



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

ANA CAROLINA TAQUES NASCIMENTO

ESTIMATIVA DO ESTRESSE HÍDRICO DE VARIEDADES DE ALGODÃO
UTILIZANDO ÍNDICES ESPECTRAIS E TERMAL A PARTIR DE IMAGENS
MULTISENSORIAIS DE RPAS

CUIABÁ - MT
2024

ANA CAROLINA TAQUES NASCIMENTO

**ESTIMATIVA DO ESTRESSE HÍDRICO DE VARIEDADES DE ALGODÃO
UTILIZANDO ÍNDICES ESPECTRAIS E TERMAL A PARTIR DE IMAGENS
MULTISENSORIAIS DE RPAS**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação
em Física Ambiental do Instituto de Física da
Universidade Federal de Mato Grosso como
requisito parcial para a obtenção do título de
doutora em Física Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Peter Zeilhofer

**CUIABÁ-MT
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

N244e Nascimento, Ana Carolina Taques.

Estimativa do estresse hídrico de variedades de algodão utilizando índices espectrais e termal a partir de imagens multisensoriais de RPAS [recurso eletrônico] / Ana Carolina Taques Nascimento. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 88 f., pdf). -- 2024.

Orientador: Peter Zeilhofer.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2024.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Estresse hídrico. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Índices Termais e Espectrais. I. Zeilhofer, Peter, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ESTIMATIVA DO ESTRESSE HÍDRICO E PRODUTIVIDADE DE VARIEDADES DE ALGODÃO UTILIZANDO ÍNDICES ESPECTRAIS E TERMAIS A PARTIR DE IMAGENS MULTISENSORIAIS DE RPAS

AUTORA: DOUTORANDA ANA CAROLINA TAQUES NASCIMENTO

Tese defendida e aprovada em **27 de novembro de 2024**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

- 1. PROF. DR. PETER ZEILHOFER** (Presidente Banca / ORIENTADOR)
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
- 2. PROFA. DRA. LUCIANA SANCHES** (Membro Interno)
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
- 3. PROF. DR. RAFAEL DA SILVA PALÁCIOS** (Membro Interno)
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
- 4. PROF. DR. ROBERTO NUNES VIANCONI SOUTO** (Membro Externo)
INSTITUIÇÃO: INSTITUTO FEDERAL DE MATO GROSSO
- 5. PROF. DR. VAGNER PAZ MENGUE** (Membro Externo)
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

CUIABÁ, 27/11/2024.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT, em 28/11/2024, às 10:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUCIANA SANCHES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 28/11/2024, às 10:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **VAGNER PAZ MENGUE, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 28/11/2024, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael da Silva Palácios, Usuário Externo**, em 28/11/2024, às 12:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **PETER ZEILHOFER, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 28/11/2024, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ROBERTO NUNES VIANCONI SOUTO, Usuário Externo**, em 29/11/2024, às 19:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7419755** e o código CRC **5FA69556**.

Dedico este trabalho aos pilares da minha vida: meus pais e meu marido. Aos meus pais, pelo amor incondicional, e pelo apoio constante que sempre ofereceram. Ao meu marido, pela paciência, compreensão e pelo amor que me sustenta mesmo nos momentos mais desafiadores. Cada conquista desta jornada reflete a força e o amor que sempre estiveram presentes em suas ações.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força que me sustentou nos momentos difíceis, pela persistência que guiou meus passos e pela proteção que me amparou em toda esta jornada.

À minha família: meus pais, Valdelice e Manoel, minha irmã, Anna Julia, e meu marido, Rafael, por todo o amor, apoio e compreensão ao longo deste período desafiador.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Peter Zeilhofer, pela orientação, paciência, confiança e valiosas contribuições que tornaram este trabalho possível.

Aos membros da banca examinadora, pelas contribuições, pelo tempo dedicado e pelas sugestões que enriqueceram este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido durante parte desta trajetória acadêmica, sem o qual a realização deste trabalho não seria possível.

RESUMO

NASCIMENTO, A. C. T. **ESTIMATIVA DO ESTRESSE HÍDRICO DE VARIEDADES DE ALGODÃO UTILIZANDO ÍNDICES ESPECTRAIS E TERMAL A PARTIR DE IMAGENS MULTISENSORIAIS DE RPAS**. Cuiabá, 2024, 88f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O algodão é uma das culturas mais importantes do Brasil, destacando-se tanto pela relevância econômica quanto pela sua contribuição ao agronegócio, especialmente no estado de Mato Grosso, um dos maiores produtores mundiais. Contudo, essa commodity agrícola desempenha um papel significativo no desmatamento e no consumo de água, gerando impactos ambientais que afetam o ciclo hidrológico e as variáveis climáticas. Diante disso, a produtividade da cultura do algodão enfrenta crescentes desafios associados à escassez hídrica, causada por irregularidades no período chuvoso. O sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta vital para o monitoramento dos cultivos, incluindo a avaliação de estresse hídrico e seu efeito sobre a sua produtividade. Neste contexto, este estudo tem como objetivo principal: Avaliar o desempenho de índices multi-espectrais para o monitoramento do estresse hídrico em plantações de algodão geradas a partir de uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) multi-rotor e como objetivos específicos: (I) Quantificar a separabilidade de variedades do algodão irrigadas e não irrigadas; (II) Avaliar o desempenho das imagens na estimativa do estresse hídrico em função de procedimentos de pré-processamento, de características fisionômicas dos cultivos e (III) Averiguar a interferência do estresse hídrico sobre a produtividade das variedades. O estudo foi conduzido no Centro de Treinamento e Difusão Tecnológica (CTDTI) do Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA), em Sorriso, abrangendo 39 variedades de algodão cultivadas sob condições de "Sem Estresse" e "Com Estresse". Os métodos incluíram o pré-processamento das imagens, a filtragem dos dados espectrais, cálculo de índices termal e espectrais, a classificação das variedades a partir da interpretação de fotografias adquiridas *in situ* de acordo com as suas características fisionômicas e análises estatísticas, incluindo a comparação das classificações com dados de produtividade previamente disponíveis. Os resultados confirmaram a eficácia dos sensores térmico e multiespectral na detecção de estresse hídrico. A diferenciação foi garantida principalmente pelo índice termal CWSI que foi significativamente mais elevado em áreas "Com Estresse". Os índices multiespectrais NDVI, GRVI e Red Edge Ratio apresentaram valores maiores nas áreas "Sem Estresse" e contribuem como covariáveis para melhorar o desempenho classificatório dos modelos combinados. No entanto, sob condições atmosféricas favoráveis, esses índices não alcançam a mesma eficácia classificatória proporcionada pelo CWSI. O agrupamento das variedades por características fisionômicas levantadas mostrou que variedades com estrutura quadrada e de porte mais baixo tendem a ser mais resistentes a efeitos de estresse hídrico. Os procedimentos propostos para filtragem dos dados contribuíram para a melhoria do desempenho dos modelos, sendo sua aplicação em estudos similares futuros fortemente recomendada. Uma parte maior das variedades de algodão submetidas a condições de estresse hídrico, apresentaram maior produtividade do que aquelas cultivadas sob irrigação. O desenvolvimento de modelos empíricos mostrou ainda que a estimativa da produtividade foi mais eficiente para as parcelas sob estresse hídrico do que para as parcelas irrigadas.

Palavras-chave: Estresse hídrico, Sensoriamento Remoto, Índices Termal e Espectrais.

ABSTRACT

NASCIMENTO, A. C. T. Estimation of Water Stress of Cotton Varieties Using Spectral and Thermal Indices from Multisensor UAV Images. Cuiabá, 2024, 88p. Thesis (Ph.D. in Environmental Physics) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

Cotton is one of Brazil's most important crops, both for its economic significance and its contribution to agribusiness, particularly in Mato Grosso, one of the world's largest cotton-producing regions. However, this vital commodity contributes to deforestation, creating environmental impacts that disrupt the hydrological cycle and affect climatic variables. As a result, cotton crop productivity faces challenges, particularly water scarcity caused by irregular rainfall patterns. Remote sensing has emerged as a critical tool for crop monitoring, including the assessment of water stress and its effects on productivity. Against this backdrop, this study evaluates the performance of thermal and multi-spectral indices in monitoring water stress in cotton fields using a multi-rotor Remotely Piloted Aircraft (RPA). The specific objectives are to: (i) quantify the separability of irrigated and non-irrigated cotton varieties; (ii) evaluate the performance of imagery in estimating water stress based on imagery preprocessing and the physiognomic characteristics of cotton crops; and (iii) assess the impact of water stress on cotton genotypes. The study was conducted at the Training and Technology Diffusion Center (CTDTI) of the Mato Grosso Cotton Institute (IMA) in Sorriso and involved 39 cotton varieties cultivated under "Non-Stressed" and "Stressed" conditions. Methods included image preprocessing and data filtering, calculating thermal and spectral indices, classifying genotypes based on their physiognomic characteristics through hand-held photograph interpretation, and statistical analyses, including the comparison with productivity data, previously available. Results confirmed the effectiveness of thermal and multispectral sensors in detecting water stress. The Crop Water Stress Index (CWSI) was particularly effective, showing significantly higher values under water stress conditions. Indices such as the NDVI, GRVI, and Red Edge Ratio exhibited higher values in "Non-Stressed" areas, enhancing classification accuracy as complementary covariates, though they did not surpass the classification performance of CWSI under favorable atmospheric conditions. Grouping by physiognomic characteristics revealed that genotypes with a quadratic structure and shorter heights tend to be more resistant to water stress. Proposed data preprocessing methods improved the performance of water stress models and are recommended for future studies. Interestingly, most genotypes demonstrated higher productivity under water stress than when fully irrigated. The development of empirical models further indicated that productivity estimates performed better in water-stressed stands than in irrigated plots.

Keywords: Water Stress, Remote Sensing, Thermal and Spectral Indices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estádios fenológicos de desenvolvimento do algodoeiro.	7
Figura 2 - Distribuição dos vetores de desmatamento no Brasil em 2022.	13
Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo.	23
Figura 4 - (a) Plantas não estressadas; (b) Plantas estressadas; (c) No detalhe, instrumento de irrigação (pivô arrasto) e; (d) Imagem da área do experimento demonstrando os blocos estressado e não estressado.	25
Figura 5 - (a) Área experimental de estresse hídrico com suas respectivas parcelas; (b) Parcela em detalhe de uma variedade de algodão com suas 4 respectivas linhas de plantio; (c) No detalhe, a codificação de identificação da parcela fixada em uma das plantas.	26
Figura 6 - Matrice 600 (a); Matrice 600-PRO (b) e; no detalhe, Gimbal Ronin-MX (c).	28
Figura 7 - Sensor Multiespectral MicaSense Rededge.	29
Figura 8 - Sensor Termográfico marca Flir, modelo T-420.	29
Figura 9 - (a) Amostras colhidas no interior da parcela; (b) Detalhe de amostra colhida.	30
Figura 10 - Exemplificação de parcelas densas, com falhas e não desenvolvidas sem e com estresse hídrico em imagens multiespectrais e termais (Floração).	33
Figura 11 - Demonstração dos segmentos e centroides em parcela densa, com falha e não desenvolvida (Floração).	35
Figura 12 - Imagens dos índices entre parcelas estressadas e não estressadas para as áreas densas, com falhas e não desenvolvidas.	36
Figura 13 - - Estimativa do déficit hídrico durante o experimento 2019. Depleção e déficit hídrico foram determinados a partir do software Cropwat utilizando dados da estação climática da ImaMT.	42
Figura 14 - NDVI por variedade, nas fases de Floração e Abertura de Capulhos. Caixas na cor azul representam parcelas “Sem estresse” e na cor rosa, parcelas “Com estresse”	44
Figura 15 - Índice GRVI por variedade, nas fases de Floração e Abertura de Capulhos. Caixas na cor azul representam parcelas “Sem estresse” e na cor rosa, parcelas “Com estresse”	46
Figura 16 - Índice Red Edge Ratio por variedade, nas fases de Floração e Abertura de Capulhos. Caixas na cor azul representam parcelas “Sem estresse” e na cor rosa, parcelas “Com estresse”.	47
Figura 17 - Índice termal CSWI por variedade, nas fases de Floração e Abertura de Capulhos. Caixas na cor azul representam parcelas “Sem Estresse” e na cor rosa, parcelas “Com estresse”.	49

Figura 18 - Distribuição do Indicador de estresse hídrico em função da classe de altura das variedades. Parcelas não irrigadas.	54
Figura 19 - Distribuição do Indicador de estresse hídrico em função da estrutura das variedades. (1: disforme, 2: losango, 3: quadrada). Parcelas não irrigadas.	55
Figura 20 - Comparativo do Pseudo-R ² por índice para os dados filtrados (vermelho) e não filtrados (azul).	56
Figura 21 - Comparativo do OC por índice para os dados filtrados (vermelho) e não filtrados (azul).	57
Figura 22 - Produtividade por variedade (dados filtrados).	58
Figura 23 - Estimativa da produtividade por hectare (_PR_HA) em diferentes condições de manejo - com estresse (0) e sem estresse (1).	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área desmatada (ha) por vetor de pressão em 2019 a 2022 no Brasil.	12
Tabela 2 - Proporção (%) por vetor de pressão em 2019 a 2022 no Brasil.	12
Tabela 3 - Imagens selecionadas para o cálculo dos índices espectrais.	30
Tabela 4 - Critérios para a classificação visual das culturas.	32
Tabela 5 - Índices espectrais.....	37
Tabela 6 - Modelos logísticos univariados, aninhado por Tratamento para diferenciação de parcelas com e sem estresse hídrico.	50
Tabela 7- Resumo dos modelos univariados (Pseudo-R ² de Cragg-Uhler; OC: Overall Accuracy).....	51
Tabela 8 - Resumo e classificação dos modelos multivariados dos Índices combinados com base na pontuação combinada das métricas AIC, Pseudo R ² e OC (Floração).	52
Tabela 9 - Análises de Regressão Logística para os modelos multivariados dos índices combinados (AC).....	53
Tabela 10 - Teste de Kruskal-Wallis da dependência do indicador de estresse hídrico da altura das variedades.....	55
Tabela 11 - Teste de Kruskal-Wallis da dependência do do indicador de estresse hídrico da estrutura das variedades. Significâncias ajustadas das comparações pareadas: 1-2: 0.257, 1-3: 0.020, 2-3: 0.043).	55
Tabela 12 - Estimativa dos parâmetros para modelagem da produtividade. Parcelas sob estresse hídrico (Modelo geral: $p < 0,01$).	60
Tabela 13 - Estimativa dos parâmetros para modelagem da produtividade. Parcelas sob estresse hídrico (Modelo geral: $p < 0,01$).	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
1.1.1. Objetivo Geral	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DO ALGODOEIRO	4
2.1.1. História e Origem do Algodão.....	4
2.1.2. Morfofisiologia e Fenologia do Algodão	5
2.1.3. Espécies e Cultivares de Algodão	7
2.1.4. Importância Econômica do Algodão	8
2.2. VARIÁVEIS CLIMÁTICAS, DESMATAMENTO E ESTRESSE HÍDRICO: INTERFERÊNCIAS SOBRE A CULTURA DO ALGODÃO	10
2.2.1. Variáveis climáticas	10
2.2.2. Desmatamento	11
2.2.3. Efeitos do Estresse Hídrico na Fisiologia e na Produção do Algodoeiro 14	
2.2.4. Melhoramento Genético do Algodão para Resistência a Estresses Ambientais 15	
2.3. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO AGRÍCOLA 17	
2.3.1 Aplicações de Termografia e Índices Espectrais no Monitoramento Agrícola	18
2.3.2 Monitoramento do Estresse Hídrico por Índices Espectrais em Culturas Agrícolas.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 ÁREA DE ESTUDO	23
3.1.1 Região agrícola do médio norte de MT.....	23

3.1.2 Características da Área Experimental	24
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
3.2.1 Atividades de Campo	27
3.2.2 Pré-processamento das Imagens.....	31
3.2.3 Classificação Fisionômica das Culturas	31
3.2.4 Cálculo dos Índices Espectrais	32
3.2.5 Análises Estatísticas	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1 ANÁLISE DO ESTRESSE HÍDRICO E DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO DURANTE O EXPERIMENTO	42
4.2 SEPARABILIDADE DO ESTRESSE HÍDRICO POR ÍNDICES INDIVIDUAIS	43
4.2.1 NDVI.....	43
4.2.2 GRVI	45
4.2.3 RED EDGE RATIO	47
4.2.4 CSWI.....	48
4.3 ANÁLISE DA SEPARABILIDADE POR TÉCNICA DE INFERÊNCIA.....	50
4.3.1 Modelos Univariados	50
4.3.2 Modelos Multivariados.....	51
4.4 RELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FISIONÔMICAS SOBRE O ESTRESSE HÍDRICO	54
4.5 A INFLUÊNCIA DA FILTRAGEM.....	56
4.6 PRODUTIVIDADE	57
4.6.1 Produtividade por variedade.....	57
4.6.2 Estimativa da produtividade	60
CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

O Cerrado é um bioma que tem sido intensamente modificado desde as décadas de 1970 e 1980, com aproximadamente 46% de sua área transformada para atividades agropecuárias entre 1985 e 2021. Nos últimos vinte anos, houve um crescimento significativo das áreas de produção de algodão, que aumentaram de 8.900 km² em 2000 para 212.659 km² em 2021, representando uma expansão de aproximadamente 2.290% (MAPBIOMAS, 2023).

Simultaneamente, o mapeamento por imagens de satélite revelou uma expansão notável nas áreas irrigadas, especialmente com o uso de pivôs centrais e sistemas de inundação. A área irrigada passou de 804 mil hectares em 1985 para 3,29 milhões de hectares em 2021. Durante esse período, houve uma mudança significativa nos métodos de irrigação: enquanto 84% das áreas irrigadas utilizavam o sistema de inundação em 1985, esse percentual caiu para 44% em 2021. Em contrapartida, o uso de pivô central, que representava 8% das áreas irrigadas em 1985, cresceu para 50% em 2021 (MAPBIOMAS, 2023).

Atualmente o Brasil é o maior exportador de algodão do mundo. O país superou os Estados Unidos na safra 2023/2024, e teve um papel de destaque no evento anual *International Cotton Association* (ICA), que ocorreu em outubro de 2024, na Inglaterra (ABRAPA, 2024).

O algodão é a principal fibra têxtil natural do mundo (VITALE et al., 2024), portanto, se trata de uma das commodities agrícolas mais importantes no agronegócio brasileiro, especialmente em virtude da intensa movimentação econômica gerada por sua demanda no mercado internacional. Apesar de a produção agropecuária desempenhar um papel essencial na garantia da segurança alimentar global, ao abastecer mercados e contribuir para o desenvolvimento socioeconômico (CLARO et al., 2024), o grande desafio é assegurar que essa expansão ocorra de maneira sustentável.

A cultura do algodão enfrenta problemas de escassez hídrica causados por irregularidades no período chuvoso, perdas de janela de plantio, entre outros. Avanços tecnológicos, como modificações genéticas e aprimoramento no manejo dos solos, têm contribuído para a expansão dessa cultura, inclusive em áreas que antes eram consideradas inadequadas (ZHU et al., 2023). Esses avanços representam oportunidades para o aumento da produtividade e sustentabilidade. É importante destacar que a produtividade de qualquer cultura agrícola resulta da interação entre o genótipo, o manejo e as condições ambientais (SNIDER et al., 2022).

O aumento da produtividade agrícola, embora positivo para o setor, levanta questões sobre os impactos ambientais dessa expansão, especialmente em termos de uso da água,

conservação da biodiversidade e alterações climáticas regionais. Muitos países produtores de algodão negligenciaram a melhoria das práticas de produção, afetando negativamente o meio ambiente e a sociedade (VITALE et al., 2024).

A crescente preocupação com a escassez de água e os altos custos de irrigação na agricultura, incentivaram o desenvolvimento de tecnologias para monitorar o uso da água em tempo real, visando otimizar a produção por unidade de água aplicada (HAN et al., 2018; WANG et al., 2005). Neste cenário, as pesquisas e estudos são cruciais para aprimorar a compreensão ecofisiológica das monoculturas de algodão, e para a análise dos impactos ambientais. A compreensão dos efeitos do cultivo intensivo sobre os fluxos hídricos e energéticos é essencial para equilibrar o desenvolvimento agrícola com a conservação ambiental.

Culturas geneticamente modificadas que são mais resistentes ao estresse hídrico, são possíveis soluções para os agricultores que querem cultivar em áreas onde a água é escassa ou onde os períodos de seca são mais rigorosos, sem causar uma pressão adicional sobre os recursos hídricos. Isso pode aumentar a produtividade agrícola e a segurança alimentar em regiões com condições climáticas adversas, sem a necessidade de expandir a área cultivada.

Paralelamente, tecnologias como o sensoriamento remoto, associadas a sistemas de posicionamento global e informações geográficas, desempenham um papel fundamental na gestão do agronegócio, auxiliando na estimativa de área cultivada, monitoramento do desenvolvimento das culturas, detecção de estresse, umidade do solo e outros parâmetros relevantes (SHANMUGAPRIYA et al., 2019).

A aplicação de tecnologia na agricultura tem ganhado destaque, com o uso de Sistemas de Informações Geográficas (GIS), Sistemas RPA (Remotely Piloted Aircraft), satélites, robôs autônomos, GPS e outras tecnologias. Isso levou ao surgimento de termos como "agricultura de precisão", "agricultura digital" e "agricultura 4.0". Satélites e drones são as ferramentas mais utilizadas na agricultura de precisão (AHMAD et al., 2021).

Os RPAS têm se popularizado devido aos avanços tecnológicos e aos benefícios que oferecem como plataformas integradas de sensores imageadores, câmeras térmicas e multiespectrais, que capturam informações detalhadas sobre o estado das plantações, como o nível de estresse hídrico e a saúde das plantas. Com esses dados, é possível monitorar e gerenciar a irrigação de forma mais eficiente, detectar pragas e doenças precocemente, e otimizar o uso de insumos agrícolas (AHMAD et al., 2021).

Nos estudos relacionados ao estresse hídrico da vegetação, os métodos de sensoriamento remoto diferem dos métodos convencionais baseados em precipitação, pois monitoram o

estresse hídrico em vegetação natural ou em culturas agrícolas por meio de observações diagnósticas de estados-chave da superfície terrestre (CHOI et al., 2013).

Comparado a determinação do estresse hídrico *in situ*, as tecnologias de sensoriamento remoto apresentam várias vantagens, como a relação custo-benefício, a eficiência na identificação de padrões espaciais em diferentes escalas, e a capacidade de revelar diversas características estruturais e fisiológicas das plantas sob estresse hídrico (GOVENDER et al., 2009).

A integração de tecnologias avançadas, como o sensoriamento remoto e sistemas RPA, com práticas de melhoramento genético e de gestão ambiental, possibilita um salto significativo na sustentabilidade da produção agrícola. Essa abordagem possibilita aumentar a eficiência hídrica e energética das culturas, reduzir a necessidade de expansão de terras cultiváveis e facilitar o monitoramento detalhado das plantações, permitindo uma resposta mais rápida e eficaz às ameaças causadas por estresses ambientais, pragas e doenças.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de índices espectrais e termais para o monitoramento do estresse hídrico em plantações de algodão geradas a partir de um sistema RPA multi-rotor.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Quantificar a separabilidade de variedades do algodão irrigadas e não irrigadas;
- Avaliar o desempenho das imagens na estimativa do estresse hídrico em função de procedimentos de pré-processamento, e de características fisionômicas dos cultivos;
- Averiguar a interferência do estresse hídrico sobre a produtividade das variedades.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DO ALGODOEIRO

2.1.1. História e Origem do Algodão

No continente americano, mais especificamente no Peru, existem relatos evidências arqueológicas que apontam que os Incas e outras civilizações antigas já faziam uso do algodão, palavra de origem árabe (al-Qutun), a mais de 4000 a.C. (AMPA, 2024). E seu cultivo tem pelo menos 3.000 anos (LEE & FANG, 2015).

O algodão era cultivado, fiado e tecido no vale do rio Indo, no atual Paquistão, há cerca de 3.000 anos a.C., assim como pelos habitantes do vale do Nilo, no Egito, que também confeccionavam e utilizavam roupas de algodão na mesma época. Por volta de 800 d.C., comerciantes árabes começaram a levar tecidos de algodão para a Europa. Em 1492, quando Cristóvão Colombo chegou às Américas, ele encontrou o cultivo de algodão nas Ilhas Bahamas. A partir de 1500, o algodão já era conhecido em todo o mundo. Há indícios de que sementes de algodão foram plantadas na Flórida em 1556 e na Virgínia em 1607; em 1616, os colonos já cultivavam algodão ao longo do rio James, na Virgínia (NATIONAL COTTON COUNCIL OF AMERICA, 2023).

Na América Latina, mais precisamente no Brasil, o conhecimento sobre a cultura do algodão já era datado antes do descobrimento do país, pelos índios, que aqui habitavam e utilizavam o algodão para a produção de suas redes, cobertores, no tratamento de ferimentos e também incluíram a planta em sua alimentação (AMPA, 2018). Com o início da interação e troca de conhecimento entre nativos e europeus, o algodoeiro (tipo arbóreo), passou a ser cultivado no Brasil como cultura complementar. O primeiro marco de crescimento foi em 1760, quando o estado do Maranhão exportou 130 sacas de algodão para a Europa, chegando a 69 mil sacas em 1830, período esse que a cultura se expandiu por todo o Nordeste (COSTA & BUENO, 2004).

De acordo com Coelho (2004), a história do algodão no Brasil pode ser dividida fundamentalmente em dois grandes períodos: inicialmente como um produto de mercado interno, principalmente para suprir as necessidades de fibras têxteis da população brasileira e, posteriormente foi a crise cafeeira no início da década de 1930 que determinou a ascensão da cotonicultura no estado de São Paulo e o estabelecimento do Brasil como grande exportador da pluma, apesar das crises no setor.

A cultura do algodão teve seu primeiro grande ciclo no estado de Mato Grosso a partir do final da década 1980 (INDEA, 2023).

2.1.2. Morfofisiologia e Fenologia do Algodão

2.1.2.1. Morfofisiologia do algodão

O algodoeiro herbáceo é uma planta dicotiledônea, heliófila, pertencente ao gênero *Gossypium* de origem tropical, versátil, de boa adaptação, possui metabolismo fotossintético do tipo C3, com elevada taxa de fotorrespiração. É uma planta de morfologia e fisiologia complexa, que apresenta pelo menos três tipos de folha - cotiledonares, prófilos, verdadeiras ou microfilos (folhas simples e incompletas, não possuem bainha), dois tipos de ramificação (monopodiais e simpodiais), crescimento indeterminado, resistente a saís e à seca de modo geral (BELTRÃO, 2006; ROSOLEM, 2007a).

