**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ - UFPI**
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA**
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-PPGA**
**DOUTORADO EM AGRONOMIA**

**ALZENEIDE DA SILVA LOPES**

# DETECÇÃO DO STATUS HÍDRICO POR IMAGENS AÉREAS, CRESCIMENTO DE PLANTAS E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE MILHO SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS

**Teresina**
**2022**

**ALZENEIDE DA SILVA LOPES**

# DETECÇÃO DO STATUS HÍDRICO POR IMAGENS AÉREAS, CRESCIMENTO DE PLANTAS E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE MILHO SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – PPGA da Universidade Federal do Piauí – UFPI, na área de concentração Produção Vegetal e linha de Pesquisa Manejo do solo e da água, como requisito para obtenção do título de Doutora em Agronomia.

Orientador: Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior
Coorientador: Dr. Edson Alves Bastos

**Teresina**
**2022**

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial CCA
Serviço de Representação da Informação

L864d Lopes, Alzeneide da Silva.
Detecção do status hídrico por imagens aéreas, crescimento de plantas e produtividade de grãos de milho sob diferentes regimes hídricos / Alzeneide da Silva Lopes. - Teresina, 2022.
118 f.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Teresina, 2022.
"Orientador: Prof. Dr. Anderson Soares de Andrade Júnior."

1. Deficiência Hídrica. 2. Água - Uso Eficiente. 3. Drone. 4. Índice de Vegetação. I. Andrade Júnior, Anderson Soares de. II. Título.

CDD 631.587

Bibliotecário: Rafael Gomes de Sousa - CRB3/1163

**ALZENEIDE DA SILVA LOPES**

**DETECÇÃO DO STATUS HÍDRICO POR IMAGENS AÉREAS, CRESCIMENTO DE PLANTAS E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE MILHO SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS.**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

APROVADA em 26 de agosto de 2022.

Comissão Julgadora:

gov.br

**Profª. Drª. Magna Soelma Beserra de Moura – EMBRAPA Semiárido**

**Prof. Dr. Milton José Cardoso – EMBRAPA Meio-Norte**

**Prof. Dr. Carlos Antônio Ferreira de Sousa – EMBRAPA**

**Prof. Dr. Luis Gonzaga Medeiros de Figueredo Júnior - UESPI**

gov.br

**Prof. Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior – EMBRAPA Meio-Norte**
(Orientador)

**TERESINA-PI**
**2022**

Aos muitos mestres que a vida me apresentou, em especial Aderson Soares de Andrade Júnior e Edson Alves Bastos.

Ofereço

Aos meus queridos pais, José de Arimateia Lopes Sousa e Maria Oneide da Silva pelo amor, dedicação e ensinamentos que foram fundamentais para a realização dos meus sonhos.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à força magnifica que guia as nossas vidas e integra tudo em um ciclo perfeito, Deus! Pelas oportunidades que tem me proporcionado, pela presença constante em minha vida. Pois “tudo posso naquele que me fortalece”.

Aos meus pais Maria Oneide e José de Arimateia, pelo amor e apoio incondicional e por nunca terem medido esforços para que eu pudesse perseguir meus objetivos; aos meus irmãos Antônio, José, Alzeane, Auriane e Ester, pelo incentivo e apoio nos momentos de dificuldade.

À Universidade Federal do Piauí pela oportunidade de realização da Pós-Graduação.

À Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento (FAPED), pela concessão da bolsa de incentivo à pesquisa.

À Embrapa Meio-Norte pelo apoio financeiro ao projeto, e pela infraestrutura concedida, assim como a disponibilização do espaço físico e auxílio de pessoal para realização do experimento.

Ao meu orientador, Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior, pela grande dedicação aos orientados e por todos os ensinamentos transmitidos, pela paciência e compreensão, que mesmo com as restrições impostas pela pandemia da COVID 2019, me acompanhou e instruiu nessa jornada, e principalmente OBRIGADA pela confiança no meu trabalho, pelo respeito e por prontamente responder a todas as minhas dúvidas.

