 11, p. 185-200, 1991.

KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modeling sugarcane production systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanarana Koogan, 2008. 431 p.

KOONJAH, S. S.; WALKER, S.; SINGELS, A.; VAN ANTWERPEN, R.; NAYAMUTH, A. R. A quantitative study of water stress effect on sugarcane photosynthesis. **Proceedings...** South African Sugar Technology Association, South Africa, v. 80, p. 148-158, 2006.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. 1. ed. São Carlos: RiMA Artes e Textos, 2000, 531 p.

LATORRE, M.; JÚNIOR, O. A. C.; CARVALHO, A. P. F.; SHIMABUKURO, Y. E. Correção atmosférica: Conceitos e Fundamentos. **Espaço e Geografia**, Brasília v. 5, n. 1, p. 153-178, 2002.

LAZARIM, C. G.; ZULLO JÚNIOR, J. Estimativa da temperatura de superfície terrestre, destinada ao monitoramento agrometeorológico de dias com temperaturas elevadas, utilizando dados do sensor AVHRR. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Resumos...** São José dos Campos: INPE, 2011, p. 78-83.

LEUZINGER, S.; VOGT, R.; KORNER, C. Tree surface temperature in an urban environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, p. 56-62, 2010.

LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F. Calibração de uma sonda FDR para determinação do conteúdo de água de um Latossolo Amarelo. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 25, n, 3/4, p. 285-292, jul/dez, 2013.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Uniderp, 2007. 908 p.

LÓPEZ, R. L.; RAMÍREZ, R. A.; PEÑA, M. A. V.; CRUZ, I. L.; COHEN, I. S. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. **Agricultura Técnica em México**, Los Reyes, v. 35, n. 1, p. 91-111, 2009.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDIZIO, E.; MORAN, E. Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research. **International Journal of Remote Sensing**, Philadelphia, v. 23, n. 13, p. 2651-2671, 2002.

LUCAS, A. A.; SCHULER, C. A. B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e mata atlântica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v. 11, n. 6, p. 607-614, 2007.

MACHADO, H. M. **Determinação da variabilidade espacial da biomassa da cana-de-açúcar por meio de dados espectrais do satélite Landsat 7/ETM+**. 2003. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; FAHL, H. V. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v. 17, p. 1323-1329, 1982.

MAAS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance – current assessment. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 103, p. 115-134, 1977

MARIN, F. R.; LOPES-ASSAD, M. L.; ASSAD, E. D.; VIAN, C. E.; SANTOS, M. C. Eficiência da produção de cana-de-açúcar em duas safras no Estado de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.11, p.1449-1455, 2008.

McCREE, K.J.; FERNÁNDEZ, C.J. Simulation model for studying physiological water stress responses of whole plants. **Crop Science**, Madison, v.29, p.353-360, 1989.

MONSI, M.; SAEKI, T. Uber den lichtfaktor in den pflanzen-gesell-schaften und seine bedeutung fur Stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany**, Tokio, v. 14, p. 22-52, 1953.

MONTEIRO, P. F. C.; ÂNGULO-FILHO, R.; XAVIER, A. C.; MONTEIRO, R. O. C. Estimativa do índice de área foliar do feijoeiro por dados do sensor MODIS simulados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Resumos...** São José dos Campos: INPE, 2013, p. 593-600.

MONTEIRO, L. A. **Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Ciências)–Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MORENO, L. P. F. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. **Agronomía Colombiana**, Bogotá, v. 27, n. 2, p. 179-191, 2009.

MOROIZUMI, T.; HAMADA, H.; SUKCHAN, S.; IKEMOTO, M. Soil water content and water balance in rainfed fields in northeast Thailand. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n. 96, p. 160-166, 2009.

NASSIF, D. S. P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. 2010. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciências)–Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; BESPALHOK-FILHO, J. C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; SILVA, D. K. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 71-76, abr./jun. 2007.

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

PICOLI, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso Usina Catanduva**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

PINCELLI, R. P. **Tolerância à deficiência hídrica em cultivares de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas**. 2010. 78f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)–Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2010.

PINCELLI, R. P.; SILVA, M. A. Alterações morfológicas foliares em cultivares de cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 4, p. 546-556, 2012.