O algodoeiro possui raízes do tipo pivotante, bem desenvolvidas e vigorosas (condições favoráveis), podem atingir até 2,5 metros de profundidade e representam 80% da matéria seca na camada de 0 a 30 cm do solo e na maioria das vezes se concentram nos primeiros 30 a 50 cm de profundidade. Em fase vegetativa, podem ter um crescimento médio de até 5 cm/dia em condições favoráveis (BORÉM & FREIRE, 2014).

Na haste principal (caule), estão ligados os ramos vegetativos de crescimento monopodial ou vertical e os ramos frutíferos ou simpodiais (desenvolvimento lateral). Os ramos monopodiais diferem-se dos simpodiais, quando o meristema apical após originar uma folha, terminará em uma flor (ramos frutíferos), enquanto o ramo monopodial continuará emitindo folhas (ramos vegetativos) (BELTRÃO & SOUZA, 1999).

Em cada ramo frutífero do algodoeiro surgem os botões florais, que ocorrem em espiral, isto é, primeiro ramo frutífero, a primeira flor; no segundo ramo frutífero, a segunda flor e assim sucessivamente, voltando para o primeiro (segunda flor), ocorrendo um intervalo de floração vertical entre os ramos frutíferos e um intervalo de floração horizontal em cada ramo (OOSTERHUIS, 1999). A cada três dias surgem flores em ramos reprodutivos e a cada seis em um mesmo ramo reprodutivo (OOSTERHUIS, 1999). As flores são completas, apresentam quatro verticilos florais (pétalas, sépalas, androceu e gineceu), três brácteas de proteção (OLIVEIRA, 2007).

Após a fertilização, a coloração das pétalas sofre uma mudança fisiológica alterando a sua coloração de creme para rosa, devido a deposição de antocianinas, cujo sinal representa o início da fertilização (PASSOS, 1982; BELTRÃO & AZEVEDO, 2008).

O fruto é deiscente, tipo cápsula, possui de 3 a 5 lóculos, com 6 a 8 sementes por lóculo, sendo conhecido popularmente como “maçã” (quando verde) e capulho quando maduro

(PASSOS, 1977). A semente é piriforme, oblonga e a testa é nua ou envolvida por dois tipos de fibras (línter e a fibra comercial) (BELTRÃO & SOUZA, 1999).

Aspectos fisiológicos são de suma importância para o desenvolvimento do algodoeiro, com ênfase para a fotossíntese que realiza a principal função vital das plantas, a interceptação da luz solar e produção de fotoassimilados que se inicia o desenvolvimento vegetativo com formação de raízes, ramos e folhas (BELTRÃO & AZEVEDO, 2008).

2.1.2.2 Fenologia do algodão

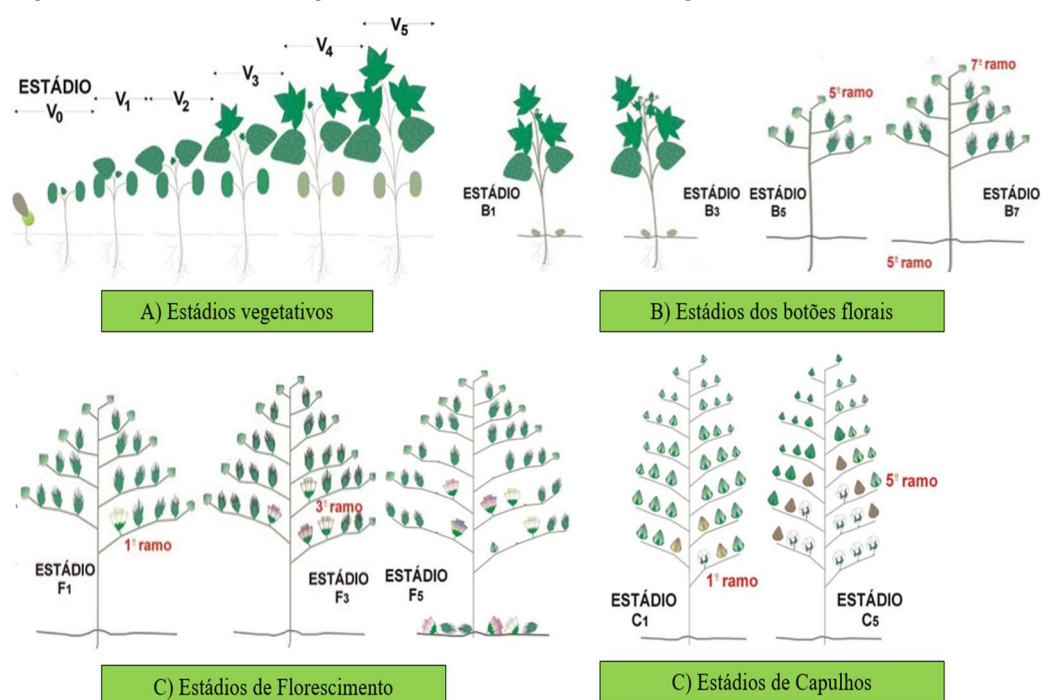
O conhecimento da fenologia do algodão é de suma importância para seu desenvolvimento desde a germinação da semente até a colheita da fibra. Cada fase da cultura é caracterizada por diferentes processos fisiológicos e requer condições ambientais específicas, pois o algodoeiro apresenta crescimento indeterminado e diversidade de cultivares, que apresentam diferentes ciclos (algumas completam seu ciclo produtivo em 130 dias (precoce), enquanto outras podem ultrapassar 170 dias (tardia), características que impossibilitam a construção de uma escala única, mundial para todas as condições de plantio (MARUR & RUANO, 2001).

Neste contexto, Marur & Ruano (2001) desenvolveram uma escala fenológica para o algodão (Fig. 1), que compreende quatro fases fenológicas: vegetativa (V), botões florais (B), florescimento (F) e abertura dos capulhos à colheita (C):

- A) Vegetativa (V) - V0 – abrange da emergência da plântula ao momento em que a nervura principal da primeira folha verdadeira alcança 2,5 cm de comprimento; V1 – a partir do final de V0 até que a segunda folha alcance 2,5 cm de comprimento; V2 - do final de V1 até que a nervura central da terceira folha atinja 2,5 cm; V3–Vn – segue-se o mesmo critério;
- B) Estádios de botões florais ou fase reprodutiva (B) - B1 - começa quando o primeiro botão floral se torna visível; B2 - primeiro botão floral do segundo ramo frutífero visível; B3 - primeiro botão floral do terceiro ramo frutífero visível. Concomitantemente, o segundo botão do primeiro ramo também se torna visível; B4-Bn - Sucessivamente, à medida que o primeiro botão floral de um novo ramo frutífero estiver visível, o estágio passará a ser Bn;
- C) Florescimento - A partir do momento em que o primeiro botão floral do primeiro ramo frutífero se transformar em flor, não é mais utilizada a indicação B, sendo o estágio de desenvolvimento chamado F1; Será F3 na abertura da primeira flor do terceiro ramo frutífero. Nesta fase ainda se observa a abertura da flor na segunda estrutura do primeiro ramo frutífero. Concomitante, à medida que há abertura da primeira flor do ramo frutífero de número n, o estágio passará a ser Fn;

D) Estádios de capulhos - O estágio será considerado C1 quando a primeira bola do primeiro ramo se transformar em capulho. Sucessivamente, o estágio será Cn à medida que ocorrer a abertura da primeira bola do ramo frutífero de número n. Em certas ocasiões, antes da abertura do primeiro capulho, pode ocorrer um curto período em que flores abertas não sejam observadas. Haverá situações em que o estágio de desenvolvimento deve ser caracterizado como FC, que significa o período entre a última flor (F) e o primeiro capulho (C).

Figura 1 - Estádios fenológicos de desenvolvimento do algodoeiro.



Fonte: Adaptado da escala de MARUR & RUANO, 2001 e ROSOLEM, 2020.

No algodoeiro mesmo com a ocorrência de queda de estruturas é possível determinar o estágio, visto que outras estruturas podem servir de referência, por exemplo, se a primeira estrutura de um determinado ramo foi perdida, pode realizar a observação na segunda, dois ramos abaixo, que deverá ter a mesma idade fisiológica (ROSELEM, 2020).

O conhecimento da fisiologia e da fenologia do algodoeiro é fundamental para a implementação de técnicas de manejo adequadas em cada fase do seu ciclo de desenvolvimento, visando maximizar a produção de fibras de alta qualidade e garantir a sustentabilidade da produção.

2.1.3. Espécies e Cultivares de Algodão

Mais de 50 espécies de algodão pertencem ao gênero *Gossypium*, sendo que quatro delas são amplamente cultivadas comercialmente. A espécie *Gossypium hirsutum* é responsável

por mais de 90% da produção mundial, seguida por *Gossypium barbadens* (algodão egípcio), que ocupa 8% da área cultivada. As espécies *Gossypium arboreum* e *Gossypium herbaceum* representam os 2% restantes, sendo cultivadas principalmente na África e na Ásia. *G. hirsutum* e *G. barbadens* pertencem ao pool genético primário, enquanto *G. arboreum* e *G. herbaceum* fazem parte do pool genético secundário (KANTARTZI et al., 2009; JUTURU et al., 2015).

No Brasil, a espécie *Gossypium hirsutum* L. é a mais cultivada para produção de pluma (muito utilizada pelas indústrias têxteis), representa 75% das fibras naturais e possui um enorme significado econômico e social para a agricultura brasileira (INDEA, 2023). Ao realizar uma busca no Registro Nacional de Cultivares (RNC, 2023), Cultivar Web, verificou-se que há registros de 223 cultivares de algodão para o Brasil, destas 137 cultivares são geneticamente modificadas.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA detêm registro de 17 cultivares, sendo 5 cultivares geneticamente modificadas. As demais cultivares estão registradas por grandes empresas, como por exemplo, como Fundação De Apoio À Pesquisa Agropecuária De Mato Grosso - Fundação MTTMG Tropical Melhoramento e Genética S.A., D&PL Brasil LTDA, TMG Tropical Melhoramento E Genética S.A., BASF S/A, Damaceno Mozer Braga, Empresa De Pesquisa Agropecuária De Minas Gerais – EPAMIG, Fundação De Apoio À Pesquisa Agropecuária De Mato Grosso - FUNDAÇÃO MT, Instituto Agrônômico – IAC, Instituto Agrônômico De Pernambuco – IPA, Fundação De Apoio À Pesquisa Agropecuária De Mato Grosso - Fundação MTUNISOJA S/A, Instituto Mato-Grossense Do Algodão – IMA/MT, Instituto De Desenvolvimento Rural Do Paraná - IAPAR-EMATER, Syngenta Seeds LTDA, Stoneville Pedigreed Seed Company, entre outras (RNC, 2023).

Com relação ao potencial de produção e de qualidade da fibra, as cultivares de algodão se distinguem, em pelo menos, quatro características, que auxiliam na escolha da mais adequada para o plantio: I) porte e conformação da planta (condiciona adaptabilidade a diferentes sistemas de produção); II) duração e grau de determinação do ciclo produtivo (implicações na época de semeadura, exigências nutricionais e manejo da cultura); III) rendimento no beneficiamento (porcentagem de fibra - resulta da forma de comercialização do produto, em caroço ou pluma); e IV) resistência ou tolerância a doenças (histórico ou probabilidade de ocorrência de patógenos na área a ser cultivada) (AGUIAR et al., 2014).

2.1.4. Importância Econômica do Algodão

As recentes projeções das Nações Unidas (ONU, 2022), indicam que a população mundial deve chegar em 8,5 bilhões em 2030 e a 9,7 bilhões em 2050. O Brasil se destaca no

cenário mundial na produção de alimentos, pois estima-se que o país será responsável por 40% da produção de alimentos em escala global e atualmente já ocupa a liderança na produção de alimentos, energia e fibras (CAMPO & NEGÓCIO, 2022).

Entre as fibras produzidas mundialmente, o algodão está entre as mais importantes. Em média, todos os anos, 35 milhões de hectares de algodão são plantados em todo o planeta, movimentando a economia mundial, anualmente, em aproximadamente US\$ 12 bilhões, além de envolver mais de 350 milhões de pessoas em sua produção, desde o plantio nas fazendas até a logística, descaroçamento, processamento e embalagem, nos cinco continentes e em mais de 60 países (ABRAPA, 2023). Segundo a Associação Brasileira de produtores de Algodão (AMPA, 2023), o Brasil tem se mantido entre os cinco maiores produtores mundiais, ao lado de países como China, Índia, EUA, Paquistão e considerando a produtividade em sequeiro, o país ocupa o primeiro lugar.

A produção de algodão está predominantemente concentrada na região Centro-Oeste (CARVALHO et al., 2015). Em 2022, Mato Grosso liderou como o principal produtor, seguido por estados como Bahia, Mato Grosso do Sul, Maranhão, Goiás e Minas Gerais, entre outros (SEAPA, 2023).

No Nordeste, o algodão também desempenha um papel importante na economia local, sendo cultivado tanto em regime de sequeiro quanto de irrigação. No entanto, a produção em sequeiro é considerada uma atividade de risco, devido à irregularidade das chuvas na região (CARVALHO et al., 2015).

De acordo com o sétimo levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024) para a safra de 2024, a produção de algodão em pluma alcançou 3,6 milhões de toneladas, representando um aumento de 13,4% em relação à safra anterior (2023). O levantamento também indicou um crescimento de 16,3% na área plantada.

O algodão possui uma cadeia produtiva complexa e de alto valor agregado, sendo a pluma o principal produto. Além dos fornecedores de insumos, esse produto passa por uma sequência de processos, desde a indústria de fiação, indústria de tecelagem, confecção de vestuário e finalmente pelo comércio de roupas. Com peculiaridades únicas, na indústria da moda e no design, ganham alto valor agregado. Integrando-se às cadeias produtivas do leite da proteína animal, os subprodutos do algodão, como o caroço e o óleo, possuem papel relevante na indústria química e como alimento animal. O algodão foi o principal impulsionador do desenvolvimento econômico de grande parte dos pequenos municípios em um sistema integrado com a bovinocultura (SEVERINO et al., 2019).

2.2. VARIÁVEIS CLIMÁTICAS, DESMATAMENTO E ESTRESSE HÍDRICO: INTERFERÊNCIAS SOBRE A CULTURA DO ALGODÃO

2.2.1. Variáveis climáticas

O emprego da aptidão climática possibilita a caracterização dos parâmetros meteorológicos que mais influenciam no comportamento das culturas e, quando em condições extremas, possam prejudicar o crescimento e desenvolvimento da planta (MEDEIROS et al., 2018). A compreensão dos efeitos das variáveis climáticas sobre as culturas agrícolas é de suma importância para o planejamento, visto que está diretamente associado à escolha das cultivares, época de semeadura, práticas de manejo, que vão desde a semeadura até a colheita (DANIEL et al., 2021).

A produtividade de qualquer cultura é uma função de genótipo, manejo e ambiente (SNIDER et al., 2022). Entre esses fatores, o ambiente que inclui elementos abióticos como temperatura, umidade relativa, precipitação, velocidade do vento e radiação solar, impacta diretamente o desenvolvimento das plantas. Temperaturas mais elevadas representam uma ameaça iminente à produtividade das culturas e são consequência das mudanças climáticas globais que aumentarão progressivamente a intensidade, a frequência e a duração dos eventos das ondas de calor (MEEHL & TEBALDI, 2004).

Na cotonicultura a produtividade é amplamente influenciada pela disponibilidade de água, temperatura do ar e radiação solar (WELLS & STEWART, 2010). Com a ação das mudanças climáticas, principalmente relacionadas a alteração do regime pluviométrico, o estado do Mato Grosso poderá enfrentar dificuldades hídrica (TORRES & MARENGO, 2014).

Um exemplo de alteração do regime pluviométrico foi a perda da janela de plantio do algodão na safra 22/23 no estado de Mato Grosso, o que resultou na redução da área cultivada em relação ao levantamento anterior, devido às chuvas intensas que atrasaram a colheita e operações logísticas da soja (CONAB, 2023b). Outro fato observado foi que a semeadura tardia do algodoeiro em Montividiu (GO), em segunda safra, reduziu a altura de plantas, número de capulhos por área e produtividade de fibra e, ainda se verificou que com o atraso na data de semeadura, a produtividade de fibra diminuiu aproximadamente 25 %, 17 % e 41 %, respectivamente em 2009, 2010 e 2011 (FERREIRA et al., 2015).

Conforme disposto na Instrução Normativa Conjunta SEDEC/INDEA-MT Nº 001/2016, para o estado de Mato Grosso a janela de plantio está dividida em regiões: I (sul e centro) e II (norte) que compreendem as seguintes datas de plantio do algodão: 1 de dezembro

a 28 de fevereiro e 15 de dezembro a 28 de fevereiro, respectivamente (MATO GROSSO, 2016).

O algodoeiro é muito sensível a variações térmicas, a faixa de temperatura do ar considerada ótima para seu estabelecimento e desenvolvimento compreende entre 25 °C e 30 °C (MARUR, 1993). Aproximadamente 95% da água absorvida pela planta de algodão é utilizada para resfriar a planta e mantê-la no limite ideal de temperatura para estar favorável a desempenhar a atividade enzimática (YEATES, 2014). Temperaturas noturnas superiores a 25 °C podem atrasar o florescimento, enquanto temperaturas diurnas próximas aos 25 °C estimulam a floração (SILVA et al., 2011). A viabilidade do pólen e a indeiscência da antera estão relacionadas ao estresse a altas temperaturas, o que resulta em menores taxas de formação de sementes e reduções significativas nos rendimentos finais (ZAHID et al., 2016). Durante o processo de desenvolvimento do capulho, o estresse térmico reduziu a altura da planta, entrenós, ramos simpodiais, ramos monopodiais, sementes por capulho, peso do capulho e comprimento da fibra (EKINCI et al., 2017). De acordo com Azevedo e Silva (2007) a cultura do algodoeiro necessita de temperaturas médias do ar entre 18 a 30 °C, elevada radiação solar e horas de insolação.

A radiação solar difusa está diretamente relacionada à fotossíntese das plantas (DURAND et al., 2021). A capacidade da luz interceptada está intimamente ligada ao arranjo do dossel, pois o padrão de distribuição de luz é determinado pela estrutura da copa (colunar), que revela uma estrutura exposta e se desenvolve no espaço interno, possibilitando que mais radiação seja capturada pelo terço inferior das plantas de algodão (SULTANA et al., 2023).

2.2.2. Desmatamento

O desmatamento, bem como as queimadas são problemas ambientais de alta complexidade que o Brasil vem tentando mitigar a cada ano. Períodos de estiagem mais constantes e duradouros, assim como as altas temperaturas estão diretamente relacionadas ao desmatamento e a produtividade das culturas agrícolas, como o algodão.

De acordo com os dados do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE, 2023) o desmatamento acumulado para o Bioma Amazônia entre os anos de 2008 a 2022, por estado, somaram 49.512,06 km² no Pará, 21.742,87 km² no Mato Grosso, 15.517,56 km² no Rondônia, 15.453,92 km² no Amazonas e 6.357,43 km² no Acre. Para o bioma Cerrado, o desmatamento acumulado, para o mesmo período (2008-2022), entre os estados, alcançou totais de 48.293,33 km² no Tocantins, 48.229,04 km² no Goiás, 45.595,89 Km² no Maranhão, 45.167,64 km² no

Mato Grosso e 41.409,34 km² em Minas Gerais. Para o bioma Pantanal, o desmatamento compreendeu 10.797,03 km² no Mato Grosso do Sul e 4.255,76 km² no Mato Grosso.

Os dados do MapBiomas Alerta para 2022 indicam que o desmatamento impulsionado pela pressão da agropecuária foi responsável por quase 96% de todos os desmatamentos validados no Brasil (Fig. 2). Esse índice reflete o impacto significativo das atividades agropecuárias na dinâmica de uso e cobertura da terra, evidenciando sua contribuição predominante para a perda de vegetação nativa no país.

Tabela 1 - Área desmatada (ha) por vetor de pressão em 2019 a 2022 no Brasil.

Vetores de Pressão	2019	2020	2021	2022	Total
Agropecuária	1.203.976	1.621.725	1.626.245	1.969.095	6.421.041
Garimpo	8.992	9.029	8.049	5.965	32.035
Mineração	1.479	1.447	1.466	1.128	5.521
Causa Natural*				652	691
Expansão Urbana	1.053	2.507	5.867	3.407	12.834
Outros	7.123	10.395	40.948	77.003	134.376
Total	1.221.570	1.645.104	1.682.575	2.057.251	6.606.499

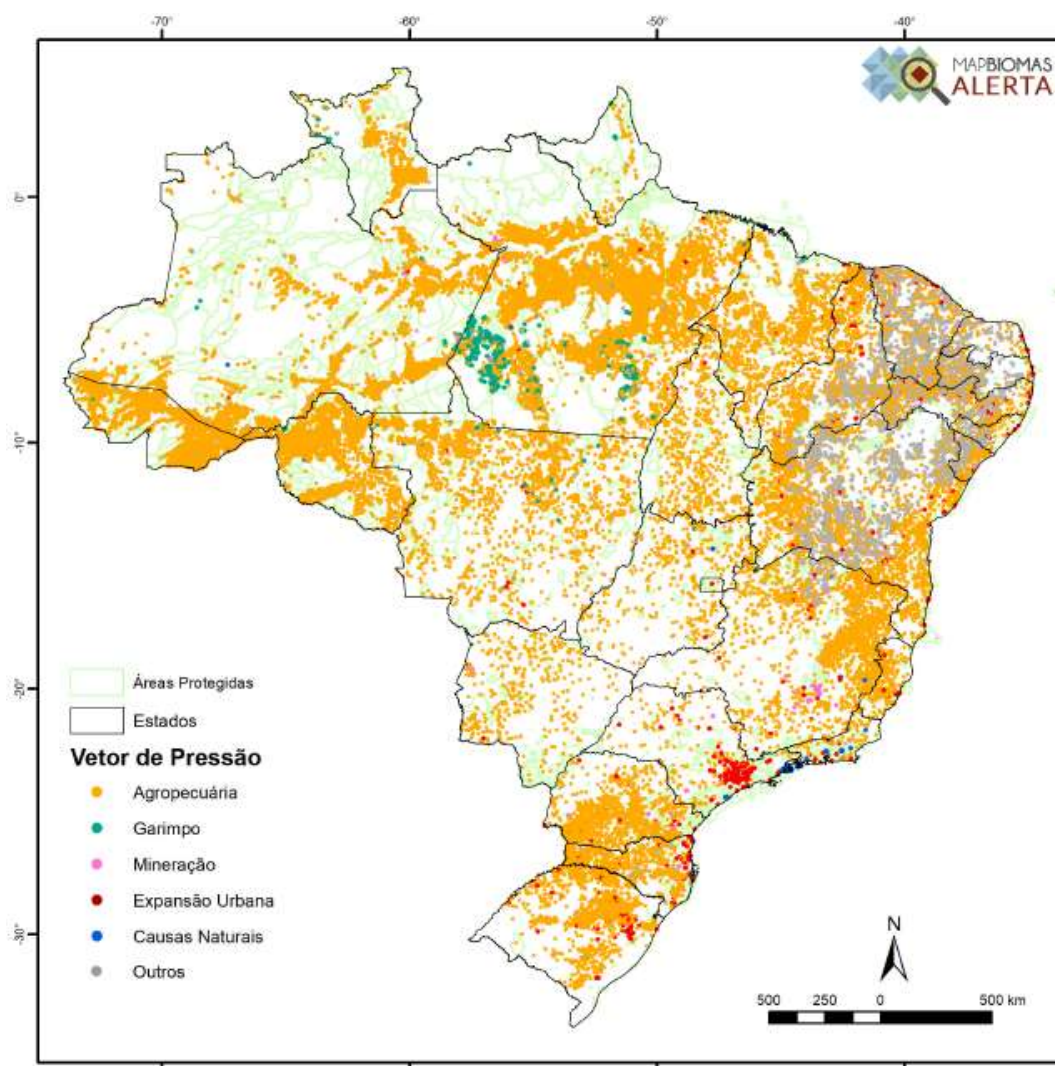
Fonte: Adaptado de MapBiomas, 2022.

Tabela 2 - Proporção (%) por vetor de pressão em 2019 a 2022 no Brasil.

Vetores de Pressão	2019	2020	2021	2022	Total
Agropecuária	98,60%	98,60%	96,70%	95,70%	97,20%
Garimpo	0,70%	0,50%	0,50%	0,30%	0,50%
Mineração	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%
Causa Natural					
Expansão Urbana	0,10%	0,20%	0,30%	0,20%	0,20%
Outros	0,60%	0,60%	2,40%	3,70%	2,00%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Adaptado de MapBiomas, 2022.

Figura 2 - Distribuição dos vetores de desmatamento no Brasil em 2022.



Fonte: MapBiomass, 2022.

Neste contexto, o estado de Mato Grosso vivencia um paradoxo: apresenta diversidade de biomas (Cerrado, Amazônia e Pantanal) em seu território, lidera a produção e comercialização de grãos, fibra e proteína animal. Por outro lado, está entre os cinco estados brasileiros que mais degradam seus biomas (MARTINELLI et al., 2010).

Para atenuar o cenário de mudanças climáticas, contabilizando o desmatamento, desertificação, degradação do solo, escassez hídrica, insegurança alimentar, entre outros, o país busca o cumprimento efetivo da legislação ambiental, o fortalecimento das entidades governamentais e não governamentais, forte investimento em tecnologias de detecção de danos à cobertura vegetal nativa (VARGAS, 2008; VACCHIANO et al., 2019; GONZAGA et al., 2022).

A rede de pessoas em prol a defesa do meio ambiente está cada vez maior, incluindo a preocupação de órgãos públicos federais como o Ministério Público, que têm utilizado

tecnologias de alertas de degradação florestal. No estado do Mato Grosso, por exemplo, o Projeto Olhos da Mata (Ministério Público do estado) utiliza dados de monitoramento do desmatamento anual do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), juntamente com dados do órgão ambiental estadual (SEMA) e do Global Forest Watch (GONZAGA et al., 2022). Além disso, Gonzaga et al. (2022) mencionam que o Ministério Público Federal utiliza ferramentas de sensoriamento remoto na investigação e no auxílio para a tomada de decisões, em relação ao desmatamento ilegal (Projeto Amazônia Protege).

Plataformas digitais de monitoramento ambiental são a chave para esse processo, pois detêm de funcionalidades cada vez mais intuitivas para seus usuários, um amplo acervo de dados remotos, com acurácia posicional na detecção da supressão vegetal e de incêndios florestais, como por exemplo, Terra Brasilis <<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>>, Deter <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter/deter>>, e Prodes <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>>, conduzidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Projeto MapBiomas <<https://mapbiomas.org/>>, conduzido por universidades, empresas de tecnologia e ONGs, bem como as plataformas globais, como o Global Forest Watch (GONZAGA et al., 2022).