Ao meu Coorientador, Dr. Edson Alves Bastos, por compartilhar seus conhecimentos, sempre com paciência, compreensão, respeito e dedicação, pelo apoio durante a condução do experimento e sugestões para melhorar a redação da tese, e principalmente pelas palavras de incentivo durante os momentos de dificuldade.

Ao Dr. Carlos Antônio Ferreira de Sousa pela preciosíssima colaboração nas avaliações das medidas de trocas gasosas. Ao Rhafael Casari pela realização do voo com aeronave remotamente pilotada para aquisição das imagens aéreas.

À Rayssa Mousinho e Ingrid Setúbal pela Amizade e pela colaboração nas atividades de condução e avaliação do experimento de campo.

Aos funcionários da Embrapa Meio-Norte, em especial Antônio Vieira, José Anchieta e Francisco das Chagas Sousa, pela ajuda nas atividades de campo.

Agradeço a todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, em especial aos professores Henrique Antunes, Ademir Araújo, Carlos Lima, Edinaldo Mousinho, Jadson Antunes, Francisco Alcântara, Melissa Oda e Aurenívia Bonifácio pelo conhecimento transmitido.

Ao Silas Tavares Mesquita, secretário do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pelo pronto atendimento sempre que solicitado.

Aos meus colegas de ‘Pós Graduação, em especial, Iúna Carmo, Anne Carolina Melo, Alcilane Arnald, Silvestre Paulino, Anderson Chaves, Edson Neto, José Roberto Oliveira, João Pedro Alves Aquino e Antônio Viera Neto, por todos os momentos de convivência.

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão dessa etapa de minha formação acadêmica.

**Minha eterna e singela gratidão...**

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

**Marthin Luther King**

## RESUMO GERAL

A disponibilidade hídrica é um dos fatores mais limitantes para o crescimento, desenvolvimento e a produtividade de grãos do milho. Dessa forma, objetivou-se avaliar a detecção do estresse hídrico por meio do uso de imagens aéreas obtidas por aeronave remotamente pilotada e seus efeitos no crescimento e na produtividade de grãos de híbridos de milho submetidos a diferentes regimes hídricos nas condições de solo e clima de Teresina, PI. O experimento foi conduzido em uma área experimental da Embrapa Meio-Norte, no período de agosto a novembro de 2019. O delineamento experimental adotado foi em bloco casualizados num esquema de parcela subdividida, sendo as parcelas representadas por cinco regimes hídricos (RH), com base na evapotranspiração da cultura (ETc): 40, 60, 80, 100 e 120% da ETc e as subparcelas representadas por três híbridos de milho, onde nos capítulos I e II foram utilizados os híbridos BRS 3046 (híbrido triplo convencional) e o Status VIP3 (híbrido simples transgênico) e para o capítulos três além de BRS 3046 e VIP3, foi utilizado o hibrido duplo convencional BRS 2022 com quatro repetições. Avaliaram-se o crescimento das plantas, componentes de produção, produtividade de grãos, eficiência de uso da água (EUA) e a detecção do status hídrico das plantas, utilizando índice de vegetação (IV) obtido a partir de imagens aéreas obtidas por câmera embarcada em aeronave remotamente pilotada (ARP). O aumento na disponibilidade de água no solo decorrente da aplicação dos RH mais favorecidos (120 e 100% ETc) induziu incremento no acúmulo de matéria seca total (MST), no índice de área foliar (IAF) e na taxa de crescimento da cultura (TCC). O híbrido simples Status VIP 3 apresentou maior acúmulo de MST e maiores valores de IAF e TCC. A produtividade de grãos tende a aumentar com maiores reposições hídricas, independentemente do híbrido. Os componentes de produção (número de espigas por m² e massa de cem grãos) e EUA apresentam incrementos positivos com uma tendência linear crescente à aplicação dos RH. O híbrido simples Status VIP3 apresentou maior produtividade de grãos (10.898,3 kg $ha^{-1}$) e EUA (1,8 kg $m^{-3}$). O aumento na disponibilidade de água no solo induz incremento na condutância estomática (gs), conteúdo relativo de água na folha (CRA) e produtividade de grãos (PG) e reduz o déficit de pressão de vapor na folha (DPV). Os IVs NDVI, TCARI-RE, NGRD e GCI são promissores para a detecção do estado hídrico, enquanto os IVs NDVI e WDRVI são promissores para a estimativa da produtividade de grãos do milho. Os mapas dos IVs NDVI, MNGRD e WDRVI mostram elevada correlação espacial nos parâmetros de gs, VDP, CRA e PG na cultura do milho em resposta aos regimes hídricos aplicados, indicando potencial de aplicação das imagens aéreas adquiridas por ARPs para detecção do status hídrico do milho em condições de campo.