PIRES, R. C. M.; ARRUDA, F. B.; SAKAY, E. Irrigação e drenagem. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008 p. 631-970.

RAJESHWARI A.; MANI, N. D. Estimation of land surface temperature of Dindigul district using Landsat-8 data. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, Bangalore, v. 3, n. 5, p. 122-126, 2014.

REN, H.; DU, C.; LIU, R.; QIN, Q.; MENG, J.; ZHAO-LIANG, LI.; YAN, G. Evaluation of radiometric performance for the thermal infrared sensor onboard Landsat 8. **Remote Sensing**, Basel, v. 6, p. 12776-12788, 2014.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 100p.

ROMANI, L. A. S.; GONÇALVES, R. R. V.; AMARAL, B. F.; ZULLO Jr, J.; TRAINA Jr, C.; SOUZA, E. P. M.; TRAINA, A. J. M. Acompanhamento de safras de cana-de-açúcar por meio de técnicas de agrupamento em séries temporais de NDVI. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Resumos...** São José dos Campos: INPE, 2011, p. 383-390.

ROTH, G. The effect of water stress and soil compaction on cotton canopy reflectance and temperature. In: Australian cotton conference, **Proceedings...** 2002, p. 623-630.

ROTH, G.; GOYNE, P. **Measuring plant water status. Irrigation management of cotton.** Disponível em: www.cottoncra.org.au/files/567eec6e.../WP3_7.pdf Acesso em 07 mai 2015.

ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.145, p. 154-172, 2014.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SEPULCRE-CANTÓ, G.; ZARCO-TEJADA, P. J.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; SOBRINO, J. A.; MIGUEL, E.; VILLALOBOS, F. J. Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v. 136, p. 31-44, 2006.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Variação espaço-temporal do índice de área foliar e do brix em cana-de-açúcar. **Bragantia**. Campinas, v. 67, n. 1, p. 35-41, 2008.

SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. **Cerrado: ecologia e flora.** EMBRAPA Cerrados, Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2008, v. 2, 1279 p.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C.F.M; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: CP 2, p.19-36, 2006.

SIMÕES, M. S.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI; CAMARGO R. A. Variáveis espectrais e indicadores de desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 199-207, 2005.

SIMÕES, M. S.; ROCHA, J. V.; LAPARELLI, R. A. C. Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas safras por meio de radiometria de campo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte, MG. **Resumos...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2367-2374.

SINGH, P. N.; SHUKLA, S. K.; BHATNAGAR, V. K. Optimizing soil moisture regime to increase water use efficiency of sugarcane (*Saccharum spp.* Hybrid complex) in subtropical India. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n. 90, p. 95-100, 2007.

SILVA, M. A.; SOARES, R. A. B.; LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 655-661, 2008.

SILVA, M.A.; JIFON, J.L.; SHARMA, V. Da SILVA, J. A. G.; CAPUTO, M. M.; DAMAJ, M. B. Use of physiological parameters in screening drought tolerance in sugarcane genotypes. **Sugar Tech**, Uttar Pradesh, v.13, p. 178-184, 2011.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; CARMO, J. F. A.; SOUZA, L. S. B. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no submédio do vale do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 500-509, jul-set, 2012.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam v. 98, p.91-97, 2006.

SUGAWARA, L. M.; RUDORFF, B. F. T. Acompanhamento do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar por meio de séries temporais de NDVI do sensor MODIS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15., 2011 Curitiba, PR. **Resumos...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 391-398.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3ed, Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TEODORO, I.; DANTAS NETO, J.; HOLANDA, L. A.; SAMPAIO NETO, G. D.; SOUZA, J. L.; BARBOSA, G. V. S.; LYRA, G. B. Weather variables, water balance, growth and agro industrial yield of sugarcane. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, Jaboticabal, v. 35, n. 1, p. 76-78, 2015.

TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JUNIOR, L. A. Sugarcane leaf area index modeling under diferente soil water conditions. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.54, n. esp., p. 39-44, 1997.

TRENTIN, R.; ZOLNIER S.; RIBEIRO A.; STEIDLE NETO, A. J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6, p. 1085-1095, 2011.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS (2013) – **Landsat 8**. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>>, Acesso em 10 mar. 2015.