2.2.3. Efeitos do Estresse Hídrico na Fisiologia e na Produção do Algodoeiro

Os fatores abióticos podem tanto favorecer o desenvolvimento das culturas quanto atuar como limitadores da produtividade, com ênfase no estresse hídrico (SOARES et al., 2020). O ar mais quente e seco produz um alto déficit de pressão de vapor, aumentando assim a evapotranspiração o que ocasiona uma taxa maior de secamento do solo e sob condições de seca, o potencial de água da planta e o potencial de pressão diminuem, o que impacta negativamente as funções fisiológicas da planta, consequentemente há diminuição da produtividade da cultura (WANG et al., 2016).

Cada espécie vegetal tem suas próprias estratégias e especificidades para tolerar o estresse hídrico, dependendo de suas características fisiológicas. O algodoeiro apresenta tolerância relativamente alta a seca, devido a profundidade que o sistema radicular das plantas consegue alcançar em condições de déficit hídrico (ROSOLEM, 2007b), entretanto, o estresse hídrico pode levar a queda de botões florais e maçãs jovens (GUINN & MAUNEY, 1984 a,b), à diminuição do número de estruturas reprodutivas e de capulhos por plantas, rendimento da fibra, produção de algodão em caroço e, consequentemente, da produtividade (PASSOS et al., 1987; BATISTA, 2010).

A cultura do algodão enfrenta desafios devido à escassez hídrica, resultante de irregularidades nas chuvas e da perda da janela ideal de plantio, entre outros fatores. A planta de algodão é capaz de minimizar o estresse hídrico a partir da regulação osmótica (manter a turgescência de raízes, folhas); redução da expansão celular; aumento do crescimento da raiz; aumento da densidade específica da folha e produção de cera cuticular; produção de proteínas de estresse e abortamento de frutos (YEATES, 2014).

As estratégias de defesa das plantas são praticamente três: escape da seca - quando a planta diminui seu ciclo, impulsionando sementes logo no começo do déficit; antecipação da seca - a planta fecha os estômatos reduzindo a fotossíntese, ocorre o maior investimento nas raízes; tolerância à seca - ajustes metabólicos, acúmulo de proteínas de proteção da planta (OSMOLOVSKAYA et al., 2018).

O estresse hídrico no algodoeiro tem sido associado a redução do potencial hídrico foliar e do teor de proteína de ligação de rubisco, diminuição na condutância estomática e fotossíntese, bem como aumento do teor de antocianina (BAKER et al., 2007; DEEBA et al., 2012).

Para a detecção do estresse hídrico as plataformas como satélites ou sistemas aéreos não tripulados, permitem que grandes áreas sejam monitoradas, sendo um método mais apropriado para uso em culturas extensivamente plantadas, como o algodão (BALLESTER et al., 2019).

2.2.4. Melhoramento Genético do Algodão para Resistência a Estresses Ambientais

O melhoramento genético das culturas de algodão, visando aumentar sua resistência às mudanças climáticas, especialmente a escassez hídrica, tem sido um campo de estudo cada vez mais relevante diante dos desafios impostos pelo aquecimento global (Vasconcelos et al., 2018). Pois, a principal ameaça às culturas de algodão é a seca, que afeta significativamente o rendimento e a qualidade das fibras (BIAN et al., 2019).

Nesse contexto, diversos pesquisadores têm buscado combinar a produtividade das culturas com características que conferem resistência a estresses abióticos. No entanto, um dos principais desafios enfrentados pelos melhoristas é reunir, em um único genótipo, a maior quantidade possível de alelos favoráveis, o que requer um processo contínuo de seleção a cada nova geração (PASSOS et al., 2010; BERNINI et al., 2020).

O desenvolvimento de genótipos de algodão tolerantes à seca é particularmente desafiador devido ao complexo padrão de herança das características quantitativas envolvidas

na resposta ao estresse hídrico, além das dificuldades associadas à medição precisa de características poligênicas (SHARIF et al., 2024).

Métodos tradicionais de melhoramento eram amplamente utilizados, mas são limitados pelo tempo e pelas variações genéticas disponíveis. Tecnologias de edição de genoma (GETs) surgiram como alternativas eficientes, oferecendo simplicidade, precisão e adaptabilidade para melhorar a resistência a estresses, alterar a expressão genética e empilhar características importantes, com menor risco de segregação genética e maior aceitação regulatória (ZULQURNAIN et al., 2022).

Cientistas estão utilizando uma combinação de abordagens genômicas, transcriptômicas e moleculares a fim de identificar genes e regiões do genoma que conferem tolerância ao estresse hídrico e a outras condições abióticas adversas, como mostra a revisão de Hossain et al. (2021), que fornece uma visão abrangente sobre as abordagens genômicas mais recentes usadas para investigar as respostas das plantas ao estresse oxidativo, induzido por seca e salinidade, que segundo o mesmo autor são os principais tipos de estresse abiótico que afetam a produtividade agrícola.

De acordo com Sharif et al. (2024), novas ferramentas biotecnológicas desempenham um papel crucial no desenvolvimento de variedades de algodão mais resistentes à seca. Entre essas ferramentas, destacam-se o mapeamento de QTLs (Quantitative Trait Loci) e a genotipagem por sequenciamento, que permitem identificar genes responsáveis pela regulação da resposta das plantas ao estresse.

Os QTLs ajudam a localizar regiões específicas do genoma que os melhoristas podem usar para desenvolver novas variedades com características adaptativas aprimoradas. Assim, o mapeamento de QTLs é essencial para identificar genes que conferem resistência a condições adversas, como a seca, e pode acelerar o processo de melhoramento genético (HOSSAIN et al., 2021; SHARIF et al., 2024).

Amjid et al. (2015) identificaram quatro QTLs (quantitative trait loci) em *Gossypium hirsutum* associados à tolerância à seca, relacionados à perda de água nas folhas e à estabilidade da membrana celular. Essas descobertas são fundamentais para o uso de marcadores moleculares no melhoramento assistido por seleção (MAS), permitindo o desenvolvimento de cultivares mais adaptadas a ambientes áridos.

Além disso, Jia et al. (2014), em análises moleculares da mesma espécie, detectaram alelos promissores que podem ser utilizados em programas de melhoramento para criar variedades de algodão mais resistentes tanto à seca quanto à salinidade.

Já Hasan et al. (2019) realizaram uma análise transcriptômica comparativa entre três espécies de algodão, revelando processos biológicos e vias-chave que auxiliam na resposta ao estresse hídrico, destacando a regulação de genes relacionados ao metabolismo osmótico.

Outros estudos, como o de Magwanga et al. (2020), aplicaram abordagens multiômicas para examinar a complexidade das respostas ao estresse ambiental no algodão, identificando genes cruciais para a retenção de água e a estabilidade das membranas celulares em condições de seca.

Esses avanços são complementados por pesquisas que utilizam a edição de genes e a biotecnologia para melhorar características fisiológicas do algodão, como a tolerância ao calor e à desidratação, tornando essas variedades mais viáveis em climas áridos (BOOPATHI et al., 2022; ZULQURNAIN et al., 2022)

Em resumo, o avanço no melhoramento genético do algodão é vital para a sustentabilidade da produção agrícola em regiões suscetíveis à seca, especialmente considerando as projeções de aumento na severidade das mudanças climáticas. A aplicação de tecnologias avançadas, como edição de genes e biotecnologia, em combinação com métodos tradicionais de melhoramento, tem o potencial de transformar a produção de algodão em um sistema mais resiliente e sustentável (SHARIF et al., 2024).

E esses estudos fornecem uma base para o desenvolvimento de cultivares que não só apresentam resistência à seca, mas também melhoram a qualidade das fibras, garantindo a viabilidade econômica da cultura mesmo em condições adversas (MAGWANGA et al., 2020).

2.3. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO AGRÍCOLA

A globalização e os avanços tecnológicos permitiram o desenvolvimento de sensores imageadores cada vez mais aprimorados, que são capazes de capturar imagens com maior frequência da superfície terrestre e em alta resolução (MENESES & ALMEIDA, 2012).

Muitas vezes, acoplados em satélites, os sensores permitem monitorar o planeta Terra e as suas mudanças temporais, assim como obter informações dos recursos naturais, possibilitando a partir do monitoramento ambiental, da gestão dos recursos naturais, contribuir de forma diversificada para a proteção do meio ambiente e da qualidade de vida das pessoas (MENESES & ALMEIDA, 2012).

O princípio básico do sensoriamento remoto é a captação da energia eletromagnética refletida, no caso, pela vegetação ou pelo dossel. Essa energia pode ser modificada por

alterações decorrentes de diversos fatores, como mudanças nos pigmentos, nos nutrientes, nas concentrações químicas, na estrutura celular, na troca gasosa e no teor de água. Esses fatores influenciam diretamente a temperatura da vegetação e a refletância (JENSEN, 2009).

A agricultura está cada vez mais tecnológica e o resultado pode ser observado a cada ano, com safras recordes em produtividade. Tecnologias como a utilização de sensoriamento remoto, associadas a sistemas de posicionamento global e informações geográficas, estão desempenhando um papel fundamental na gestão do agronegócio, uma vez que no campo da agricultura podem ser utilizadas para as mais variadas atividades, tais como, estimativa de área cultivada, monitoramento do desenvolvimento das culturas, detecção do estresse da cultura, estimativa da umidade do solo, avaliação da fertilidade do solo, detecção de doenças e infestação de pragas, monitoramento de condições de seca e inundação, estimativa de produtividade estimativa, previsão do tempo, agricultura de precisão, entre outras (SHANMUGAPRIYA et al., 2019).

De acordo com MUTANGA et al. (2017), o sensoriamento remoto é uma ciência de extrema importância para a agricultura, devido a auxiliar no planejamento das culturas agrícolas, ao quantificar parâmetros agrônômicos com ótimo custo-benefício, a partir de informações georreferenciadas com monitoramento simultâneo nas áreas avaliadas.

O desenvolvimento das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS) surgiu como uma importante ferramenta na agricultura de precisão, compreendendo aeronaves que são autônomas, semiautônomas ou remotamente operadas. Sua utilização e aplicabilidade na agricultura está atrelada, principalmente, à redução do custo, ao tamanho dos equipamentos e pela otimização da produção (JORGE & INAMASU, 2014).

O monitoramento de campo durante o ciclo dos cultivos agrícolas ou em datas posteriores à colheita, a partir de mosaicos aéreos agrícolas possibilitam alternativas para o planejamento das atividades, além de um diagnóstico preciso da área de cultivo (LEBOEUF, 2000).

Com dados adquiridos nos levantamentos aéreos, podem ser elaborados mapas de recomendações, como por exemplo, de descompactação, fertilidade e aplicação de insumos em taxa variável, controle de pragas, doenças e queimadas, deficiência hídrica, entre outros (LELONG et al., 2008; JORGE; INAMASU, 2014).

2.3.1 Aplicações de Termografia e Índices Espectrais no Monitoramento Agrícola

A termografia é uma técnica que permite detectar a radiação infravermelha emitida por superfícies, transformando-a em imagens visíveis chamadas termogramas. Essas imagens

fornece informações sobre a temperatura e as características térmicas das superfícies analisadas. Entre as tecnologias de sensoriamento remoto, a termografia tem potencial para aplicações diversas na agricultura e no estudo da fisiologia vegetal (BESSA, 2021). Ela é especialmente útil para estimar o estresse hídrico em plantas, ao monitorar a temperatura da copa vegetal (MERON et al., 2013).

A crescente preocupação global com a escassez de recursos hídricos e os altos custos associados à irrigação na agricultura reforça a importância de tecnologias avançadas para otimizar o uso da água. Assim, o monitoramento em tempo real torna-se essencial para aumentar a eficiência da produção agrícola, maximizando o rendimento por unidade de água aplicada (HAN et al., 2018; WANG et al., 2005).

Nesse contexto, a termometria infravermelha, uma técnica não destrutiva e complementar à termografia, oferece grande potencial. Baseada no princípio de que materiais com propriedades termofísicas diferentes produzem assinaturas térmicas distintas, as quais podem ser detectadas por sensores infravermelhos, como câmeras térmicas. Essa técnica pode auxiliar no gerenciamento preciso da irrigação, permitindo o monitoramento contínuo do estado hídrico das culturas, ao integrar informações sobre a umidade do solo e as condições climáticas (CASTANEDO et al., 2013).

Após um mapeamento detalhado de um vinhedo na Austrália, com aplicações de dados de sensores remotos para a viticultura, revelaram quais as áreas apresentaram maior potencial de qualidade e as de menor vigor, assim planejando quais uvas colher e vinificar separadamente, para obter vinhos de preço diferenciado e agregando valor à produção (BRAMLEY & PROFFITT, 1999; BRAMLEY 2009).

Sob estresse de doença, a vegetação exibe diferentes níveis de modificações estruturais internas, que levam a um declínio da reflectância espectral na faixa do infravermelho próximo, onde estas características espectrais são a base para o sensoriamento remoto de vegetações estressadas por doenças (WANG et al., 2010).

Diferenças nas respostas espectrais a clorose, como o amarelecimento das folhas e da redução da área foliar, causadas por insetos podem ser verificadas, correlacionadas e interpretadas, a partir do monitoramento utilizando sensoriamento remoto (FRANKLIN, 2001). Pragas e doenças podem provocar tensões fisiológicas e modificações físicas na vegetação, por exemplo, o amarelecimento (diminuição do pigmento vegetativo) ou então clorose e necrose expressas por danos nas células, entre outros (PEIJUN et al., 2010).

Sensores especiais acoplados a plataformas aéreas, terrestres e orbitais, como drones, aviões e satélites, capturam dados que permitem determinar uma vasta gama de parâmetros

biofísicos e bioquímicos, assim como a dinâmica da vegetação e do solo exposto (MOREIRA et al., 2020; ZENG et al., 2022). Esses dados são essenciais para identificar áreas de plantio afetadas por estresses como pragas, doenças e deficiências nutricionais (ANDRADE et al., 2019).

A partir da utilização de índices espectrais, que integram duas ou mais bandas espectrais baseadas em imagens de sensoriamento remoto, é possível avaliar e caracterizar a cobertura vegetal, destacando determinadas características (LOPES & REYNOLDS, 2012; POTGIETER et al., 2017).

Os índices de vegetação, por exemplo, permitem quantificar a reflectância das plantas, definindo a taxa fotossintética do vegetal e levando em consideração diferentes coberturas vegetais. Normalmente, esses índices utilizam comprimentos de onda da faixa do infravermelho próximo (NIR) e do visível (MOREIRA et al., 2020; SHIRATSUCHI et al., 2014).

Alguns dos índices que são objeto de estudo da presente pesquisa:

- Green-Red Vegetation Index (GRVI):

O GRVI varia de -1 a 1, com valores maiores indicando uma vegetação mais saudável e densa, enquanto valores menores podem sugerir áreas com vegetação menos desenvolvida ou sob estresse. É um indicador eficaz para a coloração das folhas e é sensível à mudança nas cores visíveis do dossel (MOTOHKA et al., 2010).

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI):

O NDVI é amplamente utilizado em estudos de vegetação e foi criado por Rouse et al. (1973). Esse índice varia entre -1,0 e +1,0, sendo vantajoso para análises comparativas. O NDVI está diretamente relacionado à capacidade fotossintética e ao estresse hídrico (HUETE et al., 2006; FURLANETTO & SILVA, 2017).

- Red Edge Ratio:

O Red Edge Ratio, calculado como a razão entre a reflectância na banda do red edge e a banda vermelha, é um indicador eficiente para identificar mudanças na estrutura foliar e na pigmentação das plantas (BALLESTER et al., 2013). Estudos recentes demonstram sua eficácia em monitorar a cobertura vegetal e detectar estresse hídrico (HASSANI et al., 2023; MOREIRA et al., 2019).

- Crop Water Stress Index (CWSI):

O CSWI, desenvolvido por Jackson (1981), é utilizado para avaliar o estresse hídrico nas culturas agrícolas. Este índice é baseado na temperatura da superfície das plantas em relação à temperatura do ar, sendo eficaz para monitorar o uso da água e identificar áreas de estresse hídrico.

A integração desses índices permite uma avaliação abrangente e precisa da condição das culturas agrícolas.

2.3.2 Monitoramento do Estresse Hídrico por Índices Espectrais em Culturas Agrícolas

As demandas de água da planta variam conforme a fase de desenvolvimento e as condições climáticas, como temperatura, umidade e vento. Em situações de déficit hídrico, a planta absorve água do solo, mas, para reduzir a perda, fecha seus estômatos, o que resulta em alterações fisiológicas, como redução da transpiração, diminuição da taxa de fotossíntese e aumento da temperatura foliar. Esse aumento da temperatura da planta reflete a regulação estomática para limitar a transpiração durante o estresse hídrico, enquanto a disponibilidade de água favorece a transpiração, resfriando o tecido foliar (LABBÉ S. et. al., 2012).

A relação entre o estado hídrico da planta e sua interação com a luz solar pode ser explicada por meio da assinatura espectral. Quando a luz solar incide sobre um objeto, ela pode ser refletida, absorvida ou transmitida para camadas mais profundas. A assinatura espectral de um objeto, que corresponde à reflectância (proporção da radiação refletida em relação à radiação incidente, expressa em %) em função do comprimento de onda, é uma ferramenta essencial para diferenciar superfícies e monitorar a vegetação (LABBÉ S. et. al., 2012).

De modo geral, a vegetação apresenta uma assinatura espectral característica, com baixa reflectância no espectro visível (devido à forte absorção pelos pigmentos foliares), alta no infravermelho próximo (sensível à quantidade de biomassa) e variada no infravermelho médio (influenciada principalmente pelo teor de água no dossel) (LABBÉ S. et. al., 2012).

Portanto, tanto a temperatura das folhas quanto a assinatura espectral refletem as condições hídricas da planta, servindo como indicadores para monitorar o impacto do déficit hídrico em diferentes ambientes e fases de crescimento (LABBÉ S. et. al., 2012).

A temperatura do dossel (T_c) das culturas pode ser aferida por termômetros infravermelhos, que auxiliam no diagnóstico do estresse hídrico em culturas (GONZALEZ-DUGO et al., 2020; DEJONGE et al., 2015). Por muito tempo, ela tem sido utilizada para monitorar o estresse hídrico das culturas (GARDNER et al., 1981), como parâmetro de entrada para calcular diferentes índices de estresse (DEJONGE et al., 2015; IDSO et al., 1981;

JACKSON et al., 1981). O mais comum dos índices derivados da temperatura do dossel (T_c) é o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI), (IDSO et al., 1981; JACKSON et al., 1981; JACKSON et al., 1988).

Diversas pesquisas têm sido realizadas utilizando o índice de estresse hídrico para diferentes culturas, dado que o monitoramento do estado hídrico do solo e das plantas é crucial para o manejo adequado da irrigação (ALVINO & MARINO, 2017).

Com o objetivo de determinar o índice CWSI no tomate (Híbrido 'BRS Sena') a partir de métodos empíricos e teóricos, em função das lâminas de irrigação aplicadas por gotejamento subsuperficial em um Latossolo no sul de Goiás, constatou-se que o CWSI foi um bom indicativo para avaliar o estado hídrico e auxiliar na tomada de decisão na manutenção da irrigação, concluiu-se que, quanto maior o índice CWSI, menor o rendimento do 'BRS Sena' (SILVA et al., 2018).

Durante dois anos consecutivos, 2009 e 2010, um estudo comparou as temperaturas obtidas com um termômetro infravermelho na determinação do CWSI em videiras (com e sem restrições hídricas) com imagens térmicas de um veículo aéreo não tripulado. Foi possível observar boas correlações entre o potencial de água nas folhas e o índice de estresse hídrico da videira, em ambas as situações, mostrando que o método é eficiente na determinação da variabilidade do estresse hídrico (BELLVERT et al., 2014).

Uma das várias aplicações do sensoriamento remoto está na mensuração do déficit hídrico das plantas, que podem ser estimadas pelos índices espectrais. Mapas com parâmetros biofísicos podem ser confeccionados por meio de relações empíricas ou modelados utilizando estes índices, tais como, biomassa, área foliar, cobertura do solo, informações sobre evapotranspiração, este último destaca-se pela utilização da região do espectro eletromagnético do infravermelho (JENSEN, 2009; EPIPHANIO et al., 1996).

O CWSI é um bom indicador do estado hídrico da lavoura cafeeira e pode substituir as medições de potencial hídrico foliar (LWP) na câmara de Scholander. Por meio de uma imagem aérea de uma área cultivada, é possível estimar a variabilidade espacial do potencial hídrico na copa da planta de café (COSTA et al., 2020).

Para calcular o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI) diferentes abordagens podem ser empregadas, mensurando temperaturas tanto no dossel estressado, como não estressado e/ou para o tratamento direcionado, bem como as temperaturas do dossel artificial (superfícies que imitam o potencial de transpiração do dossel real em estudo). Os métodos são diferentes com base em como os limites superior e inferior serão determinados (KATIMBO et al., 2022).

Utilizando imagens térmicas geradas a partir de RPAS, na avaliação do estado da água de plantas de soja no estado do Paraná foi verificado que o déficit hídrico foi mais prejudicial à produtividade quando induzido na fase reprodutiva e que a utilização de câmeras termográficas infravermelhas de UAV tem potencial para monitorar o estado da água em plantas de soja, bem como coletar informações não destrutivas que auxiliam nas decisões para o manejo da cultura (CRUSIOL et al., 2020).

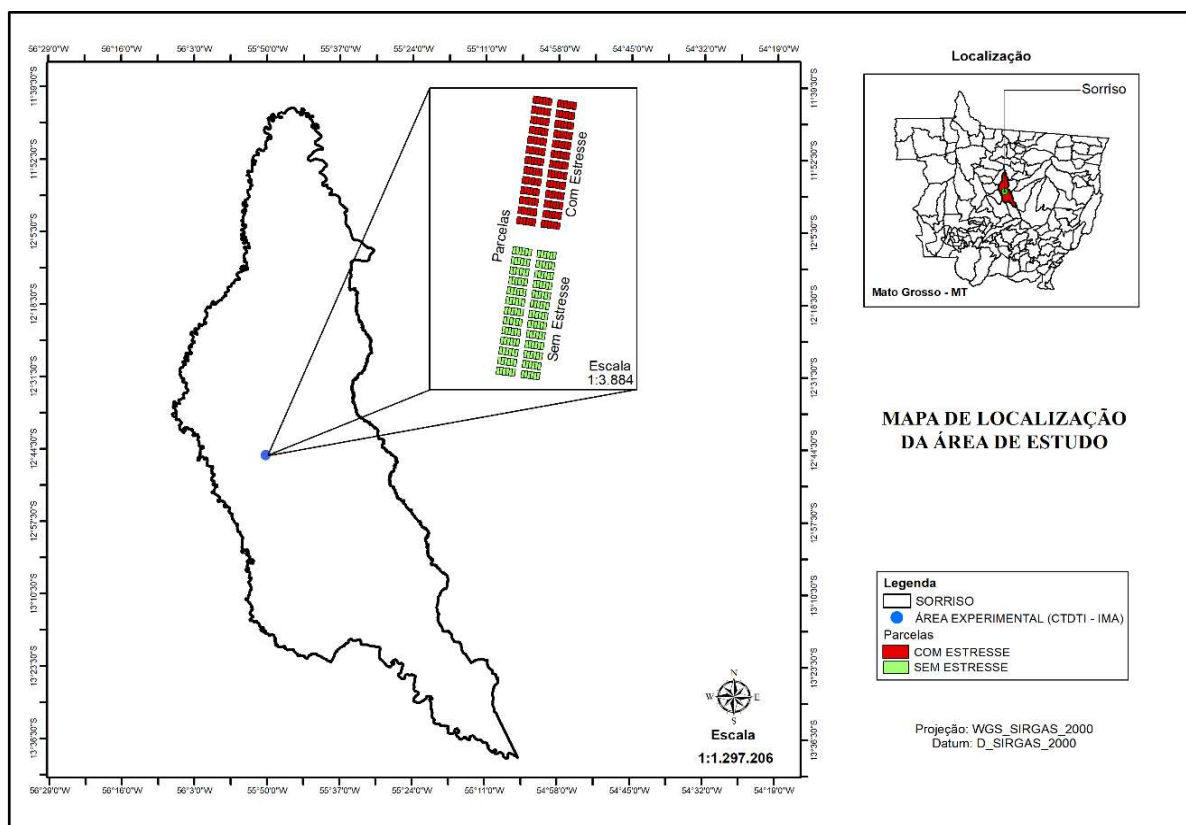
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Região agrícola do médio norte de MT

A área de estudo está situada na região algodoeira no médio norte do estado de Mato Grosso, município de Sorriso, mais precisamente na unidade de pesquisa do Centro de Treinamento e Difusão Tecnológica do Instituto Mato-grossense do Algodão (CTDTI) – Núcleo Regional Norte do Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA), localizado na margem esquerda da BR-163, Km 726, entre Lucas do Rio Verde e Sorriso (Fig. 3).

Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O local do experimento está inserido na microbacia do Ribeirão Grande, afluente do rio Teles Pires, que por sua vez, integra a bacia do rio Amazonas (SEPLAN-MT, 2000).

A altitude média da região é de 350 metros e apresenta um relevo predominantemente plano da Chapada dos Parecis, com coberturas não dobradas do fanerozóico da bacia quaternária do Alto Xingu (SEPLAN, 2000). O solo presente da área experimental foi categorizado como Latossolo Vermelho-Amarelo (SEPLAN, 2004). Esta categoria de solo é caracterizada por apresentar uma boa capacidade de drenagem e homogeneidade em suas propriedades ao longo do perfil, devido ao fato de serem solos muito intemperizados e profundos (IBGE, 1999).

Quanto ao clima da região, é classificado como subtropical continental úmido, com temperatura média anual de 24°C e precipitação pluviométrica de 2.250 mm. É caracterizada por uma estação seca bem definida de quatro meses, de maio a agosto, enquanto os meses de setembro a abril apresentam chuvas, concentradas principalmente de novembro a março (MAITELLI, 2005; TARIFA, 2011).

3.1.2 Características da Área Experimental

O CTDTI possui diversas subáreas de experimentos *in situ*. Os dados dessa pesquisa se referem a um experimento de estresse hídrico induzido, onde foi realizado o monitoramento do comportamento fisiológico e de produtividade de diferentes variedades de algodão. O principal objetivo do IMA através desse experimento é identificar as variedades com maior tolerância ao déficit de água e avaliar o grau de interferência do estresse hídrico sobre a produtividade destes genótipos.

A área experimental foi implementada pela IMA, considerando sugestões da equipe técnica multidisciplinar do IFMT/UFMT, e monitorada por três anos consecutivos, entre 2018 e 2020. A área foi dividida em duas partes: uma com irrigação controlada de maneira contínua ("Sem Estresse") e outra onde a irrigação foi interrompida por um período para induzir o estresse hídrico nas plantas ("Com Estresse") (Fig. 4). Nesse estudo foram avaliados somente dados de 2019, ano para o qual foram adquiridas imagens de melhor qualidade durante os períodos de estresse induzido.