**Palavras chaves:** Deficiência hídrica, eficiência do uso da água, drone, índice de vegetação.

## ABSTRACT

Water availability is one of the most limiting factors for corn growth, development and grain yield. Thus, the objective was to evaluate the detection of water stress through the use of aerial images obtained by remotely piloted aircraft and its effects on growth and grain yield of corn hybrids subjected to different water regimes in soil and climate conditions at Teresina, Piaui State, Brazil. The experiment was conducted in an experimental area of Embrapa Middle North, from August to November 2019. The experimental design was a randomized block in a split-plot scheme, with the plots represented by five water regimes (WR), based on crop evapotranspiration (ETc): 40, 60, 80, 100 and 120% ETc and the subplots represented by three maize genotypes: BRS 3046 (triple conventional hybrid), BRS 2022 (conventional double hybrid) and Status VIP3 (transgenic single hybrid), with four replications. Plant growth, yield components, grain yield, water use efficiency (WUE) and detection of plant water status were evaluated using vegetation index (VI) obtained from aerial images obtained by cameras embedded in remotely piloted aircraft (RPA). The increase in the availability of water in the soil resulting from the application of the most favored WR (120 and 100% ETc) induced an increase in the accumulation of total dry matter (TDM), in the leaf area index (LAI), in the growth rates of the crop (CGR) and net assimilation (NAR). The Status VIP 3 hybrid showed the highest accumulation of TDM, CGR and NAR. Grain yield tends to increase with greater water replacement, regardless of the hybrid. The production components (number of ears per m² and mass of one hundred grains) and WUE present positive increments with an increasing linear tendency to the application of WR. The Status VIP3 hybrid showed higher grain yield (10,898.3 kg $ha^{-1}$) and WUE (1.8 kg $m^{-3}$). The increase in soil water availability induces an increase in stomatal conductance (gs), relative leaf water content (CWR) and grain yield (GY) and reduces the leaf vapor pressure deficit (VPD). The NDVI, TCARI-RE, NGRD and GCI are promising for the detection of water status, while NDVI and WDRVI are promising for estimating corn grain yield. The maps of NDVI, MNGRD and WDRVI show high spatial correlation in the parameters of gs, VPD, CWR and GY in the maize crop in response to the applied water regimes, indicating potential application of aerial images acquired by RPA to detect water status in corn under field conditions.


**Keywords:** Water deficit, water use efficiency, drone, vegetation index.

**SUMÁRIO**

**RESUMO GERAL ..... ix**
**ABSTRACT ..... x**
1. **INTRODUÇÃO GERAL ..... 13**
**2. REVISÃO DE LITERARURA ..... 15**
2.1. Aspectos gerais da cultura ..... 15
2.2. Demanda hídrica e irrigação na cultura do milho ..... 18
2.3. Déficit hídrico ..... 21
2.4. Crescimento de planta ..... 24
2.5. Sensoriamento Remoto aplicado à agricultura ..... 26
2.6. Aeronave Remotamente Pilotada (ARPs) ..... 29
2.7. Índice de Vegetação ..... 31
**3. REFERÊNCIAS ..... 33**
**CAPÍTULO I ..... 41**
Análise de crescimento de híbridos de milho submetidos a diferentes regimes hídricos ..... 41
Resumo ..... 41
Abstract ..... 42
**1. INTRODUÇÃO ..... 43**
**2. MATERIAL E MÉTODOS ..... 44**
**3. RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 47**
**4. CONCLUSÕES ..... 62**
**5. REFERÊNCIAS ..... 63**
**CAPÍTULO II ..... 66**
Produtividade de grãos e eficiência no uso da água em híbridos de milho submetidos a diferentes regimes hídricos ..... 66
Resumo ..... 66
Abstract ..... 67
**1. INTRODUÇÃO ..... 68**
**2. MATERIAL E MÉTODOS ..... 69**
**3. RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 73**
3.1. Lâminas de irrigação e umidade do solo ..... 73
3.2. Produção e componentes de produção ..... 75