VILLA NOVA, N. A.; PEDRO Jr, M. J.; PEREIRA, A. R.; OMETTO, J. C. Estimativa de Graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima. *Caderno de Ciências da Terra*, Instituto Geográfico-USP, n. 30, 1972.

WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, p. 244-255, 2005.

WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J.; ESCOBAR, D. E.; GERBEMANN, A. H. Vegetation indices in crop assessments. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, p. 105-119, 1991.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, Oxford, v.11, p.41-76, 1947.

WOLF, D. W.; HENDERSON, D. W.; HSIAO, T. C. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize: Leaf area duration, nitrogen distribution, and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 859-864, 1988

XAVIER, A. C.; VETORAZZI, C. A. Monitoring leaf area index at watershed level through ndvi from Landsat-7/ETM+ data. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.61, n.3, p.243-252, 2004.

ZULLO Jr., J.; GUYOT, G.; GU, X, F.; PINTO, H. S.; HAMADA, E.; PELLEGRINO, G. Q.; 1996. Estimativa do conteúdo de vapor d'água a partir da radiação solar direta. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 7., 1996 Salvador, BA. **Resumos...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 979-980.

7 ANEXOS

Tabela 7.1. Médias das variáveis biométricas índice de área foliar (IAF), número de folhas verdes (NFV), altura de colmo (AC, m), de plantas de cana-de-açúcar, obtidos em dez datas de passagem do satélite Landsat 8/OLI, e seus correspondentes em número de dias após o plantio (DAP).

Datas	DAP	IAF Média/DP*	NFV Média/DP	AC Média/DP
28/01/2014	298	5,07/±0,21	9,80/±0,38	2,77/±0,21
02/04/2014	362	5,45/±0,29	10,31/±0,70	3,27/±0,17
04/05/2014	394	5,06/±0,24	9,78/±0,44	3,59/±0,21
20/05/2014	410	4,96/±0,33	9,61/±0,61	3,69/±0,22
05/06/2014	426	3,89/±0,45	7,67/±0,82	3,84/±0,13
21/06/2014	442	3,65/±0,65	7,36/±1,03	3,88/±0,13
07/07/2014	458	2,92/±0,56	5,92/±1,01	3,87/±0,15
23/07/2014	474	2,52/±0,36	5,20/±0,66	3,84/±0,13
08/08/2014	490	2,27/±0,37	4,84/±0,73	3,86/±0,14
24/08/2014	506	1,56/±0,51	3,47/±0,91	3,86/±0,15

*DP: desvio padrão.

Tabela 7.2. Valores médios e desvio padrão (SD) do NDVI sem correção – NDVI_{AP} e corrigido – NDVI_{COR} da área amostral de cana-de-açúcar.

Data (DAP)	NDVI _{AP} /SD	NDVI _{COR} /SD	ER (%)*
28/jan (298)	0,79/0,02	1,03/0,02	23,5
02/abr (362)	0,78/0,01	1,01/0,01	22,2
04/mai (394)	0,76/0,01	0,98/0,01	22,8
20/mai (410)	0,55/0,03	0,93/0,03	41,3
05/jun (426)	0,73/0,02	0,94/0,02	22,4
21/jun (442)	0,68/0,03	0,85/0,03	20,0
07/jul (458)	0,62/0,02	0,73/0,03	15,3
23/jul (474)	0,52/0,03	0,61/0,05	15,3
08/ago (490)	0,51/0,03	0,61/0,03	15,5
24/ago (506)	0,39/0,02	0,45/0,02	11,6

* ER – erro relativo = $(100\%(\text{NDVI}_{\text{COR}} - \text{NDVI}_{\text{AP}})/\text{NDVI}_{\text{COR}})$

Tabela 7.3. Valores médios de IAF observados e estimados ao longo de dez datas de passagem do satélite Landsat 8 – OLI entre o final da fase de crescimento de colmos e maturação da cana-de-açúcar.