Foram comparadas 39 variedades da cultura do algodão, das quais 30 são experimentais (numeradas de 1 a 30) e 9 são comerciais (numeradas de 31 a 39). Por razões de confidencialidade, a instituição responsável não divulgou as identidades dos materiais genéticos, referindo-se a cada variedade apenas pelo número correspondente. Porém, os dados

espectrais referentes às parcelas 6 e 24 foram excluídos, pois essas variedades não se desenvolveram, sendo assim, das 39 variedades, somente 37 foram analisadas.

Figura 4 - (a) Plantas não estressadas; (b) Plantas estressadas; (c) No detalhe, instrumento de irrigação (pivô arrasto) e; (d) Imagem da área do experimento demonstrando os blocos estressado e não estressado.



Fonte: Souto, 2022.

Cada uma das 39 variedades foi plantada em 8 parcelas, totalizando 312 parcelas identificadas e catalogadas *in situ*. Cada parcela é composta por 4 linhas de plantio, com fileiras de 0,76 m de largura e 7 m de comprimento. Das 8 parcelas de cada variedade, metade (4) recebeu irrigação contínua, caracterizando a área "Sem Estresse", enquanto a outra metade teve a irrigação interrompida por um período, submetendo as plantas ao estresse hídrico, caracterizando a área "Com Estresse".

De acordo com informações cedidas pela equipe técnica do IMA, a área foi irrigada três vezes por semana, aplicando-se uma lâmina de água de aproximadamente 15 mm em cada irrigação. O sistema de irrigação utilizado foi do tipo linear auto propelido LBU (Linear Barra Única), por aspersão, equipado com uma mangueira de 3.020 metros de comprimento. Durante o ensaio, a velocidade média de deslocamento foi de 80 metros por hora (SOUTO, 2022).

Figura 5 - (a) Área experimental de estresse hídrico com suas respectivas parcelas; (b) Parcela em detalhe de uma variedade de algodão com suas 4 respectivas linhas de plantio; (c) No detalhe, a codificação de identificação da parcela fixada em uma das plantas.



Fonte: Souto, 2022.

O experimento foi conduzido em um relevo plano, com inclinações máximas abaixo de 3%, sobre um Latossolo com 60% a 65% de argila. A área foi corrigida com KCl 60, aplicando-se 1t/ha, elevando o pH de 4.2/4.5 para cerca de 5.5. Após o plantio foi adubado com o produto Mape 44% Phos, 9-11 SO₂.

Com o objetivo de criar um ambiente controlado, o experimento buscou monitorar sistematicamente o comportamento fisiológico e a produtividade das variedades de algodão, correlacionando esses aspectos com suas características de reflectância espectral e emissão térmica.

Para induzir o estresse hídrico, o plantio foi realizado de forma tardia, fora do período de chuvas mais intensas, de modo que a floração ocorresse no final de maio e início de junho. Esta estratégia, adotada pelo IMA, permitiu que o cultivo fosse irrigado, proporcionando maior controle nos cálculos de balanço hídrico (SOUTO, 2022).

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos consistiram em cinco etapas principais listadas em seguida (I-V) e detalhadas nos itens 3.2.1-3.2.7.

- (I) Atividades de Campo – Planejamento das atividades; campanhas de aquisição de imagens; coleta de dados de produtividade.
- (II) Pré-processamento das Imagens – Espacialização de blocos e parcelas, correções geométricas e radiométricas.

- (III) Classificação Fisionômica das Culturas – Análise visual a partir de fotografias das variedades e classificação segundo os parâmetros elencados na tabela 4.
- (IV) Procedimentos Prévios e Cálculo dos Índices Espectrais – Segmentação das imagens, extração e “filtragem” dos dados espectrais, cálculo dos índices termais e espectrais.
- (V) Análises estatísticas - Etapa em que são realizadas as estatísticas dos conjuntos de dados consolidados.

É importante enfatizar que, o desenvolvimento desta pesquisa, somente foi possível a partir de experiências de campo já adquiridas e relatadas no estudo de Souto (2022).

A equipe envolvida no projeto do Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA), em parceria com o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT) e a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), realizou o planejamento das atividades de campo, as campanhas de aquisição de imagens e a coleta do algodão (Item I). A maior parte do pré-processamento das imagens, especificamente as correções geométricas e radiométricas e a mosaicagem (Item II) foram realizadas por membros da equipe da IFMT.

Portanto, os itens 3.2.1 (Atividades de campo) e 3.2.2 (Pré-processamento das Imagens), foram descritos no presente trabalho, para fins de contextualização e para que o leitor possa ter uma melhor compreensão acerca da aquisição dos dados analisados.

3.2.1 Atividades de Campo

3.2.1.1 Planejamento das Atividades de Campo

Nesta etapa foram preparadas as campanhas de aquisição de imagens. Isso inclui a preparação e teste dos sistemas RPAS, utilização de softwares para planejamento de voo, preparo de equipamentos e material utilizado em trabalhos de campo (Receptores GPS L1/L2, infiltrometro, etc.) e a definição das datas/horários dos voos em função da previsão de tempo. Totalizou mais do que 20 campanhas entre 2018 e 2020.

A primeira etapa referente à aquisição das imagens e de trabalhos de campo correlatos (3.2.2), foi realizada por pesquisadores da IFMT e UFMT, sem participação efetiva da autora desta tese. Maiores detalhes dessa etapa e da etapa 3.2.2 são expostas na tese de doutoramento de Souto (2022).

3.2.1.2 Aquisição de imagens multiespectral e termográfica

Esta etapa inclui a implementação do sistema VANT e a aquisição de imagens multiespectral e termográfica.

A implementação e exploração de RPAS em *Smart Farming* não tem sido tão robusta quanto o esperado, existem desafios na seleção e utilização das tecnologias adequadas, especialmente no que diz respeito à aquisição de dados e processamento de imagens (TSOUROS et al., 2019). Os sistemas de SR com RPAS para estudos científicos são complexos, exigindo componentes eletrônicos e mecânicos sofisticados (COLOMINA & MOLINA, 2014).

A escolha dos sensores é limitada pela capacidade de carga, pelas restrições de tamanho e o principal, pela capacidade de capturar imagens de alta resolução (TSOUROS et al., 2019).

Os sistemas empregados neste estudo foram adquiridos em 2017, com os recursos de um projeto financiado pela SETEC-CNPQ. As duas plataformas são hexacópteros da marca DJI, sendo um modelo Matrice 600 e outro Matrice 600-PRO. Na plataforma Matrice 600-PRO foi implementado um sistema Gimbal da marca Ronin-MX (Figura 6).

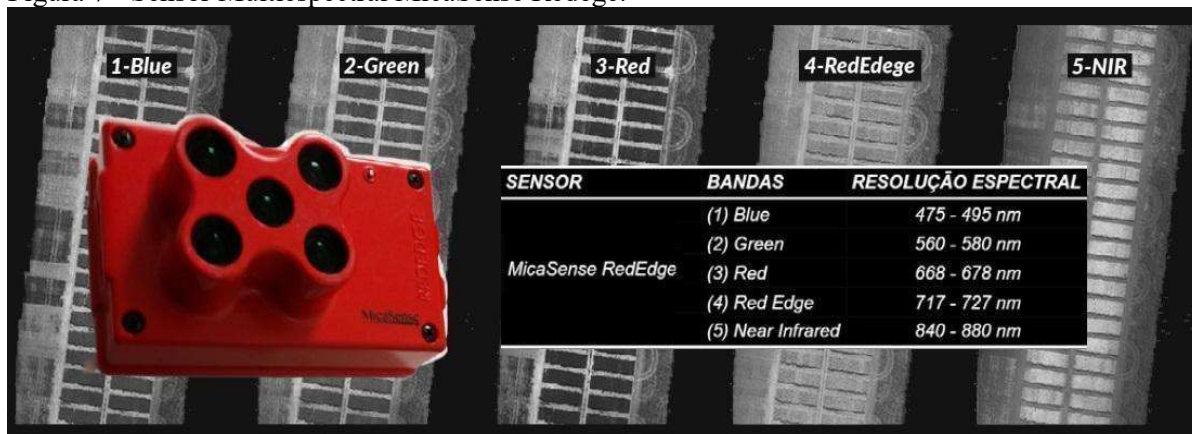
Figura 6 - Matrice 600 (a); Matrice 600-PRO (b) e; no detalhe, Gimbal Ronin-MX (c).



Fonte: SOUTO, 2022.

Foi adquirido um sensor multiespectral da marca MicaSense, modelo RedEdge de 5 (cinco) canais/bandas, para o registro de reflectância dos alvos (Figura 7).

Figura 7 - Sensor Multiespectral MicaSense RedEdge.



Fonte: SOUTO, 2022.

Para o monitoramento termográfico foi utilizado um sensor da marca Flir (disponibilizado pelo grupo de pesquisa GeoHidro-UFMT), modelo T-420 (Fig. 8), com resolução 320 x 240 pixels e registro na faixa espectral de 7,5 a 13 μm (FLIR, 2013).

A implementação, configuração e aperfeiçoamento deste sistema foi realizada por pesquisadores e colaboradores (com expertise na área de eletrônica) do projeto “Monitoramento de Fitoparasitas e Estresse Hídrico, com uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas e SR Multissensorial, na cultura de Algodão em Mato Grosso”, uma parceria entre o IFMT, IMA e a UFMT, na qual esta pesquisa/tese está inserida.

Figura 8 - Sensor Termográfico marca Flir, modelo T-420.



Fonte: SOUTO, 2022.

Foram adquiridas mais de 20 imagens termais e multiespectrais. Análises prévias realizadas pela equipe do IFMT/UFMT indicaram uma alta sensibilidade, devido a interferência atmosférica, especialmente nas imagens termais. O horário dos sobrevoos foi cuidadosamente definido para minimizar os efeitos das sombras causadas pela inclinação solar sobre os objetos.

Os sobrevoos com o sensor multiespectral foram realizados às 10:00 horas, mantendo uma resolução espacial (GSD) de 5 cm.

Sendo assim, foram selecionadas para a realização da presente pesquisa e para o cálculo dos índices as imagens demonstradas na tabela 3.

Tabela 3 - Imagens selecionadas para o cálculo dos índices espectrais.

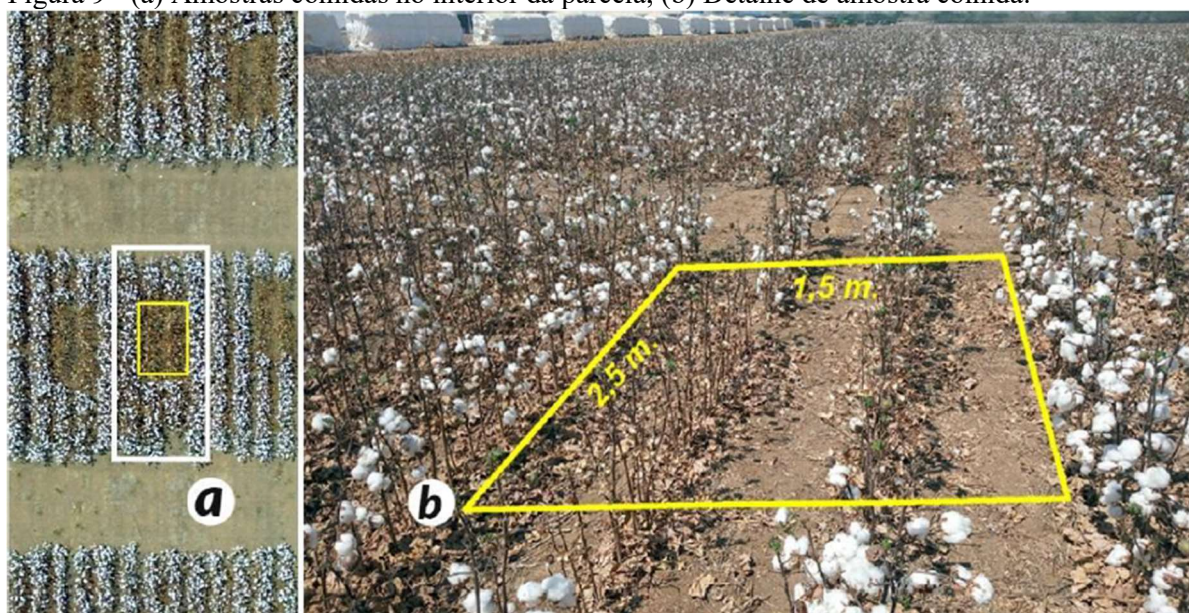
CAMPO	DATA	LOCAL	SENSOR	GDS (cm)	HOR. VOO
19.1	06/06/2019 (F)	Sorriso-MT	Multiespectral	5	10:00
	07/06/2019 (F)	Sorriso-MT	Termal	20	10:00
19.3	14/07/2019 (AC)	Sorriso-MT	Termal	15	10:00
	15/07/2019 (AC)	Sorriso-MT	Multiespectral	5	10:00

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.3 Produtividade

Técnicos da IMA realizaram a colheita manual das plumas em cada parcela, onde foram coletadas amostras retangulares de 2,5 x 1,5 metros. Essas amostras foram pesadas em quilogramas e a produtividade foi calculada em peso/ha por amostra/parcela, permitindo a avaliação das variedades sob condições sem e com estresse hídrico.

Figura 9 - (a) Amostras colhidas no interior da parcela; (b) Detalhe de amostra colhida.



Fonte: SOUTO, 2022.

Essa abordagem objetivou reduzir os possíveis efeitos da borda das parcelas e de forma que os dados de produtividade pudessem ser correlacionados com os dados espectrais (SOUTO, 2022).

3.2.2 Pré-processamento das Imagens

Nesta etapa são resumidos os procedimentos de processamento das imagens para correções geométricas e radiométricas.

Embora as câmeras dos drones possuam um sistema mecânico de compensação (*gimbel*), a instabilidade relativa dos drones multirotores, devido às rajadas de vento, pode causar distorções geométricas e radiométricas nas imagens capturadas.

As correções geométricas foram realizadas usando coordenadas obtidas por meio de Global Navigation Satellite System (GNSS) geodésico em pontos de controle adquiridos no local. Isso permitiu o registro e a projeção das imagens em um sistema de coordenadas plano, utilizando o sistema UTM no fuso 21S com o Datum Sirgas 2000, conforme descrito por Souto (2022).

Foi realizada uma seleção manual das imagens das 5 bandas da câmera Micasense/RedEdge para descartar aquelas com distorção visual ou cobertas por nuvens. Em seguida, as imagens do Painel Calibrador de Refletância (CRP) foram utilizadas para correção radiométrica e calibração de cada banda (SOUTO, 2022).

Além disso, o pré-processamento das imagens multiespectrais e termal incluiu outros procedimentos, como de mosaicagem, realizados no programa de aerofotogrametria Pix4D Map (PIX4D, 2021). Mais detalhes desta etapa foram descritos por Souto (2022).

3.2.3 Classificação Fisionômica das Culturas

A fim de realizar uma categorização com base nas características físicas externas visíveis, que incluíram aspectos como forma, tamanho, estrutura e aparência geral. A classificação fisionômica foi utilizada para distinguir os diferentes tipos de variedades.

Realizou-se então, uma classificação visual, analisando e comparando fotos da vegetação de cada parcela, para cada variedade, segundo os seguintes critérios adotados (Tabela 4). Inicialmente foram diferenciadas três classes de altura das variedades. Para as análises estatísticas, as classes “média” e “alta” foram agregadas em uma única classe “alta”.

Tabela 4 - Critérios para a classificação visual das culturas.

CRITÉRIOS		
DENSIDADE DO DOSSEL		
FECHADO	SOLO EXPOSTO	
		
ALTURA		
ALTA (agregado)	MÉDIA (agregado)	BAIXA
		
ESTRUTURA		
DISFORME	LOSANGO	QUADRADA
		

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4 Cálculo dos Índices Espectrais

Para o cálculo dos índices espectrais, as imagens foram inicialmente segmentadas, em seguida foi realizada a “filtragem” dos dados espectrais e calculados os índices termais e espectrais, com o objetivo de avaliar a detectabilidade do estresse hídrico nas plantas.

3.2.4.1 Segmentação e Extração de Assinaturas Espectrais

A segmentação é o procedimento pelo qual são criados segmentos distintos e não sobrepostos, representados como polígonos, que agrupam pixels com características homogêneas e semanticamente significativas (BLASCHKE, 2010).

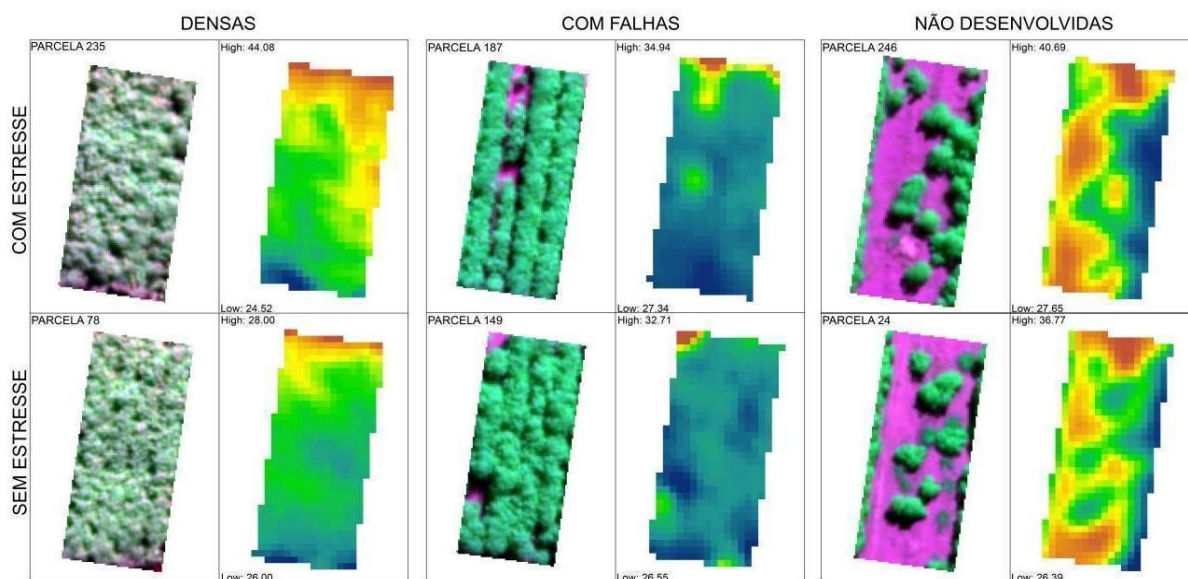
Neste estudo, as análises estatísticas exploratórias e inferenciais foram realizadas levando em consideração a independência das amostras. Portanto, objetivando incluir nas análises estatísticas somente segmentos representativos, ou seja, com cobertura vegetal completa e excluir interferências de eventuais efeitos de sombreamento ou clareiras no plantio, foi realizada uma segmentação prévia (ArcMap), para cada conjunto de imagens multiespectrais e termal, seguida da extração dos valores espectrais do centroide de cada segmento. Essa abordagem deve reduzir os erros na análise posterior das assinaturas multiespectrais e térmicas.

3.2.4.2 Filtragem dos Dados Espectrais

Após a segmentação, realizou-se a extração dos dados a partir dos valores espectrais do centroide de cada segmento. Considerando que diversas parcelas na área do experimento continham falhas no dossel/solo exposto, constatou-se a necessidade de realizar um procedimento de filtragem dos dados antes das análises estatísticas.

Nesse procedimento, as parcelas foram subdivididas ou classificadas em: “Parcelas densas”, “Parcelas com falhas” e “parcelas que não se desenvolveram” (Figura 10).

Figura 10 - Exemplificação de parcelas densas, com falhas e não desenvolvidas sem e com estresse hídrico em imagens multiespectrais e termais (Floração).



Fonte: Elaborado pelo autor.

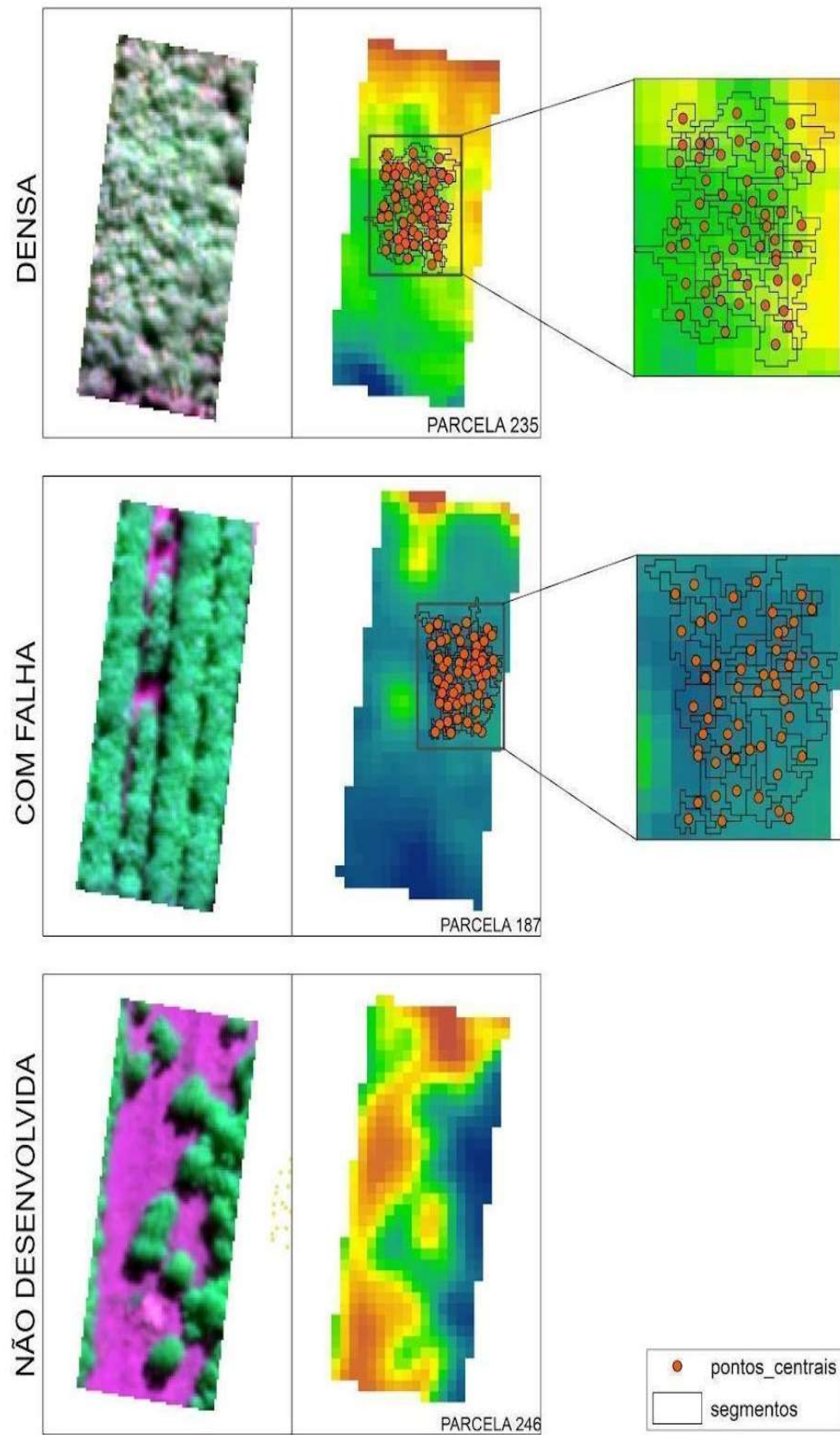
As parcelas “densas” são aquelas das quais utilizamos os dados integrais, extraídos a partir dos pontos centrais dos segmentos. Já as parcelas “com falhas” nós utilizamos os dados extraídos apenas dos pontos que estavam sobre a parte densa dessa parcela e as parcelas “não desenvolvidas” são exemplos de parcelas que nós retiramos os dados da planilha antes de plotar os gráficos.

A figura 10 demonstra cada tipo de parcela, em imagens multiespectrais e termais, segundo a classificação realizada. Observa-se que as parcelas densas, com falhas e não desenvolvidas, foram subdivididas entre “sem estresse” e “com estresse”.

Dessa forma, Além de ser possível observar como as parcelas foram classificadas/diferenciadas, também possibilita comparar as áreas densas (por exemplo), entre uma imagem termal (ou multiespectral), de uma parcela “com estresse” ou “sem estresse”.

A figura 11 demonstra a segmentação e os pontos centrais, de onde foram extraídos os dados das imagens para as parcelas “densas”, “com falhas” e “não desenvolvidas”. Sendo que, as parcelas “não desenvolvidas” estão sem pontos porque nós “filtramos”, ou seja, excluimos esses dados da tabela, já que o solo estava exposto. Os dados excluídos se referem as parcelas 6 e 24, portanto, das 39 variedades, somente 37 foram analisadas.