**4. CONCLUSÕES ..... 84**
**5. REFERÊNCIAS ..... 85**
**CAPÍTULO III ..... 89**
Detecção do status hídrico em milho utilizando imagens aéreas obtidas por aeronave remotamente pilotada ..... 89
Resumo ..... 89
Abstract ..... 90
**1. INTRODUÇÃO ..... 91**
**2. MATERIAL E MÉTODOS ..... 92**
2.1. Localização, características do local e arranjo experimental ..... 92
2.2. Medidas do status hídrico das plantas ..... 96
2.3. Aquisição das imagens aéreas e pré-processamento ..... 97
2.4. Produtividade de grãos ..... 100
2.5. Análise Estatística ..... 101
**3. RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 102**
**4. CONCLUSÕES ..... 113**
**5. REFERÊNCIAS ..... 114**

# 1. INTRODUÇÃO GERAL

O milho (*Zea mays* L.) é uma das *commodities* agrícolas mais importantes no mundo, sendo a principal fonte energética para ração animal, bem como base alimentar de alguns países e, não menos importante, usado na produção de combustível renovável (CONAB, 2019), representando, portanto, um dos principais cereais cultivados em todo o mundo, e no Brasil situa-se dentre os cereais mais comercializados (MÁXIMO et al., 2019).

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de milho. No país a produção de milho na safra 2019/2020 atingiu aproximadamente 102,5 milhões de toneladas colhidas, representado mais de 9% da estimativa global total de 1,116 bilhões de toneladas de grãos produzido (CONAB, 2021; USDA, 2021). No ano agrícola de 2020/2021, foram cultivados 19,9 milhões de hectares, com produção de 87 milhões de toneladas de grãos. No comparativo com a safra passada houve uma redução de aproximadamente 15,1% na produção de grãos, causada pela baixa disponibilidade hídrica durante o desenvolvimento das lavouras, principalmente de segunda safra (CONAB, 2022). Esses dados indicam que a produção de grãos de milho no Brasil bem como em outras partes do mundo, tem sido regularmente ameaçada pela ocorrência de eventos climáticos desfavoráveis, especialmente períodos de estiagem.

A produtividade de grãos de milho é influenciada por vários fatores ambientais, como as condições climáticas durante a estação de crescimento, a disponibilidade hídrica e as condições de solo. O conteúdo de umidade no solo é de suma importância para manter a produtividade de grãos ideal do milho, e sua manutenção em níveis ideais é facilitada pelo uso da irrigação.

A água é um dos fatores mais limitantes à produtividade de grãos de milho (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Assim, em condição de déficits hídricos, a cultura pode apresentar diferentes respostas de rendimento de grãos, variando de acordo com o período e a intensidade do déficit, interferindo potencialmente na produtividade devido a alterações na área foliar, no florescimento, na polinização e no enchimento de grãos (SOUZA et al., 2016).

Nesse sentido, vários trabalhos têm sido executados em diversas regiões do Brasil, visando definir lâminas que otimizem a produtividade de grãos de milho (BRITO et al., 2013; COSTA et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2015; RIBEIRO et al., 2015; MELO et al., 2018; SOARES et al., 2020). Tais estudos indicam que há respostas diferentes do milho à irrigação, de acordo com o cultivar e com as condições de solo e clima. Dessa forma, há necessidade de pesquisas para avaliar a resposta à irrigação das cultivares modernas de milho, visando reduzir os efeitos do déficit hídrico em sua produtividade final.