Datas	IAF				
	Medido	NDVI _{AP}	NDVI _{COR}	Picoli (2006)	Vetorazzi (2004)
28/01/2014	5,07	4,98	5,17	3,47	5,01
02/04/2014	5,46	4,97	5,05	2,14	4,69
04/05/2014	5,06	4,75	4,87	2,95	4,26
20/05/2014	4,97	3,05	4,55	1,90	3,59
05/06/2014	3,89	4,51	4,58	2,04	3,64
21/06/2014	3,66	4,12	4,00	3,39	2,59
07/07/2014	2,93	3,62	3,22	2,08	1,52
23/07/2014	2,52	2,81	2,44	1,74	0,83
08/08/2014	2,28	2,78	2,42	2,22	0,81
24/08/2014	1,57	1,80	1,35	1,08	0,27
d		0,87	0,95	0,58	0,75
RMSE		0,86	0,55	1,87	1,23
EAm _{max}		2,63	1,51	3,75	2,64
EAm _{med}		0,65	0,44	1,54	1,07

Tabela 7.4. Precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração da cultura (ETC), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) e relação ETR/ETC semanais obtidos a partir do balanço hídrico climatológico na fase de brotação e estabelecimento da cultura (0 a 30 DAP).

Meses	Semana	mm semana ⁻¹						
		P	ETP	ETC	ETR	DEF	EXC	ETR/ETC
Abril	1	30,40	21,64	8,66	8,66	0,00	21,74	1,00
	2	81,60	19,59	7,84	7,84	0,00	73,76	1,00
	3	0,20	18,14	7,26	6,98	11,16	0,00	0,96
	4	0,00	18,16	7,27	6,44	11,72	0,00	0,89
Totais (mm fase ⁻¹)		112,2	77,53	31,03	29,92	22,88	95,5	

Tabela 7.5. Precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração da cultura (ETC), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) e relação ETR/ETC semanais obtidos a partir do balanço hídrico climatológico na fase de perfilhamento (30 a 120 DAP).

Meses	Semana	P	ETP	ETC	ETR	DEF	EXC	ETR/ETC
mm semana ⁻¹								
Maio	1	0,00	18,58	7,43	6,07	12,51	0,00	0,82
	2	0,00	17,99	7,20	5,41	12,58	0,00	0,75
	3	0,00	17,75	7,10	4,93	12,83	0,00	0,69
	4	74,00	18,44	7,38	7,38	0,00	36,99	1,00
Junho	1	20,40	14,53	10,90	10,90	0,00	9,50	1,00
	2	0,00	16,37	12,28	11,47	4,90	0,00	0,93
	3	0,00	17,47	13,10	10,61	6,86	0,00	0,81
	4	0,00	18,83	14,12	9,81	9,02	0,00	0,69
Julho	1	0,00	15,39	14,63	8,64	6,75	0,00	0,59
	2	0,00	15,04	14,29	7,18	7,87	0,00	0,50
	3	0,00	20,00	19,00	7,92	12,09	0,00	0,42
	4	0,00	13,66	12,98	4,51	9,15	0,00	0,35
Agosto	1	0,00	19,64	21,60	6,19	13,45	0,00	0,29
	2	0,00	19,59	21,55	4,84	14,75	0,00	0,22
	3	0,00	18,22	20,04	3,56	14,65	0,00	0,18
	4	0,00	20,28	22,30	3,13	17,15	0,00	0,14
Totais (mm fase ⁻¹)		94,40	281,79	225,89	112,53	154,55	46,49	

Tabela 7.6. Precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração da cultura (ETC), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) e relação ETR/ETC semanais obtidos por meio do balanço hídrico climatológico na fase de crescimento dos colmos (120 a 360 DAP).