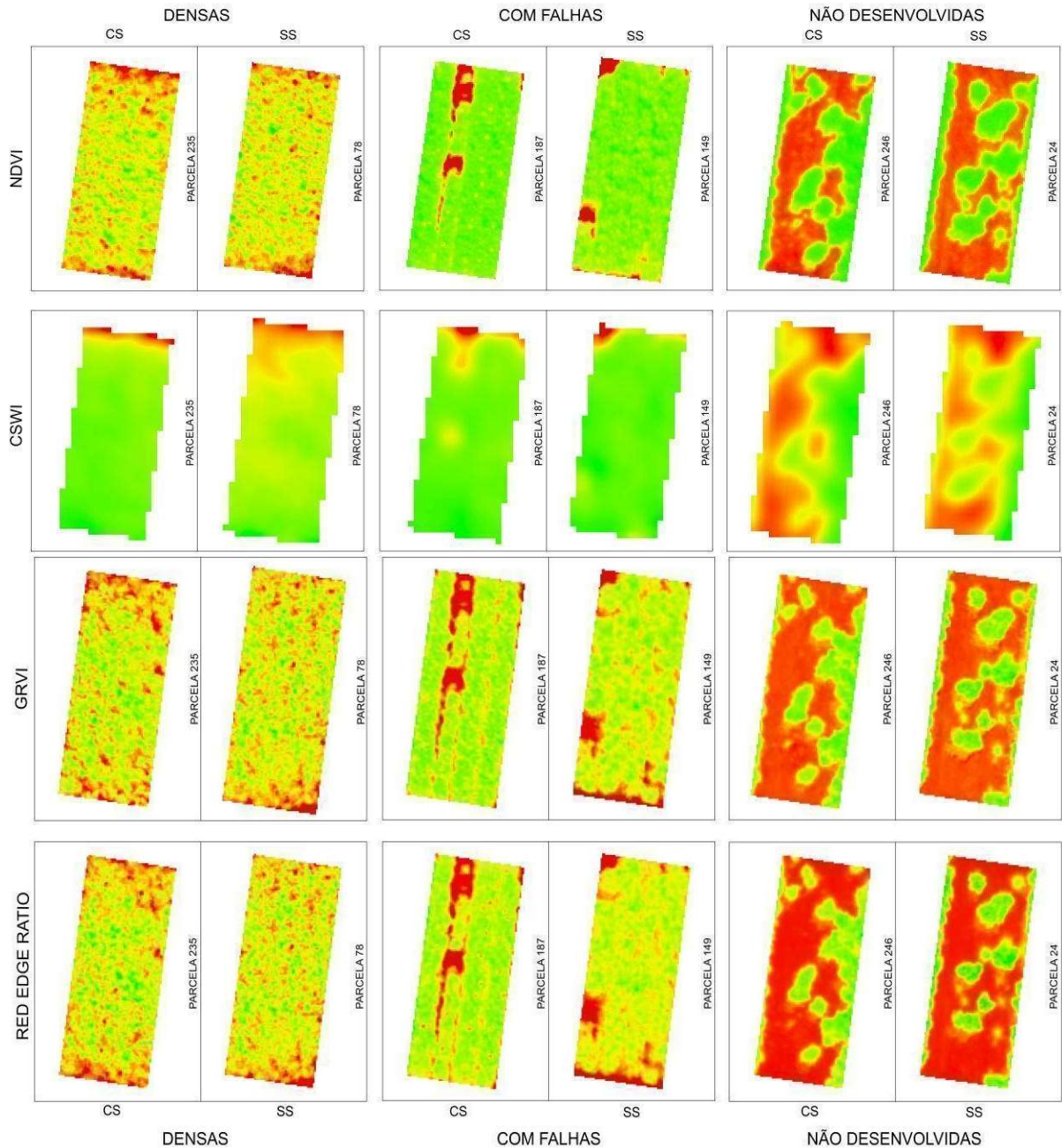
Figura 11 - Demonstração dos segmentos e centroides em parcela densa, com falha e não desenvolvida (Floração).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a figura 12 demonstra imagens de todos os índices (NDVI, CSWI, GRVI e Red Edge Ratio) entre parcelas estressadas e não estressadas para as áreas densas, com falhas e não desenvolvidas.

Figura 12 - Imagens dos índices entre parcelas estressadas e não estressadas para as áreas densas, com falhas e não desenvolvidas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4.3 Cálculo dos índices termais e espectrais

Foram seleccionados os índices NDVI, GRVI, RED EDGE RATIO e CWSI para avaliar o estresse hídrico no algodão com base nas conclusões de Ballester et al. (2019), que analisaram esses índices e concluíram que os mesmos foram eficazes em monitorar os efeitos do estresse hídrico em algodoeiros na Austrália.

Tabela 5 - Índices espectrais.

ÍNDICES	EQUAÇÃO	REFERÊNCIA
NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$NDVI = (R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + R_R)$	Rouse et al. (1974)
GRVI (<i>Green-Red Vegetation Index</i>)	$GRVI = (R_G - R_R) / (R_G + R_R)$	Tucker (1979)
RED-EDGE RATIO	$RED-EDGE RATIO = RE/R$	Ballester et al. (2013)
CWSI (<i>Crop Water Stress Index</i>)	$*(T_c - T_{wet}) / (T_{dry} - T_{wet})$	Jackson et al. (1981)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O GRVI foi incluído devido à sua sensibilidade a mudanças na estrutura da copa e no teor de verde, que indicam alterações associadas ao estresse hídrico. Já o Red Edge Ratio foi escolhido por sua capacidade de detectar variações no teor de clorofila, cuja redução pode sinalizar déficit hídrico prolongado.

O NDVI foi utilizado para complementar essa análise, pois é amplamente empregado para avaliar a condição de vegetação e vigor das plantas, permitindo um panorama adicional sobre a resposta do algodoeiro ao ambiente.

O CWSI, por sua vez, foi incluído como uma medida mais direta do estresse hídrico, pois se baseia nos dados termais, refletindo o impacto hídrico nas plantas com maior precisão, especialmente em situações de déficit.

Os índices foram calculados através da calculadora raster no ArcMap, 10.8 (ESRI), utilizando as equações conforme detalhado a seguir:

(I) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

O NDVI, desenvolvido por Rouse et al. (1974), é um dos índices de vegetação mais amplamente utilizados. Ele foi calculado pela diferença normalizada entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED), utilizando a fórmula:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_R}{R_{NIR} + R_R}$$

Onde:

R_{NIR} = Reflectância na região do infravermelho próximo.

R_R = Reflectância na região do vermelho.

Valores de NDVI variam de -1 a 1, onde valores mais altos indicam vegetação mais densa e saudável. O NDVI é eficaz para avaliar a biomassa verde e a atividade fotossintética das plantas.

(II) GRVI (Green-Red Vegetation Index):

Proposto por Tucker (1979), o GRVI foi calculado utilizando as bandas do verde (G) e do vermelho (R), conforme a seguinte fórmula:

$$GRVI = \frac{R_G - R_R}{R_G + R_R}$$

Onde:

R_G = Reflectância na região do verde.

R_R = Reflectância na região do vermelho.

Assim como o NDVI, o GRVI é utilizado para avaliar a saúde e a densidade da vegetação. Ambos os índices, NDVI e GRVI, geralmente apresentam comportamentos semelhantes, pois ambos respondem primariamente à quantidade de clorofila nas plantas.

(III) RED EDGE RATIO:

O RED EDGE RATIO, conforme descrito por Ballester et al. (2013), é um índice que compara a radiação refletida na banda da borda vermelha (RED EDGE) com a banda do vermelho (RED). E foi calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$Red\ Edge\ Ratio = \frac{RE}{R}$$

Onde:

RE = Reflectância na região do "red edge" (borda vermelha).

R = Reflectância na região do vermelho.

Este índice é altamente sensível à clorofila e às mudanças na estrutura das folhas, sendo útil para detectar variações sutis na saúde das plantas.

(IV) CSWI (Crop Water Stress Index):

Desenvolvido por Jackson (1981), o CSWI é utilizado para avaliar o estresse hídrico nas plantas. Seguindo as recomendações de Cohen et al. (2015), o CSWI (Crop Water Stress Index) é calculado como uma fração da diferença entre a temperatura do dossel (T_{canopy}) e a temperatura de referência seca (T_{dry}), dividida pela diferença entre a temperatura de referência úmida (T_{wet}) e a temperatura de referência seca (T_{dry}). A temperatura de referência úmida (T_{wet}) é estimada pela média dos 5% dos pixels mais frios na imagem, enquanto a temperatura de referência seca (T_{dry}) é estimada pela temperatura do ar acrescida de 5°C durante o sobrevoo.

$$CSWI = \frac{(T_c - T_{wet})}{(T_{dry} - T_{wet})}$$

Onde:

T_c = Temperatura do dossel.

T_{wet} = é a temperatura de referência úmida, estimada pela média dos 5% dos pixels mais frios na imagem.

T_{dry} = é a temperatura de referência seca, estimada como a temperatura do ar acrescida de 5°C durante o sobrevoo.

Este índice é utilizado para detectar o estresse hídrico nas plantas, com valores mais altos indicando maior estresse.

Os dados de temperatura do ar utilizados foram obtidos da grade global de Reanálise MERRA-2 (M2I1NXLFO), correspondentes à área experimental analisada.

3.2.5 Análises Estatísticas

Após as técnicas de recorte, segmentação, filtragem, cálculo dos índices espectrais, entre outros procedimentos (já detalhados), utilizando o software ArcMap, 10.8 (ESRI), foram confeccionadas duas tabelas “master” que reúnem todas as características das áreas segmentadas “com e sem filtragem”, incluindo médias das assinaturas espectrais e termais, índices espectrais, denominação de variedades, produtividade, classificação fisionômica e características ambientais complementares, como valores de altitude provenientes de Modelo Numérico de Terreno gerado por imagens VANT auxiliares e uma interpolação espacial das taxas de infiltração, baseada em levantamentos in situ realizados pela equipe IFMT/UFMT/ImaMT.

Para as análises estatísticas, foram aplicadas técnicas estatísticas exploratórias e de inferência, utilizando o software R e a interface gráfica RStudio. Foi utilizado também, parcialmente, o software Blue Sky Statistics versão 7.5.

No contexto das estatísticas exploratórias, foi realizada uma análise descritiva dos conjuntos de dados, permitindo identificar os padrões, variações e tendências. Além disso, foram utilizadas técnicas de inferência estatística para realizar comparações entre os grupos de áreas com estresse hídrico e sem estresse hídrico. Sendo assim, foram gerados gráficos de dispersão e gráficos boxplot, que permitem visualizar a distribuição dos dados e identificar possíveis outliers ou padrões de variabilidade. Esses gráficos fornecem uma representação visual dos conjuntos de dados, permitindo uma melhor compreensão de suas características.

Quanto à Regressão Logística, os modelos foram aninhados (“nested”) por tipo de variedade. Modelos de Regressão Logística permitem um ajuste para respostas de categorias múltiplas. No caso, isso se torna necessário pelo fato de diferentes variedades do algodão terem respostas espectrais distintas, já em função das suas características fisionômicas e fisiológicas. As dicotomias aninhadas são estatisticamente independentes, proporcionando uma decomposição aditiva adequada para modelar e testar corretamente as variáveis de respostas politômicas (FOX, 2016).

A utilização de estatísticas exploratórias e de inferência, juntamente com os gráficos boxplot e os resultados da regressão logística, explorando a relação entre os índices de vegetação e a presença de estresse hídrico, permitiram uma análise completa e fundamentada dos conjuntos de dados de assinaturas espectrais e fornecem insights importantes para a compreensão dos padrões e processos relacionados ao estresse hídrico.

3.2.5.1 Comparativo do desempenho dos modelos de Regressão Logística

Foram ajustados modelos de regressão logística univariados e multivariados, explorando diferentes combinações dos índices espectrais para analisar o desempenho preditivo. As métricas utilizadas para comparação dos modelos foram o Akaike Information Criterion (AIC), o pseudo R^2 e a Overall Accuracy (Acurácia Geral - OC):

- AIC (Akaike Information Criterion)

Foi utilizado o AIC, conforme proposto por Akaike (1974), para balancear o ajuste e a complexidade dos modelos. Valores menores de AIC indicam um melhor ajuste com menor complexidade. Essa métrica foi aplicada como critério de comparação entre modelos ajustados aos mesmos dados.

- Pseudo R^2

Para uma avaliação complementar do ajuste dos modelos, utilizamos o pseudo R^2 de McFadden (1973). Diferente do R^2 em regressão linear, o pseudo R^2 não mede a proporção exata da variabilidade explicada, mas oferece uma indicação da capacidade explicativa do modelo.

- OC (Overall Accuracy - Acurácia Geral)

A acurácia geral é uma medida de desempenho do modelo que indica a proporção de classificações corretas em relação ao total de observações. Quanto maior a acurácia geral, melhor o modelo, pois indica uma melhor capacidade de prever corretamente as classes. O valor da Acurácia Geral (Overall Accuracy - OC) varia de 0 a 1, quanto mais próximo de 1 for o valor de OC, melhor é o desempenho do modelo, indicando uma maior proporção de previsões corretas em relação ao total de observações.

Para identificar os modelos com melhor desempenho geral, normalizamos os valores de AIC, Pseudo R^2 e OC em uma escala de 0 a 1 e, em seguida, calculamos a pontuação média normalizada para cada modelo. Esse procedimento permitiu uma comparação mais justa, ao considerar pesos iguais para cada métrica, e facilitou a classificação dos modelos de acordo com seu desempenho combinado.

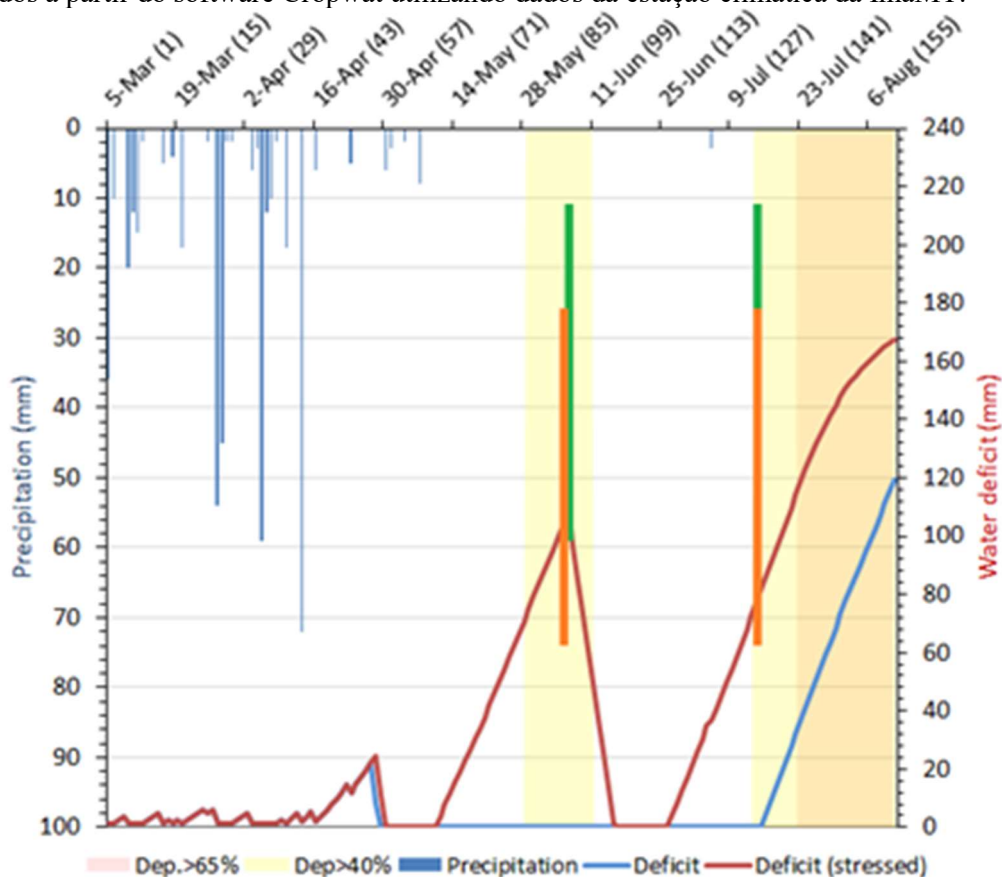
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DO ESTRESSE HÍDRICO E DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO DURANTE O EXPERIMENTO

É amplamente conhecido que a produtividade do algodão não depende apenas da intensidade de um eventual déficit hídrico, mas também da duração e do período em que o estresse hídrico ocorre durante seu ciclo de desenvolvimento. Assim, todos os resultados apresentados aqui referem-se a uma situação específica de estresse e não são conclusivos para analisar a resistência geral de uma variedade e sua produtividade, que pode apresentar diferentes resultados em outras condições de estresse hídrico.

A Figura 14, mostra precipitação, o déficit hídrico e a depleção durante o ciclo de crescimento do experimento em 2019 para os blocos irrigados e não irrigados. São expostas também as datas e dias após semeadura dos imageamentos termais (linha vertical laranja) e multiespectral (linha vertical verde).

Figura 13 - Estimativa do déficit hídrico durante o experimento 2019. Depleção e déficit hídrico foram determinados a partir do software Cropwat utilizando dados da estação climática da ImaMT.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Períodos de estresse hídrico foram induzidos entre os dias 58 e 97 após semeadura e depois, após restabelecer temporariamente a irrigação, a partir do dia 113. De acordo com Santiago et al. (2022), uma demanda hídrica mais elevada da cultura se instala entre os dias 35 - 60 após o plantio (em torno de 150 mm), após o aparecimento da primeira flor. A demanda hídrica máxima (cerca de 240 mm) ocorre entre os dias 60 e 90 após o plantio, durante a floração e enchimento das maçãs. No experimento, a primeira fase de estresse foi induzida aproximadamente nesta fase de desenvolvimento da demanda hídrica principal. Já o segundo período de estresse foi induzido em fase reprodutiva avançada da cultura (abertura dos capulhos), na qual a demanda hídrica é geralmente cerca de 80 mm (3 mm por dia).

Assim, por esta fase, puderam ser esperadas interferências inferiores sobre o desenvolvimento e produtividade das variedades (SANTIAGO et al., 2022).

4.2 SEPARABILIDADE DO ESTRESSE HÍDRICO POR ÍNDICES INDIVIDUAIS

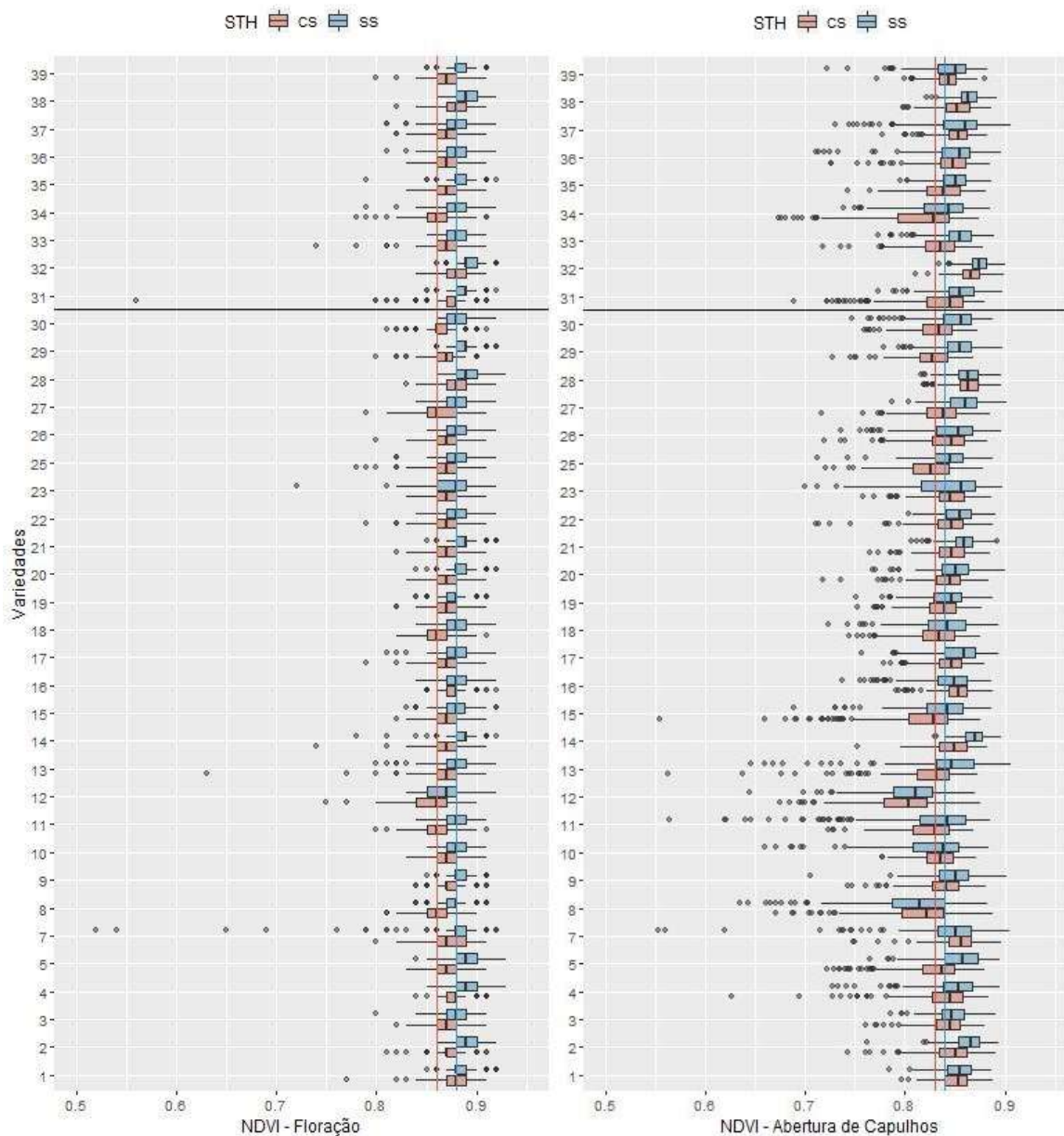
Inicialmente foi realizada a análise exploratória dos índices (NDVI, GRVI, RED EDGE RATIO e CSWI), individualmente, objetivando demonstrar a separabilidade das parcelas “Com estresse” e “Sem estresse”, para cada variedade.

Como em todas as figuras subsequentes neste subitem 4.2, a situação hídrica (STH) com estresse (CS) é representada por boxes de coloração vermelha, enquanto a situação sem estresse (SS) é representada por boxes de coloração azulada.

4.2.1 NDVI

Em geral, o NDVI foi maior no imageamento realizado em junho, no período de Floração, fase em que a cultura se encontra ainda em uma fase reprodutiva inicial, cerca de 90 dias após semeadura, ainda com pleno desenvolvimento da biomassa verde. Já em julho na Fase da Abertura dos Capulhos, com cerca de 135 dias da cultura, o dossel já mostra senescência.

Figura 14 - NDVI por variedade, nas fases de Floração e Abertura de Capulhos. Caixas na cor azul representam parcelas “Sem estresse” e na cor rosa, parcelas “Com estresse”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No imageamento da fase de floração, o NDVI apresenta valores inferiores no bloco "Com Estresse" em todas as variedades, devido à atividade fotossintética reduzida nas parcelas sob estresse hídrico.

Cada estágio fenológico demanda uma quantidade específica de água, com maior requerimento na fase de floração (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009). Assim, o impacto do déficit hídrico é mais acentuado nessa fase, resultando em uma maior separabilidade entre os tratamentos. Em fases posteriores, como a abertura dos capulhos, a planta começa a direcionar seus recursos para o amadurecimento das fibras, o que reduz

naturalmente a fitomassa verde, mesmo nas parcelas "Sem Estresse". Isso atenua a diferença entre as parcelas com e sem estresse, diminuindo a separabilidade entre os tratamentos.

Esses resultados são consistentes com os achados de Couto Junior et al. (2013), que observaram um comportamento semelhante ao analisar o NDVI ao longo do ciclo fenológico do algodoeiro. O estudo indicou que os valores de NDVI, assim como outros índices avaliados, como EVI e NDWI, são mais altos nas fases iniciais do ciclo e vão diminuindo gradualmente à medida que o ciclo reprodutivo avança. Essa redução nos valores dos índices se intensifica ao longo da fase de abertura das flores, marcando o início da senescência do dossel, que se acentua na última fase fenológica, a Abertura dos Capulhos. Esse processo ocorre devido ao redirecionamento dos recursos da planta para o desenvolvimento dos órgãos reprodutivos, o que reduz o investimento em biomassa foliar e, consequentemente, diminui o vigor da vegetação.

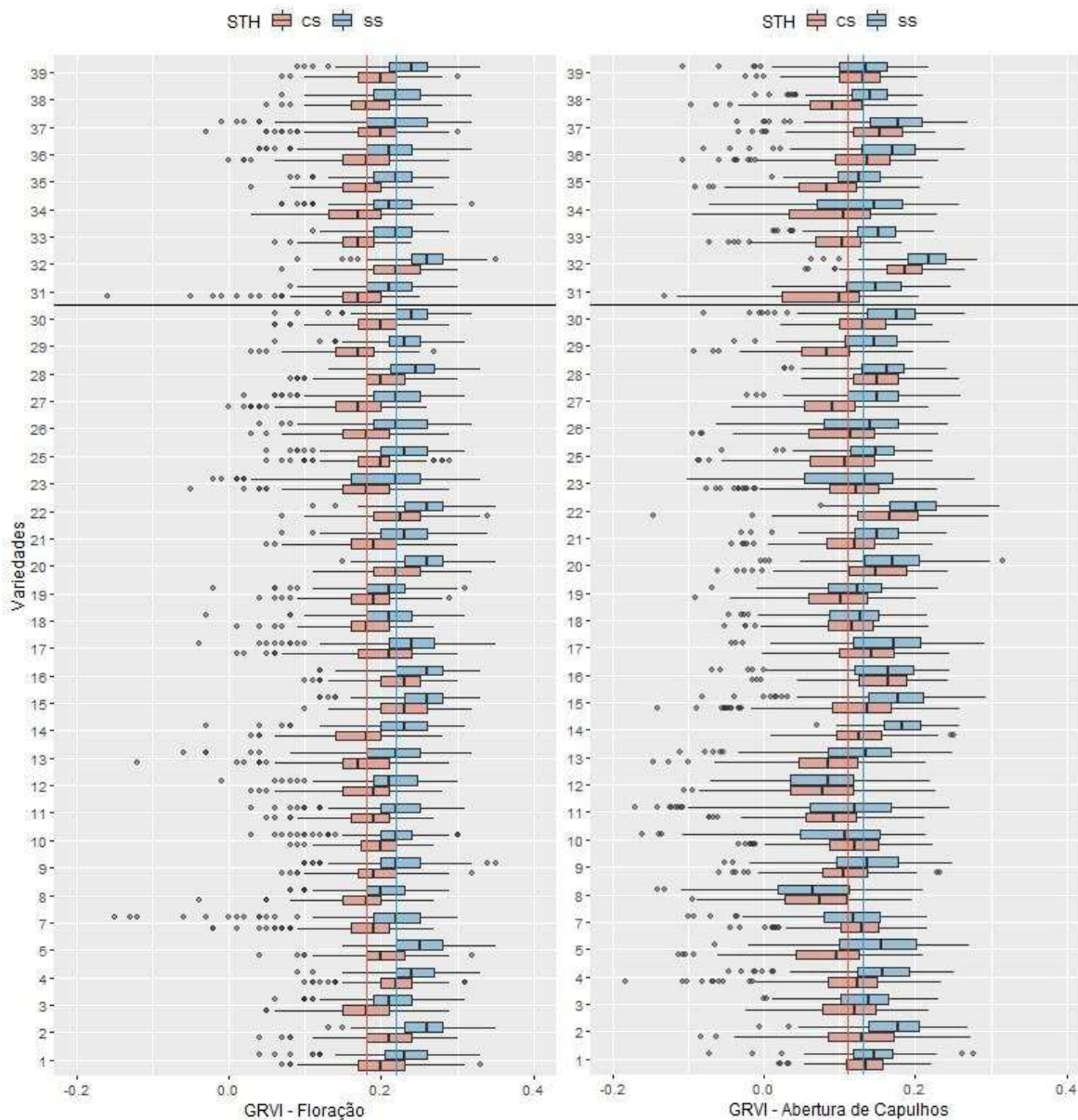
Esses achados evidenciam a forte associação entre o NDVI e os atributos físicos das plantas de algodão, uma relação que já é bem estabelecida na literatura (SALVADOR; ANTUNIASSI, 2011). Isso reforça o papel do NDVI como um dos índices mais amplamente empregados em vários estudos e aplicações voltadas à agricultura de precisão e modelagem de culturas (SHAMMI; MENG, 2021; SILVA et al., 2023).