Quando as plantas estão em condição de estresse hídrico, elas diminuem sua evapotranspiração (CECCATO et al., 2001), e manifestam vários sintomas, como murchamento das folhas, redução fotossintética, crescimento atrofiado e redução da área foliar. Tais repostas representam efeitos significativos da deficiência hídrica no crescimento das plantas. Portanto, a detecção precoce do estresse hídrico da cultura é fundamental para minimizar a perda de produtividade (WANG et al., 2015).

O estado da água na planta, geralmente é determinado por meio de medições pontuais de parâmetros fisiológicos como condutância estomática, transpiração, conteúdo relativo de água na folha e temperatura do dossel, porém, os métodos empregados nessas determinações são limitados por não representar adequadamente a variabilidade espacial do solo e das culturas (IHUOMA; MADRAMOOTOO, 2017). Recentemente, os estudos de estresse hídrico em plantas, têm se concentrado no uso de imagens aéreas (multiespectrais e térmicas) obtidas com o uso de aeronave remotamente pilotada (ARP) como uma alternativa às medições tradicionais de parâmetros de estresse hídrico de plantas. O uso dessas imagens fornece informações sobre a variabilidade espacial dos parâmetros fisiológicos das culturas (PANIGADA et al., 2014; ROSSINI et al., 2013).

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de lâminas de irrigação sobre o crescimento de plantas e rendimento de grãos em milho, bem como determinar o estado hídrico da cultura por meio de parâmetros gerados a partir de imagens multiespectrais.

# 2. REVISÃO DE LITERATURA

## 2.1 Aspectos gerais da cultura

O milho é uma planta pertencente à família Poaceae e ao gênero *Zea*. Trata-se de uma espécie originária do continente americano (América do Norte), com centro de origem genética no México, onde foi domesticada (SILVEIRA et al., 2015). É uma gramínea tropical pertencente ao grupo de plantas com metabolismo fotossintético C4 que tem como característica possuir elevada eficiência fotossintética (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Para expressão de seu máximo potencial produtivo, a cultura requer temperatura alta, ao redor de 24 e 30 ºC; elevados níveis de radiação e adequada disponibilidade hídrica no solo durante seu ciclo produtivo (NUNES, 2018; SILVA et al., 2021).

O milho é uma das culturas mais cultivada em todo o mundo e possui grande importância econômica, devido ao seu alto valor nutritivo é matéria-prima para produtos utilizados na alimentação humana, animal e também nas indústrias (LUZ et al., 2020; CESCONETTO et al., 2021). Além disso, o milho possui importância social, pois é um alimento de baixo custo com viabilidade de cultivo em pequenas e grandes propriedades (SANGOI; SILVA, 2016). Por apresentar alto potencial produtivo, excelente composição química e grande valor nutritivo, é um dos mais importantes cereais cultivados e consumido no mundo, sendo a base alimentar da população em vários países do continente africano, América Latina e Ásia (CASTRO et al., 2009).

De acordo com dados de levantamento do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a produção mundial de milho em 2021/2022 foi projetada em 1,194 bilhões de toneladas de grãos. O Brasil é considerado o terceiro maior produtor mundial, com produção estimada em 112,9 milhões de toneladas de grãos, ficando atrás somente da China e dos Estados Unidos, maior produtor mundial com produção estimada em 364,3 milhões de toneladas de grãos (CONAB, 2022; FIESP, 2021). EUA, China e Brasil juntos, respondem mais de 60% de todo o milho produzido no mundo anualmente.

A produtividade média de grãos dos EUA para a safra 2021/2022 foi estimada em torno de 11,26 Mg $ha^{-1}$ (FIESP, 2021). Por outro lado, no Brasil, para essa safra a produtividade de grãos média deve girar em torno de 5,39 Mg $ha^{-1}$(CONAB, 2022). Os altos valores de produtividades de grãos nos EUA são resultados do melhoramento genético vegetal e práticas agronômicas adequadas às condições do clima que permitem que seja explorado o máximo potencial produtivo da cultura (CARVALHO, 2020).