Meses	Semana	P	ETP	ETC	ETR	DEF	EXC	ETR/ETC
		mm semana ⁻¹						
Setembro	1	0,00	21,28	23,41	2,54	18,74	0,00	0,11
	2	15,60	28,18	31,00	16,94	11,24	0,00	0,55
	3	15,40	25,84	28,43	16,37	9,48	0,00	0,58
	4	81,20	23,44	25,78	25,78	2,34	0,00	1,00
Outubro	1	0,20	27,81	30,59	18,03	9,78	0,00	0,59
	2	7,20	24,32	26,75	15,83	8,49	0,00	0,59
	3	7,20	26,57	29,23	14,90	11,67	0,00	0,51
	4	55,20	24,74	27,21	27,21	2,47	0,00	1,00
Novembro	1	29,00	25,05	31,31	31,31	6,26	0,00	1,00
	2	41,20	26,64	33,29	33,29	6,66	0,00	1,00
	3	48,20	24,77	30,96	30,96	0,00	10,63	1,00
	4	104,00	26,30	32,87	32,87	0,00	71,13	1,00
Dezembro	1	197,00	24,97	31,22	31,22	0,00	165,78	1,00
	2	85,80	24,14	30,18	30,18	0,00	55,62	1,00
	3	15,80	25,45	31,81	30,45	5,00	0,00	0,96
	4	9,60	29,31	36,64	29,07	0,25	0,00	0,79
Janeiro	1	0,20	21,35	26,69	14,31	7,05	0,00	0,54
	2	101,80	21,07	26,34	26,34	0,00	27,24	1,00
	3	32,20	20,32	25,40	25,40	0,00	6,80	1,00
	4	60,40	19,71	24,63	24,63	0,00	35,77	1,00
Fevereiro	1	0,00	17,91	22,39	19,79	1,88	0,00	0,88
	2	38,20	18,43	23,04	23,04	0,00	4,63	1,00
	3	90,00	17,34	21,68	21,68	0,00	68,32	1,00
	4	47,60	17,45	21,82	21,82	0,00	25,78	1,00
Março	1	82,40	18,80	23,50	23,50	0,00	58,90	1,00
	2	79,00	19,38	24,22	24,22	0,00	54,78	1,00
	3	22,80	19,57	24,46	22,80	0,00	1,66	0,93
	4	44,20	18,65	23,32	23,32	0,00	20,88	1,00
Abril	1	50,60	18,48	23,10	23,10	0,00	27,50	1,00
	2	54,40	18,84	23,55	23,55	0,00	30,85	1,00
	3	53,40	18,25	22,82	22,82	0,00	30,58	1,00
	4	5,40	16,71	20,89	19,62	2,90	0,00	0,94
Totais (mm fase ⁻¹)		1475,20		858,54	746,88	35,16	663,01	
			711,09					

Tabela 7.7 Precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração da cultura (ETC), e evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) e relação ETR/ETC semanais obtidos por meio do balanço hídrico climatológico na fase de maturação (360 a 506 DAP).

Meses	Semana	P	ETP	ETC	ETR	DEF	EXC	ETR/ETC
		mm semana ⁻¹						
Maio	1	0,00	14,54	18,18	13,81	0,74	0,00	0,76
	2	0,20	14,70	18,37	11,45	3,25	0,00	0,62
	3	0,00	14,94	18,68	9,39	5,55	0,00	0,50
	4	0,00	14,67	18,34	7,49	7,18	0,00	0,41
Junho	1	0,00	13,71	13,03	4,45	9,26	0,00	0,34
	2	0,00	13,20	12,54	3,71	9,49	0,00	0,30
	3	0,00	13,01	12,36	3,18	9,83	0,00	0,26
	4	0,00	12,13	11,53	2,59	9,54	0,00	0,22
Julho	1	0,00	12,47	11,85	2,34	10,14	0,00	0,20
	2	0,00	12,02	11,42	1,98	10,05	0,00	0,17
	3	0,00	12,16	11,55	1,76	10,40	0,00	0,15
	4	14,20	12,78	12,14	12,14	0,64	0,00	1,00
Agosto	1	0,00	18,28	12,80	1,97	16,31	0,00	0,15
	2	0,00	15,99	11,20	1,51	14,49	0,00	0,13
	3	0,00	19,23	13,46	1,58	17,65	0,00	0,12
	4	4,00	22,63	15,84	5,20	17,43	0,00	0,33
Setembro	1	25,80	26,45	18,51	18,51	7,93	0,00	1,00
	2	0,00	24,35	17,05	1,60	22,75	0,00	0,09
	3	0,00	28,87	20,21	1,54	27,33	0,00	0,08
	4	13,60	31,69	22,18	14,15	17,53	0,00	0,64
Totais (mm fase ¹)		53,80	347,84	301,23	120,35	227,49	0,00	