4.2.2 GRVI

Os quartis nos boxplots do GRVI são maiores, comparados ao NDVI, demonstrando maior dispersão entre os dados deste índice (Fig. 15).

Porém as diferenças observadas no GRVI são similares aos do NDVI. Como no NDVI são observadas variedades que mantêm as medianas inferiores das parcelas estressadas na fase de Abertura de Capulhos (p. ex. Variedades 29, 31, 33), enquanto outras (p. ex. Variedades 7, 8, 10) reduzem ou até invertem as diferenças entre as duas campanhas de monitoramento.

Figura 15 - Índice GRVI por variedade, nas fases de Floração e Abertura de Capulhos. Caixas na cor azul representam parcelas “Sem estresse” e na cor rosa, parcelas “Com estresse”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o objetivo de verificar os efeitos do estresse hídrico no algodão, Ballester et al. (2019) utilizaram os índices de vegetação GRVI e Red Edge Ratio, derivados de imagens capturadas por UAS, na Austrália, para monitorar o estado hídrico do solo e das plantas de algodão, além de prever a qualidade da fibra. Esses índices foram comparados com os Índices NDVI e o CWSI. O estudo concluiu que tanto o GRVI quanto o Red Edge Ratio foram eficazes em monitorar os efeitos do estresse hídrico nas plantas de algodão.

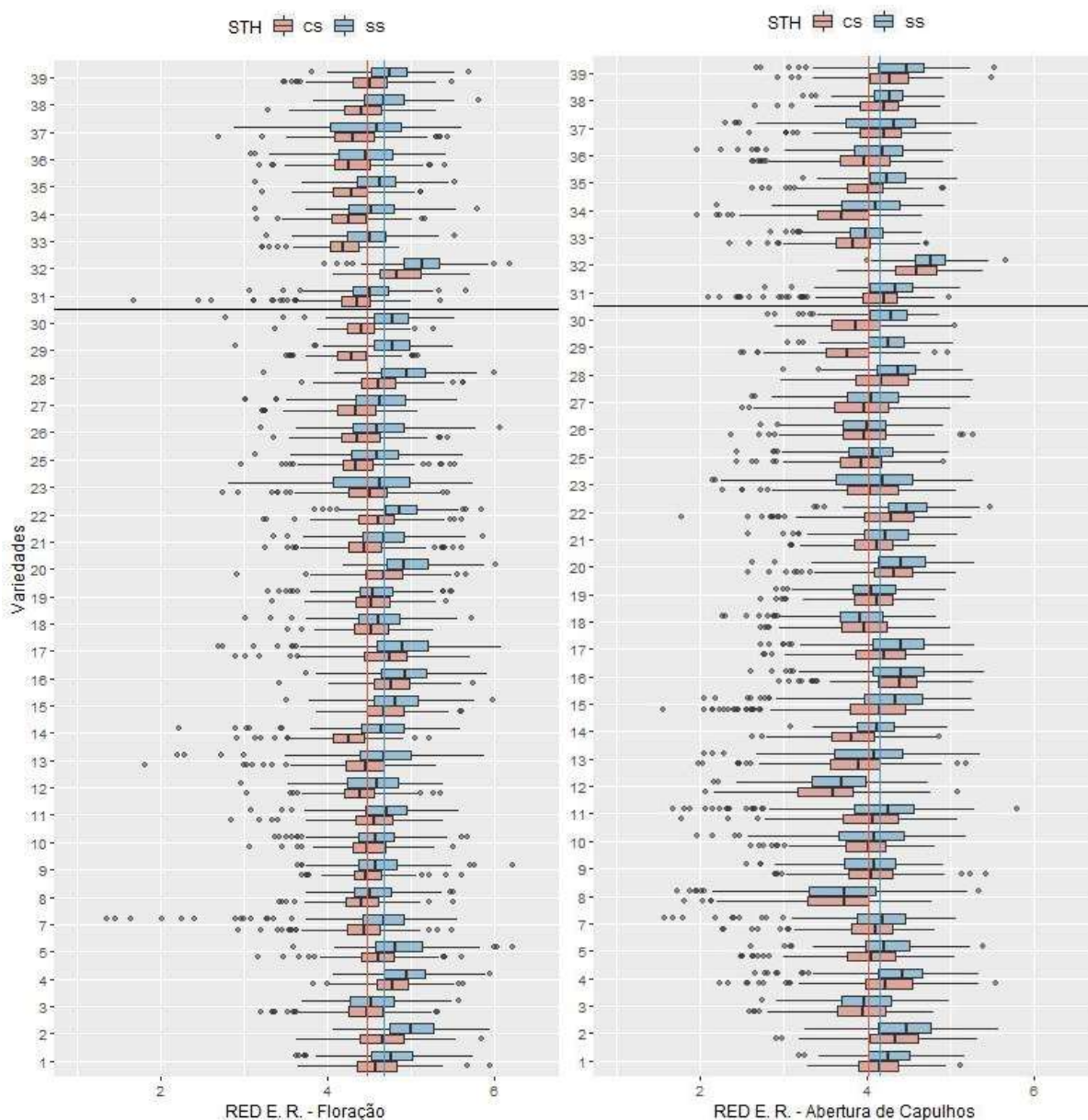
Além disso, o estudo de Ranjitha et al. (2014) corrobora a relevância do GRVI ao demonstrar que, entre três índices testados neste estudo (RVI, NDVI e GRVI), o GRVI apresentou maior sensibilidade a danos causados por tripses (*Thrips tabaci* Lind) no algodão,

evidenciando sua eficácia na detecção de variações associadas a estresses na cultura do algodão. Essa sensibilidade do GRVI a alterações na vegetação reforça sua aplicabilidade tanto para o monitoramento de pragas quanto para a avaliação de estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

4.2.3 RED EDGE RATIO

O Red Edge Ratio foi maior nas áreas “Sem estresse”, acompanhando a dinâmica observada nos índices NDVI e GRVI (Fig.16).

Figura 16 - Índice Red Edge Ratio por variedade, nas fases de Floração e Abertura de Capulhos. Caixas na cor azul representam parcelas “Sem estresse” e na cor rosa, parcelas “Com estresse”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

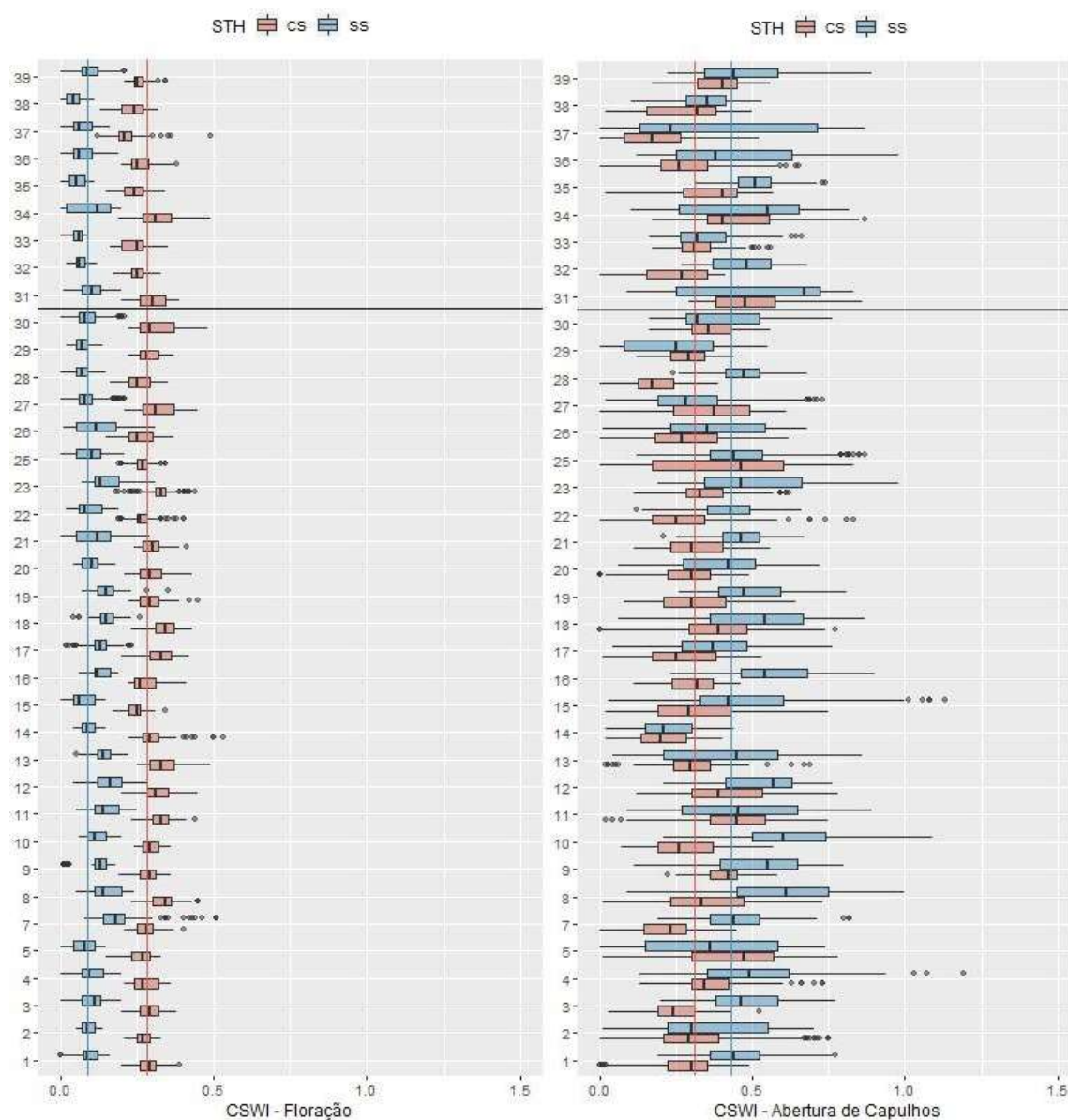
Resultados similares foram encontrados por Ballester et al. (2019), que observaram que os valores médios do NDVI, GRVI e Red Edge Ratio seguiram uma tendência semelhante durante a temporada de cultivo, sendo que, o tratamento mais frequentemente irrigado (déficit curto) teve os valores mais altos de NDVI, GRVI e Red Edge Ratio durante toda a temporada, e a medida que a frequência de irrigação diminuiu, observou-se uma redução nos valores do NDVI, GRVI e Red Edge Ratio e um aumento nos valores do CWSI.

4.2.4 CSWI

Nos resultados obtidos para o Índice de CSWI durante o período de Floração, foi observada uma separabilidade mais acentuada entre as áreas "Com estresse" e "Sem estresse" em comparação com os gráficos dos índices espectrais. Esse comportamento era esperado, já que, nesta fase de desenvolvimento, a necessidade de água é elevada, tornando as plantas mais suscetíveis ao déficit hídrico.

Como resultado, o CSWI apresentou valores mais altos nas áreas "Com estresse", evidenciando sua sensibilidade em detectar variações no estresse hídrico durante períodos de maior exigência hídrica.

Figura 17 - Índice termal CSWI por variedade, nas fases de Floração e Abertura de Capulhos. Caixas na cor azul representam parcelas “Sem Estresse” e na cor rosa, parcelas “Com estresse”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, ao analisar os dados do imageamento realizado durante a Abertura de Capulhos, a diferença entre as variedades irrigadas e não irrigadas foi consideravelmente reduzida. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que o segundo estresse hídrico foi induzido durante a fase reprodutiva avançada da cultura, especificamente na abertura dos capulhos, uma etapa em que a demanda hídrica é naturalmente menor do que durante a fase de desenvolvimento observada no primeiro imageamento. Nessa fase reprodutiva, espera-se que as plantas apresentem uma menor sensibilidade ao déficit hídrico, resultando em interferências menores nos índices observados. A menor separabilidade observada sugere que o impacto do

estresse hídrico induzido na fase fenológica mais avançada é menos pronunciado, possivelmente devido à redução da demanda hídrica durante essa fase do ciclo de vida da planta.

A partir dessas análises, pode-se concluir que o CSWI se destaca por proporcionar uma distinção mais evidente entre áreas irrigadas e áreas submetidas a estresse hídrico, principalmente durante as fases de alta demanda de água. A consistência desses resultados reforça a confiança na utilização desse índice como uma ferramenta eficaz para a avaliação do estresse hídrico em plantações de algodão.

Essas conclusões estão em conformidade com os achados de Bian et al. (2019), que destacam a superioridade dos índices térmicos, como o CSWI, em relação aos índices multiespectrais para o diagnóstico do estresse hídrico nas culturas.

4.3 ANÁLISE DA SEPARABILIDADE POR TÉCNICA DE INFERÊNCIA

4.3.1 Modelos Univariados

Apesar de todos os modelos serem significativos para a diferenciação entre parcelas irrigadas e não irrigadas, os valores ‘Z Value’ confirmam uma separabilidade superior no primeiro período de estresse induzido, em junho, durante a fase de Floração (F), comparado às medições realizadas em julho, na fase de Abertura de Capulhos (AC).

Tabela 6 - Modelos logísticos univariados, aninhado por Tratamento para diferenciação de parcelas com e sem estresse hídrico.

Coefficients	Estimate	Std, Error	Z Value	Pr(> z)
Intercept	-48,984	1,0819	-45,2751	< 0,001***
NDVI (F)	55,9288	1,2348	45,2927	< 0,001***
Intercept	-9,8802	0,4738	-20,8536	< 0,001***
NDVI (AC)	11,7258	0,5617	20,8746	< 0,001***
Intercept	-3,2635	0,0791	-41,283	< 0,001***
GRVI (F)	15,6607	0,3693	42,409	< 0,001***
Intercept	-0,9514	0,037	-25,6874	< 0,001***
GRVI (AC)	7,4956	0,2632	28,4839	< 0,001***
Intercept	-5,7059	0,1856	-30,7453	< 0,001***
RED E. (F)	1,2437	0,0403	30,8452	< 0,001***
Intercept	-2,4272	0,1307	-18,5738	< 0,001***
RED E. (AC)	0,5927	0,0317	18,6905	< 0,001***
Intercept	11,9851	0,2427	49,3841	< 0,001***
CSWI (F)	-60,3837	1,1785	-51,2399	< 0,001***
Intercept	-0,8783	0,035	-25,0663	< 0,001***
CSWI (AC)	2,2841	0,0825	27,6857	< 0,001***

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7- Resumo dos modelos univariados (Pseudo-R² de Cragg-Uhler; OC: Overall Accuracy).

Modelo	AIC	Pseudo-R ²	OC
NDVI (F)	21112,50	0,1098	0,681244
NDVI (AC)	23232,88	0,0203	0,586120
GRVI (F)	21505,18	0,0932	0,661541
GRVI (AC)	22828,87	0,0374	0,601555
RED E. (F)	22652,64	0,0448	0,619212
RED E. (AC)	23351,03	0,0154	0,567937
CSWI (F)	4140,64	0,8255	0,957203
CSWI (AC)	22868,66	0,0357	0,592201

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os modelos com menores valores de AIC e maiores valores de Pseudo R² e OC são considerados melhores, pois indicam um melhor ajuste aos dados e maior precisão na classificação.

O índice CSWI (F) se destaca como o melhor com uma diferença significativa comparado aos demais índices. Ele tem o menor AIC (4140,644), o maior Pseudo-R² (0,8255), e a maior OC (0,957203). Esses valores indicam que o CSWI (F) tem a melhor capacidade preditiva e o melhor ajuste ao modelo.

O NDVI (F) e o GRVI (F) também apresentaram valores relativamente bons de AIC, Pseudo-R² e OC, mas estão abaixo do CSWI (F).

Os índices baseados nas medições da fase de Abertura de Capulhos, em geral, apresentam desempenho inferior, com maiores AIC's e menores valores de Pseudo-R² e OC, indicando uma menor capacidade preditiva comparada aos índices medidos na fase de Floração.

A superioridade do índice CSWI pode ser atribuída ao uso da banda térmica em seu cálculo, o que aprimora significativamente sua capacidade de prever e monitorar a saúde da vegetação de forma mais eficaz em comparação com os índices que não utilizam essa informação.

Embora o GRVI e o Red Edge ofereçam informações importantes sobre a saúde da vegetação, eles não são tão sensíveis às variações da disponibilidade de água quanto o CSWI. Visto que, a temperatura da folhagem é um indicador crucial de estresse hídrico.

4.3.2 Modelos Multivariados

A tabela 7 demonstra os resultados das análises de Regressão Logística para os modelos multivariados dos índices combinados (Floração).

A ordem dos modelos segue uma classificação com base na pontuação combinada das métricas AIC, Pseudo R^2 e OC, com os valores mais favoráveis para cada métrica colocando o modelo em uma posição mais alta na classificação. Os modelos foram classificados pela média das métricas normalizadas, considerando que para o AIC, valores menores são melhores. Os modelos que tiveram melhor desempenho combinado são aqueles com menor AIC e maiores Pseudo R^2 e OC.

A combinação de AIC, Pseudo R^2 e OC em um único escore fornece uma visão mais holística do desempenho do modelo, considerando tanto o ajuste quanto a capacidade preditiva. Esta abordagem atribui pesos iguais a todas as métricas (AIC, Pseudo R^2 e OC).

Tabela 8 - Resumo e classificação dos modelos multivariados dos Índices combinados com base na pontuação combinada das métricas AIC, Pseudo R^2 e OC (Floração).

Rank	Modelos (junho - F)	AIC	Pseudo- R^2	OC
1	NDVI-GRVI-CSWI	4.110,113	0.827	0.957378
2	NDVI-GRVI-RED-CSWI	4.111,714	0.827	0.957612
3	NDVI-CSWI	4.116,456	0.8266	0.957554
4	NDVI-RED-CSWI	4.113,769	0.8268	0.957320
5	RED-CSWI-GRVI	4.126,712	0.8263	0.957905
6	GRVI-CSWI	4.137,017	0.8258	0.957203
7	RED-CSWI	4.142,642	0.8255	0.957145
8	NDVI-GRVI-RED	17.719,290	0.2530	0.767949
9	NDVI-GRVI	19.308,150	0.1859	0.734097
10	NDVI-RED	20.884,290	0.1195	0.687032
11	RED-GRVI	21.397,440	0.0978	0.659203

Fonte: Elaborado pelo autor.

Referente ao período de Floração, os primeiros sete modelos têm um bom desempenho, enquanto os últimos quatro apresentam desempenho significativamente inferior.

Os quatro primeiros modelos do Rank se destacam como os melhores, com base nas métricas AIC, Pseudo R^2 e OC. Esses modelos apresentam valores de AIC menores, indicando um melhor ajuste aos dados. Além disso, todos têm Pseudo R^2 altos (acima de 0,826), sugerindo que explicam bem a variação nos dados. Suas altas classificações de OC (próximas a 0,957) indicam precisão na classificação.

Os modelos 5, 6 e 7 também se destacam, mas em menor grau. Eles têm AIC maiores e Pseudo R^2 um pouco mais baixos (em torno de 0,825-0,826), indicando um ajuste um pouco inferior aos dados, mas ainda bom. O OC desses modelos também é alto, o que demonstra uma boa capacidade de classificação.

Em contraste, os modelos 8, 9, 10 e 11, têm desempenho significativamente inferior. Seus valores de AIC são muito altos, indicando um ajuste ruim aos dados. O Pseudo R^2 desses modelos é baixo, refletindo uma capacidade explicativa fraca, e o OC também é baixo, indicando precisão inferior na classificação.

Em resumo, os modelos que se destacam são NDVI-GRVI-CSWI e NDVI-GRVI-RED-CSWI, devido ao seu excelente desempenho em todas as métricas consideradas. Essas combinações apresentam um bom equilíbrio entre ajuste aos dados e capacidade de classificação precisa.

Na tabela 8 estão os resultados das análises de Regressão Logística para os modelos multivariados dos índices combinados (Abertura de Capulhos).

Tabela 9 - Análises de Regressão Logística para os modelos multivariados dos índices combinados (AC).

Rank	Modelos (julho - AC)	AIC	Pseudo R^2	OC
1	NDVI-RED E-GRVI-CSWI	22112.48	0.0678	0.6251169
2	CSWI-RED E-GRVI	22112.59	0.0678	0.6245907
3	CSWI-GRVI	22136.57	0.0667	0.6274556
4	NDVI-GRVI-CSWI	22138.56	0.0667	0.6273386
5	NDVI-CSWI	22494.08	0.0516	0.6242399
6	NDVI-RED E-CSWI	22473.12	0.0525	0.6255262
7	CSWI-RED E	22608.58	0.0468	0.612956
8	RED E-GRVI	22816.55	0.0380	0.5993920
9	NDVI-RED E-GRVI	22814.38	0.0382	0.6010875
10	NDVI-GRVI	22829.92	0.0374	0.6017891
11	NDVI-RED E	23194.40	0.0220	0.5880496

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise mostrou que na fase de Abertura de Capulhos, os modelos que se destacam também são aqueles que combinam mais índices, os modelos NDVI-RED E-GRVI-CSWI e CSWI-RED E-GRVI mostraram um desempenho superior comparado aos demais.

Observou-se uma diferença na performance dos modelos entre as diferentes fases de desenvolvimento, os modelos da fase de Abertura de Capulhos têm valores de AIC e Pseudo R^2 significativamente menores. Embora o OC permaneça razoavelmente alto (acima de 0.62), indicando uma precisão satisfatória de classificação, a capacidade explicativa dos modelos no período de Abertura de Capulhos é inferior à dos modelos no período de Floração, que se mostraram mais eficazes em termos de ajuste e explicação dos dados do que os modelos de julho (AC).

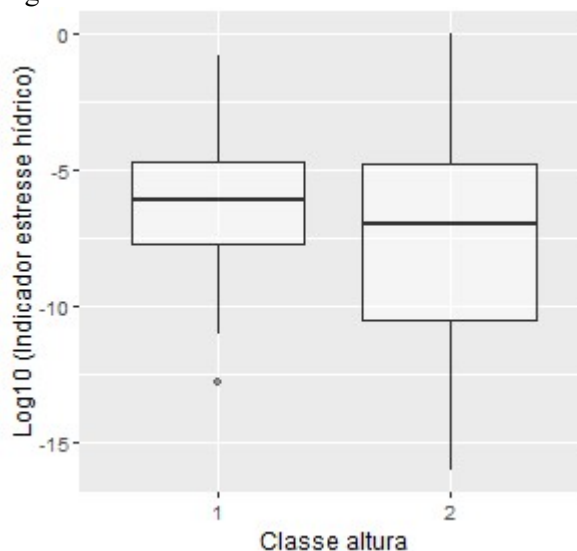
Em geral, constatou-se que o poder preditivo dos modelos combinados se mostrou superior ao dos modelos simples.

4.4 RELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FISIONÔMICAS SOBRE O ESTRESSE HÍDRICO

Para avaliar a influência das características fisionômicas das variedades levantadas pela interpretação de fotografias oblíquas (altura e estrutura), sobre a intensidade de estresse hídrico, foi calculado, para cada parcela do experimento, a probabilidade relativa de uma parcela estar sobre estresse hídrico.

Este indicador de estresse é escalonado entre 0 e 1, onde valores altos representam parcelas menos sujeitas ao estresse hídrico. O indicador foi calculado a partir do modelo de Regressão Logística mais parcimoniosa do CSWI e NDVI dos períodos de Floração e Abertura de Capulhos. Foram extraídos do conjunto de dados somente registros de parcelas “Com estresse”. Para uma visualização melhor, os valores foram transformados por logaritmo de base 10 (Fig. 18 e 19). A hipótese da distribuição igual dos indicadores nas classes fisionômicas foi testada a partir do teste de Kruskal Wallis para “n” amostras independentes.

Figura 18 - Distribuição do Indicador de estresse hídrico em função da classe de altura das variedades. Parcelas não irrigadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de indicar uma suscetibilidade maior de sofrer estresse hídrico (rank médio do indicador inferior) para as variedades de crescimento mais alto (Fig. 18), o teste de Kruskal Wallis não mostrou diferenças significativas entre as distribuições em função da classe de altura das variedades (Tab. 7).

Tabela 10 - Teste de Kruskal-Wallis da dependência do indicador de estresse hídrico da altura das variedades.

Indicador de estresse hídrico	Altura	N	Rank médio	Estatísticas do teste	
	1 (baixo)	36	84.42	Chi-Square	3.184
	2 (alto)	110	69.93	df	1
	Total	146		Asymp. Sig.	0.074

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação à estrutura das variedades, observou-se que as variedades com estrutura quadrada apresentaram uma probabilidade relativa menor de sofrer estresse hídrico (Fig. 19). As classes 1 (disforme) e 2 (losango) apresentaram valores no rank médio significativamente inferiores (indicando maior probabilidade relativa de sofrer estresse hídrico) quando comparadas à classe 3 (estrutura quadrada) (Tab. 8).

Embora os ranks das classes 1 e 2 mostrem uma diferença notável, esta não foi estatisticamente significativa, o que pode ser atribuído ao fato de apenas uma variedade ter sido classificada como de estrutura irregular.

Figura 19 - Distribuição do Indicador de estresse hídrico em função da estrutura das variedades. (1: disforme, 2: losango, 3: quadrada). Parcelas não irrigadas.