O Brasil com área cultivada estimada em 20,943 milhões de hectares e produção estimada de 112,901 milhões de toneladas de grãos para a safra 2021/2022, atualmente é um país estratégico, pois além de ser o terceiro maior produtor, é o segundo maior exportador mundial de milho (CONAB, 2022; FIESP, 2021), contribuindo fortemente para a balança comercial brasileira. Dentre os três principais produtores mundiais de milho, o Brasil foi o que mais aumentou sua participação nas exportações mundiais, de 8,4 milhões de toneladas de grãos na safra 2010/2011 para 28,0 milhões de toneladas na safra 2020/2021, 233% de aumento, segundo dados do USDA (FIESP, 2011; FIESP, 2021).

O milho é um produto fundamental para a agricultura brasileira, cultivado em todas as regiões do país, em mais de dois milhões de estabelecimentos agropecuários. A cultura passou por transformações profundas nas últimas décadas, destacando-se sua redução de área cultivada como cultura de subsistência de pequenos produtores e o aumento do seu papel em uma agricultura comercial eficiente, com deslocamento geográfico e temporal (CONTINI et al., 2019).

Devido às condições climáticas das regiões ao longo do território brasileiro, a produção desse cereal ocorre em diferentes épocas. O cultivo de verão ou de primeira safra, que corresponde à semeadura concentrada na primavera/verão, predomina na maioria das regiões produtoras, com exceção das regiões Norte e Nordeste, em que a época de maior concentração de precipitações ocorre a partir de janeiro, e o período de semeadura é denominado de segunda safra (CONTINI et al., 2019).

A região Centro-Sul do Brasil é a principal área de produção de milho no país, essa região concentra mais de 90% da produção nacional da cultura, desempenhando papel importante na produção brasileira desse cereal. O estado do Mato Grosso (Centro - Oeste) é o principal produtor nacional de milho, e juntamente com o Paraná (sul), Goiás (Centro - Oeste), Mato Grosso do Sul (Centro - Oeste) e

Minas Gerais (Sudeste) produziram 77,3% da safra nacional de milho em 2019/2020, enquanto as regiões Norte e Nordeste responderam por pouco mais de 9% da produção de milho, com produtividade de grãos média de 2,9 t $ha^{-1}$ (CONAB, 2020). Nessas regiões, a maior parte da produtividade de grãos é resultante da agricultura familiar, que é voltada basicamente para o consumo familiar e para alimentação dos rebanhos. Dentre os fatores que contribuem para a baixa produtividade de grãos da cultura nessas regiões pode-se citar o baixo nível tecnológico empregado pela grande maioria dos produtores, além disso, as condições climáticas adversas, principalmente na região Nordeste, também têm contribuído para a baixa produtividade do milho nessa região.

Os estados com maiores produções e produtividade de grãos no Nordeste são os que fazem parte do MATOPIBA: Bahia (1,89 milhões de toneladas e 3,20 t $ha^{-1}$); Maranhão (1,97 milhões de toneladas e 4,30 t $ha^{-1}$) e Piauí (1,65 milhões de toneladas e 3,53 t $ha^{-1}$) (CONAB, 2020), porém, todos apresentam rendimento agronômico inferior à média nacional, que na safra 2019/2020 foi de 5,58 t $ha^{-1}$. Esse menor rendimento agrícola comparado com a média nacional ocorre, principalmente, pela má distribuição da precipitação pluvial durante a época de cultivo, mesmo durante o período chuvoso há pequenos veranicos que afetam o desenvolvimento e o crescimento das plantas, causando déficit produtivo.