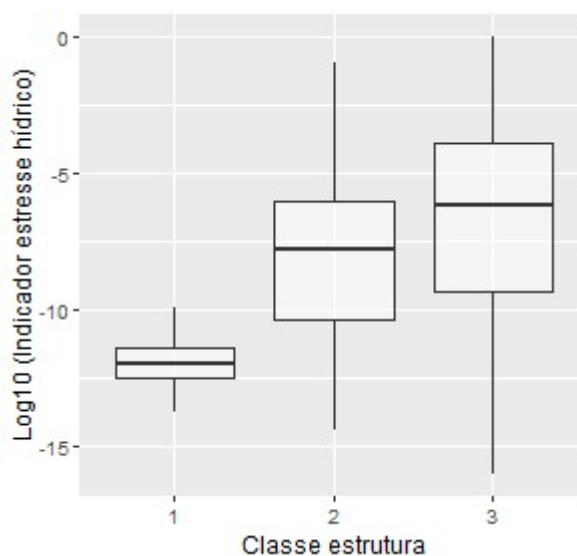


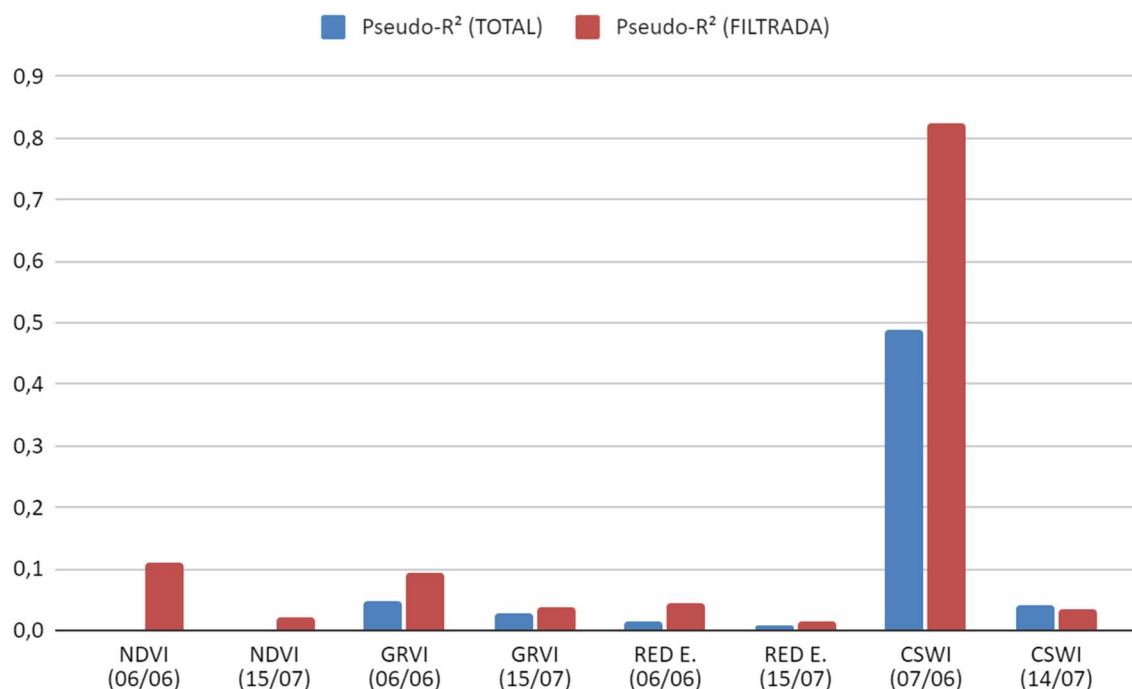
Tabela 11 - Teste de Kruskal-Wallis da dependência do do indicador de estresse hídrico da estrutura das variedades. Significâncias ajustadas das comparações pareadas: 1-2: 0.257, 1-3: 0.020, 2-3: 0.043).

Indicador de estresse hídrico	Estrutura	N	Rank médio	Estatísticas do teste	
	1 (disforme)	4	21.75	Chi-Square	10.415
	2 (losango)	36	60.06	df	2
	3 (quadrada)	106	80.02	Asymp. Sig.	0.005
	Total	146			

4.5 A INFLUÊNCIA DA FILTRAGEM

Com o objetivo de demonstrar como a filtragem dos dados pode influenciar nos resultados, foram plotados os gráficos observados nas figuras 21 e 22, em que se observa a diferença nos valores de Pseudo R^2 e OC, por índice para os dados filtrados e não filtrados.

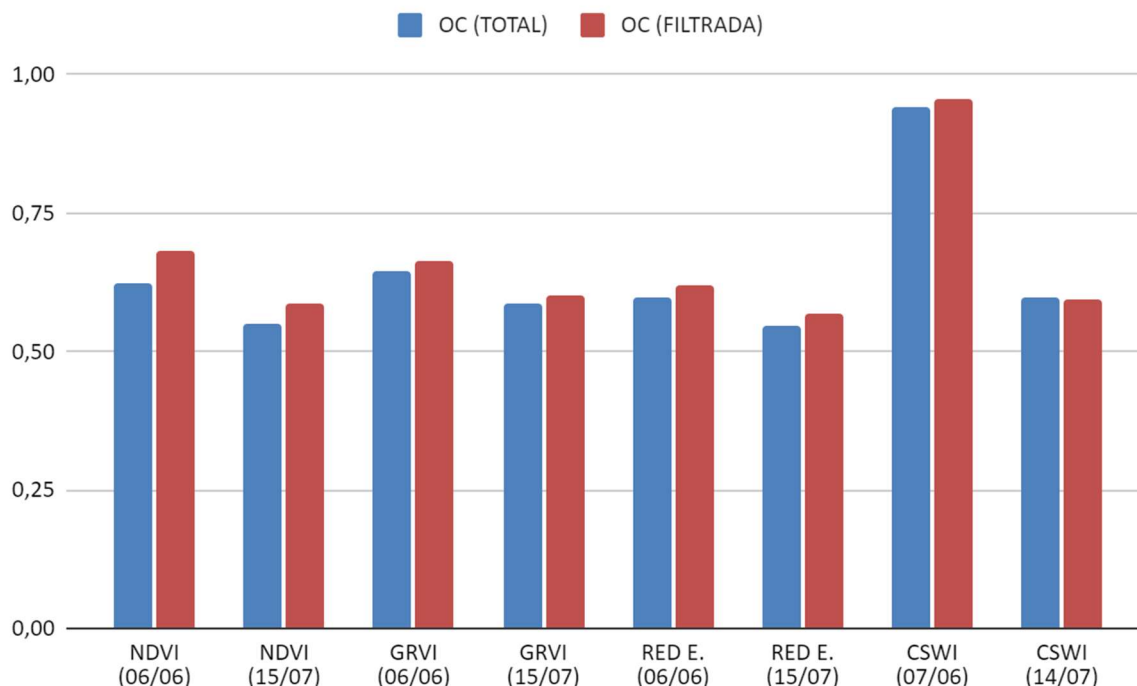
Figura 20 - Comparativo do Pseudo- R^2 por índice para os dados filtrados (vermelho) e não filtrados (azul).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em ambos os gráficos (figuras 21 e 22), observa-se que os resultados de Pseudo R^2 e OC foram melhores considerando os dados filtrados, sendo que nestas figuras também se observa que os valores mais próximos de 1 são referentes ao índice CSWI, ou seja, o índice CSWI, especialmente na Floração (07/06), destaca-se como o que apresenta o melhor desempenho entre todos os índices analisados.

Figura 21 - Comparativo do OC por índice para os dados filtrados (vermelho) e não filtrados (azul).



Fonte: Elaborado pelo autor.

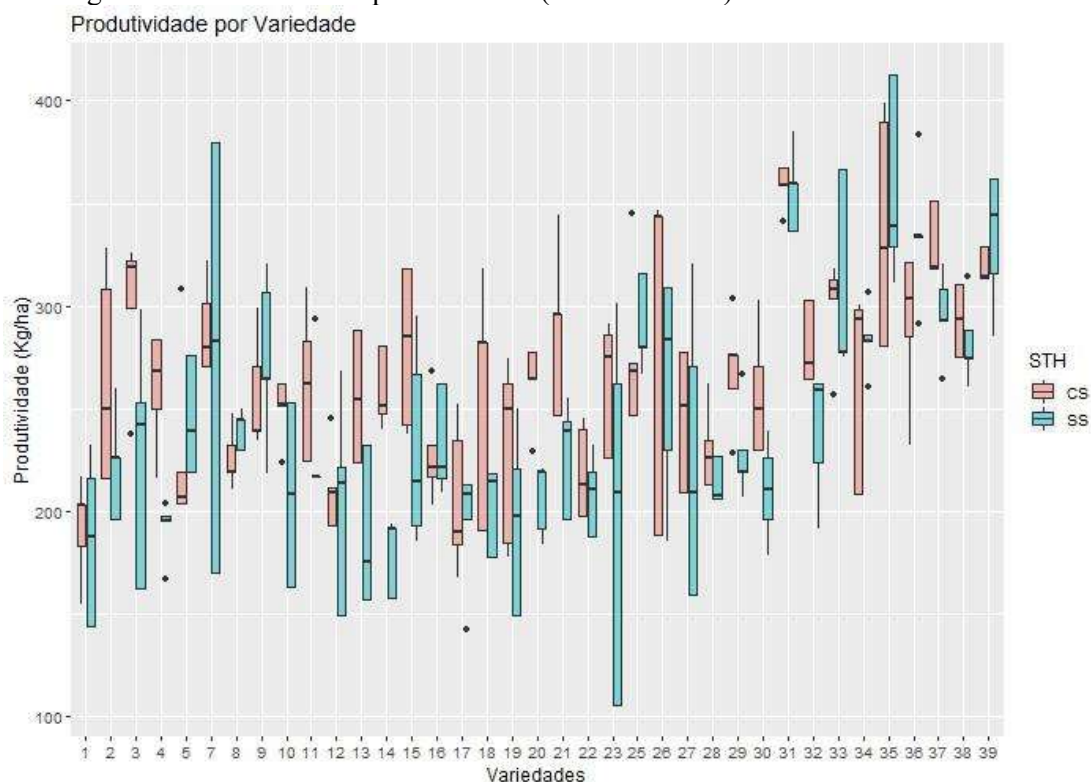
4.6 PRODUTIVIDADE

4.6.1 Produtividade por variedade

Antes de analisar a produtividade das variedades, é importante reiterar que, do total, 30 são experimentais (de 1 a 30) e 9 são comerciais (de 31 a 39). Cada variedade possui características únicas no que diz respeito ao seu desenvolvimento e à sua resistência a intempéries (SOUTO, 2022).

De forma geral pode ser observado que não existe relação uniforme entre o fato de uma variedade ter sofrido estresse e sua produtividade (Fig. 22). Observa-se variedades (5, 25) com produtividade superior para as parcelas irrigadas. No total, entretanto, predominam as variedades que possuem produtividade superior nas parcelas com estresse hídrico (3, 14, 20, 30, 32, 37).

Figura 22 - Produtividade por variedade (dados filtrados).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Floração, os índices de estresse hídrico foram menores, conforme esperado. No entanto, na Abertura de Capulhos, observou-se que as variedades “Sem estresse” até mostraram, em média, emissão térmica ligeiramente maior em comparação às variedades “Com estresse”, conforme demonstrado pelos cálculos do CWSI (Fig. 18). Os resultados indicaram que a maioria das variedades produziu mais sob condições de não irrigação (parcelas “CS”).

Esse resultado pode ser explicado por diversos fatores. Primeiramente, as variedades experimentais foram desenvolvidas com o intuito de possuir resistência ao estresse hídrico. Assim, as plantas não irrigadas possuem predisposição com mecanismos de resistência ao estresse hídrico, resultando em maior eficiência no uso da água e, consequentemente, em maior produtividade.

Estudos recentes sugerem que, sob condições de estresse hídrico, a produtividade do algodão pode ser maior do que sob irrigação plena, devido à adaptação fisiológica das plantas. Em situações de estresse hídrico, o algodão desenvolve mecanismos que aumentam a eficiência no uso da água, como a redução da área foliar e o fechamento dos estômatos, o que pode resultar em uma alocação mais eficiente dos recursos para o desenvolvimento das estruturas reprodutivas (ZONTA et al., 2020; TOLK et al., 2021).

Para entender melhor as variações na produtividade observadas entre as variedades, além de considerar o comportamento de cada variedade diante do manejo de irrigação, é

essencial avaliar uma série de fatores e características genéticas das plantas associadas à tolerância ao estresse hídrico, que não foram objeto deste estudo.

Cada variedade possui características específicas de desenvolvimento em condições climáticas adversas. Contudo, detalhes sobre essas características não podem ser divulgados, visto que, não tivemos acesso a tais informações devido ao sigilo da pesquisa do IMA.

A análise do comportamento das 37 variedades revelou que muitas delas tiveram desempenho superior, ou seja, produziram mais em áreas submetidas ao estresse hídrico, em comparação com as áreas irrigadas.

Esses resultados sugerem que certas variedades podem ser mais tolerantes ao estresse hídrico, mantendo ou até aumentando sua produtividade em condições de escassez de água. Isso enfatiza a necessidade de investigar e compreender as características genéticas e fisiológicas dessas variedades, para identificar os fatores específicos que proporcionam essa resistência.

Há uma ampla variação genética entre as plantas no que diz respeito à eficiência no uso da água e à capacidade de tolerar situações de seca ou excesso de água. A resistência à seca ou ao encharcamento é influenciada por múltiplos genes, tornando improvável que uma única característica (ou gene) seja suficiente para conferir resistência completa a esses estresses (HEARN, 1995; LOKA ET AL., 2011; CHRISTIANSON ET AL., 2010).

Características fisiológicas, como fotossíntese, condutância estomática, taxa de transpiração, peso específico da folha, temperatura do dossel, fluorescência da folha, discriminação isotópica de carbono da folha e regulação osmótica da raiz e folha; características genéticas, como mapeamento de genes; características morfológicas, como desenvolvimento radicular e arquitetura da planta; parâmetros de crescimento e produção, como rendimento e qualidade da fibra; e fatores ambientais, como a disponibilidade hídrica, fazem parte de um conjunto de parâmetros que permitem uma avaliação abrangente das variedades de algodão. Esses parâmetros ajudam a identificar as variedades mais resistentes à seca, contribuindo para uma produção mais eficiente em regiões afetadas por condições de baixa disponibilidade hídrica.

De acordo com Kirda et al. (2019) e Zonta et al. (2020), práticas de irrigação deficitária, que aplicam água abaixo da demanda total da cultura, podem economizar recursos hídricos e aumentar a produtividade do algodão. Esse manejo estratégico da irrigação melhora a eficiência do uso da água e a resistência ao estresse das plantas, levando a rendimentos potencialmente maiores, especialmente em regiões áridas.

4.6.2 Estimativa da produtividade

A produtividade das parcelas pode ser estimada de forma significativa para condições de estresse hídrico a partir do índice CSWI do dia 07 de junho (F) e a infiltração do solo (Tabela 11) e para condições sem estresse hídrico a partir do índice CSWI do dia 07 de junho e do índice de vegetação GRVI do dia 15 de julho (AC) (Tabela 12).

Tabela 12 - Estimativa dos parâmetros para modelagem da produtividade. Parcelas sob estresse hídrico (Modelo geral: $p < 0,01$).

Parâmetro	B	Std. Error	Intervalo de confiança. Wald (95%)		Teste da hipótese		
			Lower	Upper	Wald Chi-Square	df	Sig.
(Intercept)	342.203	233.845	296.370	388.035	214.146	1	.000
07_06_CWI_10h	-334.015	814.848	-493.722	-174.308	16.803	1	.000
INFILTRAÇÃO	.137	.0483	.042	.231	8.043	1	.005
(Scale)	1941.945a	2.272.874	1.543.872	2.442.657			

Variável dependente: Produtividade (kg/ha).

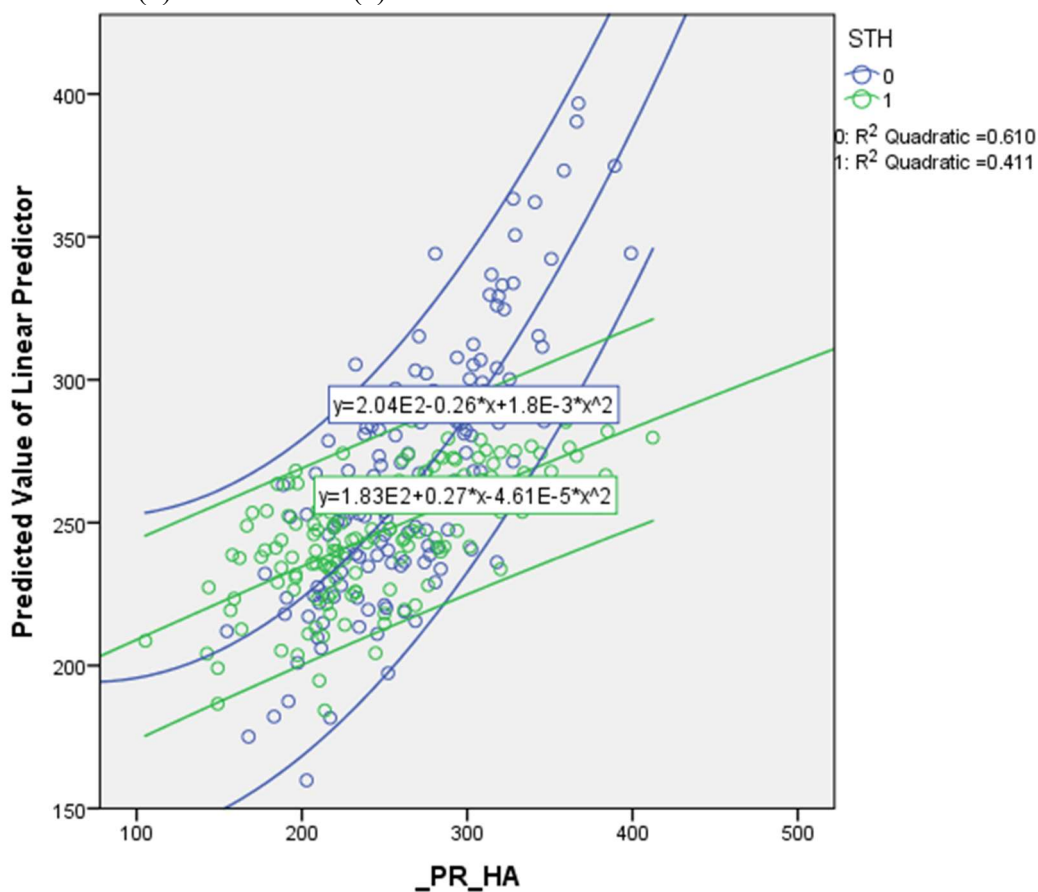
Tabela 13 - Estimativa dos parâmetros para modelagem da produtividade. Parcelas sob estresse hídrico (Modelo geral: $p < 0,01$).

Parâmetro	B	Std. Error	Intervalo de confiança. Wald (95%)		Teste da hipótese		
			Lower	Upper	Wald Chi-Square	df	Sig.
(Intercept)	339.897	245.227	291.833	387.960	192.114	1	.000
07_06_CWI_10h	-526.616	1.024.909	-727.494	-325.737	26.401	1	.000
15_07_GRVI_10H	-300.233	1.189.549	-533.380	-67.085	6.370	1	.012
(Scale)	2853.299a	3.362.645	2.264.812	3.594.697			

Variável dependente: Produtividade (kg/ha).

A Fig. 23 visualiza a produtividade medida e sua estimativa nas duas condições de manejo, comparando parcelas sob estresse hídrico (0) e sem estresse (1). Os modelos de previsão de produtividade demonstram maior precisão em áreas com estresse hídrico, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,610. Em contraste, a precisão do modelo para áreas irrigadas é menor, com um R^2 de 0,411.

Figura 23 - Estimativa da produtividade por hectare (_PR_HA) em diferentes condições de manejo - com estresse (0) e sem estresse (1).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este resultado indica que monitoramentos da produtividade da cultura de algodão por RPAS multissensorial possui potencial principalmente em estudos que visam a estimativa da produtividade em condições de estresse hídrico.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a eficácia dos índices espectrais e térmicos no monitoramento do estresse hídrico em plantações de algodão, destacando a superioridade do CWSI em comparação aos índices espectrais: NDVI, GRVI e Red Edge Ratio. O CWSI se mostrou mais sensível e preciso na detecção de estresse hídrico, especialmente durante a fase de Floração, quando a demanda hídrica é maior.

Embora não tenha sido avaliado sistematicamente nesse estudo, análises qualitativas de outras imagens adquiridas ao longo do período estudado, indicaram que a superioridade expressiva do CSWI sobre os índices multispectrais é reduzida fortemente em condições atmosféricas menos favoráveis, como na presença de nuvens finas do tipo Cirrus durante a aquisição das imagens.

Os modelos multivariados, com diferentes combinações do CWSI com os índices espectrais, mostraram desempenho superior aos modelos univariados, oferecendo uma análise mais abrangente e precisa do estresse hídrico nas plantações.

O agrupamento das variedades por características fisionômicas mostrou que variedades com estrutura quadrada e de porte mais baixo tendem a ser mais resistentes ao estresse hídrico.

A filtragem dos dados contribuiu para a melhoria do desempenho dos modelos, evidenciada pelos maiores valores de Pseudo R^2 e OC.

Foi observado que parte das variedades de algodão submetidas a condições de estresse hídrico, apresentaram maior produtividade do que aquelas cultivadas sob irrigação, o que sugere que essas variedades possuem características genéticas que conferem maior resistência ao estresse hídrico.

Os resultados reforçam a importância do uso integrado de índices térmicos e espectrais para o monitoramento do estresse hídrico, especialmente em fases críticas do ciclo da cultura, como a floração.

Recomenda-se para trabalhos futuros, aprofundar a análise da variabilidade genética e fisiológica das variedades de algodão em resposta ao estresse hídrico, e um controle mais rigoroso dos períodos e da quantidade de irrigação.

REFERÊNCIAS

- ABRAPA. **Algodão no Mundo**. Brasília: 2023. Disponível em: <<https://www.abrapa.com.br/Paginas/dados/algodao-no-mundo.aspx>>. Acesso em: 23 abr. 2023.
- ABRAPA. **Liderança na exportação torna Brasil protagonista no mercado têxtil mundial**. Brasília: 2024. Disponível em: <<https://abrapa.com.br/2024/10/30/lideranca-na-exportacao-torna-brasil-protagonista-no-mercado-textil-mundial/>>. Acesso em: 05 nov. 2024.
- AGUIAR, A. T. E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; TUCCI, M. L. S.; de CASTRO, T. C. F. 2014. **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 7. ed. rev. e atual. Campinas, SP, Instituto Agronômico, 2014. 452 p. (Boletim IAC, n.º 200)
- AHMAD, Hafiz Shahzad et al. Improving water use efficiency through reduced irrigation for sustainable cotton production. **Sustainability**, v. 13, n. 7, p. 4044, 2021.
- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.
- AKAIKE, Hirotugu. A new look at the statistical model identification. **IEEE transactions on automatic control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.
- ALVINO, Arturo; MARINO, Stefano. Remote sensing for irrigation of horticultural crops. **Horticulturae**, v. 3, n. 2, p. 40, 2017.
- AMPA, Associação Matogrossense de Produtores de Algodão. Disponível em: <<https://ampa.com.br/historia-do-algodao/>> Acesso em: Jun. 2024.
- AMPA. Associação Mato-grossense dos Produtores de Algodão. **História do algodão**. Cuiabá, 2023. Disponível em: <<https://ampa.com.br/historia-do-algodao/>>. Acesso em: 20 mar. 2023.
- ANDRADE, C. M. S., et al. Respostas espectrais de culturas agrícolas ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura**, v. 94, n. 2, p. 123-134, 2019.
- ANDRADE, R. G. et al. **Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) como plataforma para monitoramento da produção agropecuária: estudo de caso para o milho forrageiro**. 2019.
- APOLO-APOLO, O. E.; MARTÍNEZ-GUANter, J.; PÉREZ-RUIZ, M.; EGEA, G. Design and assessment of new artificial reference surfaces for real time monitoring of

crop water stress index in maize. **Agric. Water Manag.**, v. 240, n. 1, p. 106304, out. 2020.

ARULBALAJI, P. Analysis of land use/land cover changes using geospatial techniques in Salem district, Tamil Nadu, South India. **SN Applied Sciences**, v. 1, p. 462, 2019.

AYANLADE, A. Evaluation of vegetation indices and their relationship with vegetation types. **Geospatial Journal**, v. 4, n. 3, p. 45-57, 2017.

AZEVEDO, P.V.D.; SILVA, F. D. D. S. Risco climático para o cultivo do algodoeiro na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 408-416, 2007.

BAKER, J. T.; GITZ, D. C.; PAYTON, P.; WANJURA, D. F.; UPCHURCH, D. R. Using leaf gas exchange to quantify drought in cotton irrigated based on canopy temperature measurements. **Agron. J.** v. 99, p. 637–644, 2007.

BALLESTER, C.; BRINKHOF, J.; QUAYLE, W. C.; HORNBUCKLE, J. Monitoring the Effects of Water Stress in Cotton Using the Green Red Vegetation Index and Red Edge Ratio. **Remote Sens.** v. 11, n. 7, p. 873, 2019.

BATISTA, C. H.; AQUINO, L. A.; SILVA, T. R.; SILVA, H. R. F. Crescimento e produtividade da cultura do algodão em resposta a aplicação de fósforo e métodos de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, CE, v. 4, n. 4, p. 197-206, 2010.

BELLVERT, J.; ZARCO-TEJADA, P.J.; GIRONA, J.; FERERES, E. Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 15, n. 4, p. 361–376, 2014.

BELTRÃO, N. E. M. **Fisiologia da produção do algodoeiro**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 8 p. (Circular técnica, 94).

BELTRÃO, N. E. M.; AZEVEDO, D. M. P. de. **O agronegócio do Algodão no Brasil**. 2. ed. Campina Grande: Embrapa, 2008, 1309p.

BELTRÃO, N. E. M.; SOUZA, J. G. Fitologia do algodoeiro herbáceo (Sistemática, organografia e anatomia). In: BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999, v. 1, p. 55-86.

BESSA, R. T. **Termografia na avaliação da temperatura de mudas de Tagetes erecta cultivadas em diferentes ambientes com e sem hidrorretentor**. 2021. 54 f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

BILLAH, Masum et al. Progressive genomic approaches to explore drought-and salt-induced oxidative stress responses in plants under changing climate. **Plants**, v. 10, n. 9, p. 1910, 2021.

BIRTH, G. S.; MCVEY, G. Measuring the colour of growing turf with a reflectance spectrophotometer. **Agronomy Journal**, v. 60, n. 6, p. 640-643, 1968.

BLASCHKE, Thomas. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 65, n. 1, p. 2-16, 2010.

BOOPATHI, N. Manikanda et al. Resilient Cotton for Abiotic Stresses: Realizing Genetic Gains Through Translational Genomics. In: **Genomic Designing for Abiotic Stress Resistant Technical Crops**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 71-98. Khan, Z., Khan, S.H., Ahmed, A. *et al.* Genome editing in cotton: challenges and opportunities. *J Cotton Res* **6**, 3 (2023). <https://doi.org/10.1186/s42397-023-00140-3>

BOOPATHI, N. Manikanda et al. Resilient Cotton for Abiotic Stresses: Realizing Genetic Gains Through Translational Genomics. In: **Genomic Designing for Abiotic Stress Resistant Technical Crops**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 71-98.

BORÉM, A.; FREIRE, E. C. **Algodão do Plantio a Colheita**. Viçosa: UFV, 2014. 312p.

BRAMLEY, R. G. V. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development and adoption as a guide to its appropriate application. **Crop and Pasture Science**, v. 60, n. 3, p. 197217, 2009.

BRAMLEY, R. G. V.; PROFFITT, A. P. B. Managing variability in viticultural production. **The Australian Grapegrower and Winemaker**, v. 427, p. 11-16, 1999.

BRANDÃO, Z. N. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 6, p. 156172, 2001.