No estado do Piauí, a cultura é explorada em regime de sequeiro, principalmente na região do Cerrado piauiense, que tem o período chuvoso de novembro a março (MEDEIROS, 2020), com precipitação média anual variando de 800 a 1400 mm (ANDRADE JÚNIOR et al., 2004). Porém, os autores enfatizam que apesar do elevado índice pluviométrico anual, o risco climático que a cultura do milho está sujeita é acentuado, em razão da irregularidade na distribuição de chuvas, traduzida por períodos veranicos de diferentes durações, sobretudo se estes ocorrerem durantes as fases mais críticas da cultura (pré-floração e enchimento de grãos (BERGAMASCHI et al., 2006), quando o estresse hídrico pela falta de água reduz sensivelmente seus rendimentos.

Considerando que a disponibilidade hídrica, interfere diretamente na capacidade produtiva do milho, especialmente em regiões com notória escassez hídrica ou com má distribuição das chuvas, faz-se necessário adotar a prática de irrigação, no intuito de uma menor dependência das condições climáticas adversas às culturas e aumentando as chances de obter uma colheita mais rentável

(FERNANDES et al., 2010). Nesse contexto, o uso de tecnologias, como a irrigação, pode refletir no aumento da produtividade e qualidade, além de reduzir os riscos eminentes, sob o ponto de vista climático, uma vez que tal técnica tem como principal objetivo suprir a necessidade hídrica das culturas, nos momentos em que não há precipitação, ou esta é mal distribuída (TESTEZLAF, 2017).

O cultivo irrigado deve atender às demandas essenciais da planta, uma vez que, o manejo inadequado da irrigação pode resultar no excesso e ou déficit hídrico. Assim, o conhecimento da relação entre variáveis de crescimento e dos componentes de produção submetidas a lâminas diferenciadas de irrigação, são essenciais para aumentar o rendimento agronômico dos cultivos agrícolas. Uma vez que a técnica da irrigação possibilita mitigar ou eliminar os efeitos da deficiência hídrica na agricultura, para tanto é necessário definir lâmina de irrigação visando o aumento do rendimento da cultura em regiões com baixo índice pluviométrico ou com distribuição irregular da chuva (TESTEZLAF, 2017).

## 2.2 Demanda hídrica e irrigação na cultura do milho

Dentre os fatores climáticos, a precipitação pluvial é a que mais interfere no crescimento e na produtividade do milho, que no Piauí varia em média de 400 a 1.800 mm anuais (ANDRADE JÚNIOR et al., 2004), porém essa precipitação pluvial é distribuída de forma irregular no decorrer do ano nas diferentes regiões do Estado. As regiões com baixa incidência ou que sofrem por irregularidade de chuvas, em boa parte das safras tem sua produtividade de grãos reduzida (MENEZES et al., 2015).

Para uma boa produção de grãos, a cultura do milho necessita de 500 a 800 mm de água bem distribuídos (SALES et al., 2016), sendo umas das culturas mais eficientes no uso da água, isto é, produz grande quantidade de biomassa por unidade de água absorvida (Souza et al., 2011), estudando a eficiência do uso da água na cultura do milho sob sistema de plantio exclusivo e consociado no município de Petrolina, obtiveram maior eficiência de uso da água com a lâmina de irrigação correspondente a 125% da evapotranspiração de referência (ETo), totalizando 77,3

e 62,2 kg de grãos por $m^{-3}$ de água aplicada, respectivamente para os tratamentos exclusivo e consociado.

A cultura do milho, ao longo do seu ciclo, é afetada pela disponibilidade de água, em caso de déficit hídrico, existe a probabilidade de redução de até 50% da produção da cultura (WAGNER et al., 2013), se o déficit ocorrer na fase de florescimento e enchimento de grãos devido à extrema sensibilidade das plantas à falta de água durante essas fases fenológicas. As fases de emergência, florescimento e formação dos grãos necessitam de maiores concentrações de água, o consumo dificilmente ultrapassa 3,0 milímetros por dia, isso em condições normais, enquanto a planta apresentar até oito folhas, entretanto, durante o florescimento e os grãos farináceos, tal consumo poderá chegar até 7,5 mm por dia (FANCELLI, 2017).