BUTT, A., et al. Land use change mapping and analysis using remote sensing and GIS: a case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 18, p. 251-259, 2015.

CAMPO & NEGÓCIO. **Consumo mundial de alimentos deve aumentar 62% até 2025**. 2022. Disponível em: <<https://revistacampoenegocios.com.br/consumo-mundial-de-alimentos-deve-aumentar-62-ate-2025/>>. Acesso em: 23 maio. 2023

CARVALHO, L. P.; SALGADO, C. C.; FARIAS, F. J. C.; CARNEIRO, V. Q. Estabilidade e adaptabilidade de genótipos de algodão de fibra colorida quanto aos caracteres de fibra. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 598-605, 2015.

CASTANEDO, C. I.; TARPANI, J. R.; MALDAGUE, X. P. Non destructive testing with thermography. **European Journal of Physics**, v. 34, p. S91 – S109, 2013.
[https://doi: 10.1088/01430807/34/6/S91](https://doi.org/10.1088/01430807/34/6/S91)

CHEN, J. M. Evaluation of Vegetation Indices and a Modified Simple Ratio for Boreal Applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 22, p. 229-242, 1996.

CHRISTIANSON, J. A.; LLEWELLYN, D. J.; DENNIS, E. S.; WILSON, I. W. Global Gene Expression Responses to Waterlogging in Roots and Leaves of Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) **Plant Cell Physiol.** 51(1): 21–37. 2010.

CLARO, André M. et al. Future Agricultural Water Availability in Mediterranean Countries under Climate Change: A Systematic Review. **Water**, v. 16, n. 17, p. 2484, 2024.

CLAWSON, K. L.; JACKSON, R. D.; PINTER, P.J. Evaluating plant water stress with canopy temperature differences. **Agron. J.**, v. 81, p. 858-863, 1989.

COELHO, A. B. A cultura do algodão e a questão da integração entre preços internos e externos. **Rev. Econ. Sociol. Rural**, v. 42, n. 1, 2004.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF, safra 2022/23, n. 7, 2023b. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 28 mai. 2023.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **AgroConab Mensal – fevereiro 2023**. Brasília, 2023a. Disponível em:< <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-agroconab>>. Acesso em: 28 mai. 2023.

CONAB -COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento safra brasileira de grãos, Brasília, DF, Safra 2023/24, v.11, n.7 -Sétimo levantamento, p. 1-117, Abr. 2024.

COSTA, J. D. O.; COELHO, R. D.; BARROS, T. H. S.; JUNIOR, E. F.; FERNANDES, A. L. T. Canopy thermal response to water deficit of coffee plants under drip irrigation. **Irrigation and Drainage**, v. 69, n. 3, p. 472-482, 2020.

COSTA, S. R., BUENO, M. G. **A saga do algodão: das primeiras lavouras à ação na OMC**. Rio de Janeiro: Insight Engenharia, 2004, 144p.

CRUSIOL, L. G.T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R. CEZAR, E.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.;

FARIAS, J. R. B. F. UAV based thermal imaging in the assessment of water status of soybean plants, **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 9, p. 3243-3265, 2020.

D'OLIVEIRA, P. S.; HOTT, M.; C.; ANDRADE, R. G.; MAGALHÃES JUNIOR, W. C. P. **Aplicações da agricultura de precisão em pastagens**. Juiz de fora, MG, 2023. 29 p. (Circular técnica, 127).

DANIEL, D. F.; QUEIROZ, T. M.; DALLACORT, R.; BARBIERI, J. D. Aptidão agroclimática para a cultura do algodão em três municípios do estado de Mato grosso, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 2, p. 257-270, 2021.

DAYUBE, S. O., DE JESUS, M. L., DE ASSIS VIANA, S. B. Índice de estresse hídrico na cultura do algodão para fins do manejo de irrigação. **Revista Univap**, v. 22, n. 40, p. 503. 2017. <https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v22i40.1097>

DEEBA, F.; PANDEY, A. K.; RANJAN, S.; MISHRA, A.; SINGH, R.; SHARMA, Y. K.; SHIRKE, P. A.; PANDEY, V. Physiological and proteomic responses of cotton (*Gossypium herbaceum* L.) to drought stress. **Plant Physiol. Biochem.**, v. 53, p. 6–18, 2012.

DEJONGE, K. C.; TAGHVAEIAN, S.; TROUT, T. J.; COMAS, L. H. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. **Agric. Water Manag.**, v. 156, p. 51-62, 2015.

DOS ANJOS SOARES, Lauriane Almeida et al. Estratégias de manejo do déficit hídrico em fases fenológicas do algodoeiro colorido. **Irriga**, v. 25, n. 4, p. 656-662, 2020.

DURAND, M.; MURCHIE, E. H.; LINDFORS, A. V.; URBAN, O.; APHALO, P. J.; ROBSON, T. M. Diffuse solar radiation and canopy photosynthesis in a changing environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 311, p. 108684, 2021.

EKINCI, R.; BASBAĞ, S.; KARADEMİR, E.; KARADEMİR, Ç. The Effects of High Temperature Stress on some Agronomic Characters in Cotton. **Pakistan Journal of Botany**, v. 49, n. 2, p. 503-508, 2017.

EPIPHANIO, 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, n. 6, p.445-454, 1996.

FERREIRA, A. C. B., BORIN, G. G. B., SILVA FILHO, J. L., BOGIANI, J. C. Épocas de semeadura, cultivares e densidades de plantas para algodão adensado em segunda safra. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 397-405, 2015.

FOX, John. **Applied regression analysis and generalized linear models**. Sage publications, 2015.

FRANKLIN, S. **Remote Sensing for Sustainable Forest Management**. 1 ed. Lewis publisher, Boca Raton, Florida. 2001. 407 p.

GAO, X., et al. Optical – biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 609-620, 2000.

GARDNER, B. R.; BLAD, B. L.; GARRITY, D.P.; WATTS, D. G. Relationships between crop temperature, grain yield, evapotranspiration and phenological development in two hybrids of moisture stressed sorghum. **Irrigation Science**, v. 2, n. 4, p. 213-224, 1981.

GITELSON, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 160, n. 3, p. 271-282, 2003.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289-298, 1996.

GONZAGA, C. A. C.; FERNANDES, T. A.; BOLDRIN, J. L.; CORREA, M. S. A. Sensoriamento remoto e o monitoramento da degradação florestal por entidades governamentais do Brasil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, e28811528323, 2022. [h](#)

GONZALEZ-DUGO, V.; TESTI, L.; VILLALOBOS, F. J.; LÓPEZ-BERNAL, A.; ORGAZ, F.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FERERES, E. Empirical validation of the relationship between the crop water stress index and relative transpiration in almond trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, p. 292-293, 2020.

GUINN, G.; MAUNEY, J. R. Fruting in of cotton: I. Effects of moisture status on flowering. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 90-94, 1984a.

GUINN, G.; MAUNEY, J. R. Fruting in of cotton: II. Effects of plant moisture status and active boll load on boll retention. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 94-98, 1984b.

GUO, Huijuan et al. Ionomic and transcriptomic analyses of two cotton cultivars (*Gossypium hirsutum* L.) provide insights into the ion balance mechanism of cotton under salt stress. **PLoS One**, v. 14, n. 12, p. e0226776, 2019.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY E.; ZARCOTEJADA, P. J.; TRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of

crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004.

HAN, M.; ZHANG, H.; CHÁVEZ, J. L.; MA, L.; TROUT, T.J.; DEJONGE, K. C. Improved soil water deficit estimation through the integration of canopy temperature measurements into a soil water balance model. **Irrigation Science**, v. 36, n. 3, p. 187-201, 2018.

HASAN, M. M., et al. (2019). "Comparative transcriptomic analysis of biological process and key pathways in three cotton (*Gossypium* spp.) species under drought stress." **International Journal of Molecular Sciences**, 20(9), 2076.

HASSANI, K., et al. Assessing the impact of spatial resolution of UAS-based remote sensing and spectral resolution of proximal sensing on crop nitrogen retrieval accuracy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 44, n. 14, p. 4441-4464, 2023.

HEARN, A. B. The principals of cotton water relations and their application in management. In: CONSTABLE, G. A. and FORRESTER, N. W. (Eds.) Challenging the Future: **Proceedings of the World Cotton Research Conference - 1**. Brisbane, Austrália, February 14-17, 1994, CSIRO, Melbourne, p 66-92. 1995.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. [http:// dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)

HUETE, A., et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agric. Meteorol.**, 24, p. 45-55, 1981.

INDEA. **Algodão**. Cuiabá: 2023. Disponível em: <<https://www.indea.mt.gov.br/-/8523374-algodao>>. Acesso em: 29 mai. 2023.

INNOVATIONE AGROFOOD DESIGN. **Índices de vegetação na agricultura de precisão**. 2020. Disponível em: <<https://innovatione.eu/en/2020/04/20/vegetation-indices-in-precision-agriculture/>>. Acesso em: 01 jun. 2023.

INPE. **Taxas de desmatamento**. 2023. Disponível em:
<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates
>. Acesso em: 31 mai. 2023.

JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; PINTER, P.J. Canopy temperature as a crop water stress indicator *Water. Resour. Res.*, v. 17, n. 4, p. 1133-1138, 1981. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>

JACKSON, R. D.; KUSTAS, W. P.; CHOUDHURY, B. J. A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, v. 9, p. 309-317, 1988. [https://doi: 10.1007/BF00296705](https://doi.org/10.1007/BF00296705)

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*.

JANSSEN, L. L. F.; VAN DER VOET, H. Performance measures for models of categorical data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 44, n. 1-2, p. 11-24, 1998.

JENSEN, John R.; EPIPHANIO, José Carlos Neves. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2009.

JONES, F. **Pulverização por drones**. 283 ed. 2019. Disponível em:<<https://revistapesquisa.fapesp.br/pulverizacao-por-drones/>>. Acesso em: 02 jun. 2023.

JORGE, L. A. de C.; INAMASU, R. Y. 2014. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 109-134.

JUTURU, V. N.; MEKALA, G. K.; KIRTI, P. B. Current status of tissue culture and genetic transformation research in cotton (*Gossypium* spp.). *Plant Cell Tiss Organ Cult*, v. 120, n.3, p. 813–839, 2015.

KANTARTZI, S. K., ULLOA, M., SACKS, E., STEWART, J. M. Assessing genetic diversity in *Gossypium arboreum* L. cultivars using genomic and EST-derived microsatellites. *Genetica*, v. 36, n. 1, p. 141–147, 2009.

KATIMBO, A.; RUDNICK, D. R.; DEJONGE, K. C.; LO, T. H.; QIAO, X.; FRANZ, T. E.; NAKABUYE, H. N.; DUAN, J. Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics. *Agricultural Water Management*, v. 266, n. 31, p. 107575, 2022.

KAUFMAN, Y. J.; TANRE, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI). **IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 261-270, 1992. <http://dx.doi.org/10.1109/36.134076>

KULLBERG, E. G.; DEJONGE, K. C.; CHÁVEZ, J. L. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. **Agric. Water Management**, v. 179, p. 64-73, 2017. <https://doi:10.1016/j.agwat.2016.07.007>.

LEBOEUF, J. Practical applications of remote sensing technology: an industry perspective. **HortTechnology**, v. 10, n. 3, p. 475-480, 2000.

LEE, J. A., FANG, D. D. Cotton as a World Crop: Origin, History, and Current Status. **Agronomy Monograph**. 2 ed., v. 2, 2015. <https://doi:10.2134/agronmonogr57.2013.0019>

LELONG, C. C. D.; BURGER, P.; JUBELIN, G.; ROUX, B.; LABBÉ, S.; BARET, F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. **Sensors**, v. 8, p. 3557-3585, 2008. <http://dx.doi.org/10.3390/s8053557>

LOKA, D. A.; OOSTERHUIS, D. M.; RITCHIE, G. L. Water-deicit stress in cotton. In: OOSTERHUIS, D. M. (ed). **Stress Physiology in Cotton**, Number 7, Cotton Foundation Reference Book Series. The Cotton Foundation, Codiva Tennessee, USA, p 37-72. 2011.

LOPES, C. F.; REYNOLDS, D. R. Advances in remote sensing for agriculture. *Journal of Agricultural Research*, v. 67, n. 2, p. 101-110, 2012.

LOPES, M.; REYNOLDS, M. P. Stay-green in spring wheat can be determined by spectral reflectance measurements (normalized difference vegetation index) independently from phenology. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 10, p. 3789-3798, 2012.

MAES, W.H.; BAERT, A.; HUETE, A.R.; MINCHIN, P. E. H.; SNELGAR, W. P.; STEPPE, K. A new wet reference target method for continuous infrared thermography of vegetations. **Agric. Meteorol.**, v. 226–227, p. 119-131, 2016. <https://doi:10.1016/j.agrformet.2016.05.021>

MAGWANGA, H. R., et al. (2020). "Multi-Omic Approaches for the Development of Drought-Tolerant Cotton (*Gossypium* spp.): Insights into Osmotic and Ionic Regulation." **Journal of Experimental Botany**, 71(16), 4797-4810.

MapBiomass. **Relatório Anual de Desmatamento 2022** - São Paulo, Brasil - MapBiomass, 2023 - 125 páginas. <http://alerta.mapbiomas.org>

MAITELLI, G. T. Interações atmosfera – superfície. In: **Geografia de Mato Grosso: Território, Sociedade, Ambiente**. Gislaene Moreno e Tereza Cristina Higa (Organizadoras). Cuiabá: Entrelinhas, 2005.

MARTINELLI, L. A.; JOLY, C. A.; NOBRE, C. F.; SPAROVEK, G. A falsa dicotomia entre a preservação da vegetação natural e a produção agropecuária Pontos de Vista. **Biota Neotropica**, v. 10, n. 4, p. 323-330, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032010000400036>

MARUR, A. C. J., RUANO, O. Escala do Algodão. **Revista de Oleaginosas e Fibrosas**, v. 5, n. 2, p. 313-317, 2001.

MARUR, C. J. Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Recomendações para cultura do algodoeiro no Paraná**. Londrina, 1993. p. 2-7. (Circular, 107).

MCFADDEN, D. (1973). "Conditional logit analysis of qualitative choice behavior." In *Frontiers in Econometrics* (P. Zarembka, Ed.), Academic Press, New York, pp. 105-142.

MATO GROSSO. Instrução Normativa Conjunta SEDEC/INDEA-MT Nº 001/2016. Dispõe sobre normas de [insira aqui o assunto principal, como regulamentação agrícola ou ambiental]. Cuiabá, MT: SEDEC/INDEA-MT, 2016.

MERON, M.; SPRINTSIN, M.; TSIPRIS, J.; ALCHANATIS, V.; COHEN, Y. Foliage AGRARIAN ACADEMY, Centro Científico Conhecer – Jandaia-GO, v.8, n.16 P.103 2021 temperature extraction from thermal imagery for crop water stress determination. **Precision Agriculture**, v. 14, p. 467–477, 2013.

MEDEIROS, R. M.; NUNES, J. C.; DE HOLANDA, R. M.; DE FRANÇA, M. V. Aptidões climáticas: caju, palma forrageira e milho no município de São Bento do Una-PE, Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 03, n. 03 p. 310-318, 2018.

MEEHL, G. A.; TEBALDI, C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. **Science**, v. 30, n. 5686, p. 994-997, 2004.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, 2012. 266 p.

MOREIRA, A., et al. Wavelet approach applied to EVI/MODIS time series and meteorological data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 147, p. 335-344, 2019.

MOREIRA, S. de F.; SANTOS, S. D. O.; JÚNIOR, A. P. Análise quantitativa e qualitativa de um solo degradado pela pecuária. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47698-47715, 2020.

MUTANGA, O.; DUBE, T.; GALAL, O. Remote sensing of crop health for food security in Africa: Potentials and constraints. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, Amsterdam, v. 8, p. 231239, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.004>

NAGELKERKE, N. J. D. A note on a general definition of the coefficient of determination. **Biometrika**, v. 78, n. 3, p. 691-692, 1991.

NATIONAL COTTON COUNCIL OF AMERICA. **The Story of Cotton**. Washington: 2023. Disponível em: <<https://www.cotton.org/pubs/cottoncounts/story/#:~:text=When%20Columbus%20discovered%20America%20in,the%20James%20River%20in%20Virginia>>. Acesso em: 21 abr. 2023.

O'SHAUGHNESSY, S. A.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D.; HOWELL, T. A. Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. **Agricultural Water Management**., v. 98, n. 10, p. 1523-1535, 2011.

OLIVEIRA, R. S.; OLIVEIRA NETO, O. B.; WANCHAO, N.; COSTA, P. H. A.; EVANGELISTA, I. B. R.; LEONARDECZ, E.; ROMANO, E.; COUTINHO, M. V.; VIANA, A. A. B.; SILVA, M. C. M. da S.; ROCHA, T. L.; GROSSI DE SÁ, M. F. 2007. **Transformação de algodoeiro via tubo polínico: otimização e perspectivas de aplicação**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos, 2007. 30 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 184).

ONU. **População mundial deve ultrapassar marca de 8 bilhões ainda este ano**. 2022. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2022/07/1794942>>. Acesso em: 22 abr. 2023.

OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of a cotton plat. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. dos. (Ed.). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1999. p. 35-55.

OSMOLOVSKAYA, N.; SHUMILINA, J.; KIM, A.; DIDIO, A.; GRISHINA, T.; BILOVA, T.; KELTSIEVA, O. A.; ZHUKOV, V.; TIKHONOVICH, I.; TARAKHOVSKAYA, E.; FROLOV, A.; WESSJOHANN, L. A. Methodology of Drought Stress Research: Experimental Setup and Physiological Characterization. **Int. J. Mol. Sci.**, v. 19, n. 12, p. 4089, 2018.

PASSOS, S. M. de G. **Algodão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1977. 424 p

PASSOS, S. M. G. **Algodão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1982. 597 p.

PASSOS, S. M. G.; CANÉCHIO, V. F.; JOSÉ, A. **Principais culturas**. 2.ed. São Paulo: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1987. 512 p.

PEIJUN, D. U.; XINGLI, L. I.; WEN, C. A. O.; YAN, L. U. O.; ZHANG, H. Monitoring urban land cover and vegetation change by multi-temporal remote sensing information. **Min Sci Technol.**, China, v. 20, n. 6, p. 922–932, 2010.

PEÑUELAS, J.; PIÑOL, J.; OGAYA, R.; FILELLA, I. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 13, p. 2869-2875, 1997.

POTGIETER, A. B. et al. Multi-spectral imaging from an unmanned aerial vehicle enables the assessment of seasonal leaf area dynamics of sorghum breeding lines. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017.

POTGIETER, A. B., et al. The integration of remotely sensed data with crop models to predict crop yields. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 243-256, 2017.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE A.R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing Environmental**, v. 48, p. 119-126, 1994.

RANJITHA, G.; SRINIVASAN, M. R.; RAJESH, Abburi. Detection and estimation of damage caused by thrips *Thrips tabaci* (Lind) of cotton using hyperspectral radiometer. **Agrotechnology**, v. 3, n. 1, p. 123, 2014.

RNC (REGISTRO NACIONAL DE CULTIVARES). **CULTIVARWEB *Gossypium hirsutum* L.** 2023. Disponível em: <https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php?txt_ordem=&postado=1&acao=pesquisar>. Acesso em: 29 mai. 2023.

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soiladjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, 1996.

ROSELEM, C. A. Planta e algodão - Crescimento do algodão. In: BÉLOT, J. L.; VILELA, P. M. C. A. **Manual de boas práticas de manejo do algodoeiro em Mato Grosso**. 4ª Ed., IMAm e AMPA, Cuiabá, MT, 2020. P. 104-111.

ROSOLEM, C. A. Fenologia e ecofisiologia no manejo do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. **Algodão no cerrado do Brasil**. Brasília: Associação Brasileira do Produtores de Algodão, 2007a. p.649-688.

ROSOLEM, C. A. **Produtividade máxima da soja**. Rondonópolis: Fundação MT, 2007b. p. 237-244. (Boletim de Pesquisa de Soja).

ROUJEAN, J. L.; BREON, F. M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 3, p. 375-384, 1995.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Texas: Texas A&M University, 1974.

SANTIAGO, Fábio et al. **Protocolo de boas práticas para o algodão em consórcios agroecológicos: regras e recomendações de cultivo**. 2022.

SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DE MINAS GERAIS. **Algodão**. Belo horizonte, MG. 2023. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.reformaagraria.mg.gov.br/images/documentos/perfil_algodao_abril__2023[1].pdf>. Acesso em: 29 mai. 2023

SEPLAN – Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral. **Zoneamento Sócio-Econômico-Ecológico do Estado de Mato Grosso**. Cuiabá - MT: 2000.

SEVERINO, L. S., MORAIS RODRIGUES, S. M. M., CHITARRA, L. G.; FILHO, J. L.; CONTINI, E.; MOTA, M.; MARRA, R.; ARAÚJO. **Produto: ALGODÃO - Parte 01: Caracterização e Desafios Tecnológicos. Série desafios do agronegócio brasileiro (NT3)**, 2019.p. 1-29.

SHANMUGAPRIYA, P. et al. Applications of remote sensing in agriculture-A Review. **Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci**, v. 8, n. 01, p. 2270-2283, 2019.

SHANMUGAPRIYA, P., RATHIKA, S., RAMESH, T., JANAKI, P. Applications of Remote Sensing in Agriculture - A Review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 8, n. 1, p. 2270-2283, 2019.

SHIRATSUCHI, L. S., et al. Remote sensing applications in agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 131, p. 258-271, 2014.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 58-73.

SILVA, C. J.; SILVA, C. A.; FREITAS, C. A.; GOLYNSKI, A.; SILVA, L. F. M.; FRIZZONE, J. A. Tomato water stress index as a function of irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 22, n.2, p. 95-100, 2018.

SILVA, I. P. F.; JUNIOR, J. F. S.; ARALDI, R.; TANAKA, A. A.; GIROTTO, M.; BOSQUE, G. G.; LIMA, F. C. C. Estudo das fases fenológicas do algodão (*Gossypium hirsutum* L.). **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 10, n. 20, p. 1-10, 2011.

SNIDER, J., VIRK, G., PARKASH, V., KAUR, N. Effects of high temperatura and drought on cotton physiology, yield, and fiber quality. In: ECHER, F. R.; ROSOLEM, C. A. **Fisiologia aplicada ao manejo do algodoeiro**. Instituto Mato-Grossense do Algodão: Cuiabá (MT), 2022.

SOUTO, R. N. **Avaliação de sistemas imageadores acoplados em veículo aéreo não tripulado no monitoramento de estresse hídrico em cultivos de algodão no bioma cerrado, mato grosso**. 2022. 89 f. Tese (Doutorado em Geografia) Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.

SULTANA, F.; DEV, W.; XIN, M.; HAN, Y.; FENG, L.; LEI, Y.; YANG, B.; WANG, G.; LI, X.; WANG, Z.; XING, F.; XIONG, S.; YABING LI, Y. Competition for Light Interception in Different Plant Canopy Characteristics of Diverse Cotton Cultivars. **Genes**, v. 14, n. 2, p. 364; 2023. <https://doi.org/10.3390/genes14020364>

SZÉKELY, B.; KARÁTON, D. DEM-based morphometry as a tool for reconstructing primary volcanic landforms: Examples from the Börzsöny Mountains, Hungary. **Geomorphology**, v. 63, n. 1-2, p. 25-37, 2004.

TANG, Y., et al. Integrating principal component analysis with statistically-based models for analysis of causal factors and landslide susceptibility mapping. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 124159, 2020.

TARIFA, J. R. **Mato Grosso: clima análise e representação cartográfica**. Cuiabá, MT: Entrelinhas, 2011.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Climate change hotspots over South America: From CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. **Theoretical and Applied Climatology**, n. 117, p.579-587, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1030-x>.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

VACCHIANO, M. C.; SANTOS, J. W. C.; ANGEOLETTO, F. H. S.; SILVA, N. M. Do Data Support Claims That Brazil Leads the World in Environmental Preservation? **Environmental Conservation**, v. 46, p. 118-120, 2019.

VARGAS, E. V. A Mudança do Clima na Perspectiva do Brasil. **Revista Interesse Nacional**. Ano 1, Edição 1, 2008. p. 45-55.

VITALE, Giuseppe Salvatore et al. Agronomic Strategies for Sustainable Cotton Production: A Systematic Literature Review. **Agriculture**, v. 14, n. 9, p. 1597, 2024.

WANG, J.; SAMMIS, T. W.; GUTSCHICK, V. P.; GEBREMICHAEL, M.; DENNIS S. O.; HARRISON, R. E. Review of satellite remote sensing use in forest health studies. **Open Geogr J**, v. 3, n. 1, p. 28–42, 2010.

WANG, L.; QIU, G. Y.; ZHANG, X.; CHEN, S. Application of a new method to evaluate crop water stress index. **Irrigation Science**, v. 24, n. 1, p. 49-54, 2005.

WANG, R.; JI, S.; ZHANG, P.; MENG, Y.; WANG, Y.; CHEN, B.; ZHOU, Z. Drought effects on cotton yield and fiber quality on different fruiting branches. **Crop Science**, v. 56, n. 3, p. 1265-1276, 2016.

WELLS, R.; STEWART, A. M. Morphological Alterations in Response to Management and Environment. In: STEWART, J. M.; OOSTERHUIS, D. M.; HEITHOLT, J. J.; MAUNEY, J. R. **Physiology of Cotton**. Springer, Dordrecht. 2010.

XIMENES, Luciano Feijão; COÊLHO, Jackson Dantas. **Algodão: produção e mercados**. 2021.

YEATES, S. Efeitos do estresse hídrico na fisiologia do algodoeiro. In: Echer, F. R. **O algodoeiro e os estresses abióticos Temperatura, luz, água e nutrientes**. Instituto Matogrossense do Algodão (IMA), 2014, Cap 3.

ZAHID, K. R.; ALI, F.; SHAH, F.; YOUNAS, M.; SHAH, T.; SHAHWAR, D.; HASSAN, W.; AHMAD, Z.; QI, C.; Lu, Y.; IQBAL, A.; WU, W. Response and tolerance mechanism of cotton *Gossypium hirsutum* L. to elevated temperature stress: A review. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 937, 2016.

ZENG, Y., et al. Advances in remote sensing technology for monitoring crop growth. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1784, 2022.

ZENG, Y.; HAO, D.; HUETE, A.; DECHANT, B.; BERRY, J.; CHEN, J. M.; JOINER, J.; FRANKENBERG, C.; BOND-LAMBERTY, B.; RYU, Y.; XIAO, J.; ASRAR, G. R.; MIN CHEN, M. Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 3, p. 477–493, 2022.

ZHU, Yaqiu et al. Uncovering the Drivers and Regional Variability of Cotton Yield in China. **Agriculture**, v. 13, n. 11, p. 2132, 2023.