Vários estudos foram realizados em diferentes regiões para avaliar a resposta da cultura do milho à irrigação. Elmetwalli e Tyler (2020), avaliando o efeito da combinação de quatro níveis de irrigação (1,25; 1,0; 0,8 e 0,6 da ETc) e três doses de nitrogênio (120, 180 e 240 kg $ha^{-1}$), constataram que o estresse hídrico reduziu fortemente o rendimento de grãos na safra de 2015 e 2016 ($p < 0,005$), os maiores rendimentos de grãos ( 8,41 e 9,42 Mg $ha^{-1}$) foram registrados com a combinação de 1,25 ETc e 240 kg N $ha^{-1}$ nas safras de 2015 e 2016. Os autores destacaram ainda que a análise de regressão mostrou uma relação linear significativa entre a produtividade de grãos de milho e os níveis de irrigação nas duas safras investigadas, indicando que as reduções de rendimento foram maiores nas combinações com os níveis de irrigação mais baixos (0,6 ETc) e o maior nível de deficiência de N (120 kg N $ha^{-1}$).

Garcia et al. (2008), avaliando por meio da análise de crescimento os efeitos de três regimes hídricos sobre o desenvolvimento da cultura de milho, observaram que a deficiência hídrica afetou negativamente os índices fisiológicos do crescimento da cultura do milho e que essa carência durante o período vegetativo (após a emissão da 12ª folha) foi o que atingiu a cultura em termos fisiológicos e de produção.

Soares et al. (2020), ao avaliar o crescimento, desenvolvimento e rendimento agrícola do milho submetido a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio em Rio Largo, AL, observaram que os maiores valores de altura de dossel (247,2 cm), índice de área foliar (4,4 $m^2$ $m^{-2}$), número de grãos por espiga (635 grãos), massa de

grãos por espiga (195,0 g) e produtividade de grãos (8,4 t $ha^{-1}$) foram obtidos com lâminas de irrigação equivalente a 160% da ETc (530,2 mm), porém, a maior eficiência de uso da água (EUA) de 3,85 kg $m^{-3}$, foi obtida com lâmina total de 172,4 mm (40% ETc). Para obtenção de altas EUA são necessárias boas condições hídricas nas fases críticas da cultura (ALMEIDA et al., 2017), o que induz a afirmação de que para as condições que os autores conduziram o estudo, as plantas não sofreram déficit hídrico em suas fases críticas, o que explicaria maior EUA para tal lâmina de irrigação.

Melo et al. (2018), estudando o efeito de diferentes lâminas de irrigação na presença e ausência de esterco caprino no desenvolvimento e produtividade do milho cultivar BRS Gorutuba, verificaram que a produtividade de espigas com palha e sem palha, a produtividade de grãos e o peso de 100 grãos tendem a aumentar com maiores reposições hídricas, alcançando produtividade de grãos de 3.977,78 kg $ha^{-1}$ de grãos com aplicação de 559,41 mm, o que representa uma adição de água correspondente a reposição de 120% da ETc.

Os resultados apresentados demonstram que o cultivo irrigado do milho é essencial para aumentar a produtividade, principalmente em regiões com distribuição irregular de chuvas e/ou escassez hídrica, visto que a produtividade dessa cultura, em condições irrigadas, tem-se mostrado superior em relação às áreas com produção em regime de sequeiro. Além disso, nessa situação, a cultura do milho irrigado pode ser uma boa opção no cultivo de uma segunda safra durante a estação seca, porém, mesmo em plantio irrigado, faz-se necessário levar em consideração a época de semeadura da cultura, pois essa promove alteração no ciclo da cultura e modifica aspectos fisiológicos e morfológicos que afetam os componentes de produção (BUSO et al., 2017).

Assim, quando não bem planejado, o florescimento e enchimento de espiga no cultivo irrigado podem coincidir com o período de altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar, o que compromete o metabolismo da planta, uma vez que as condições climáticas durante tais períodos podem afetar a produção e a alocação de fotoassimilados para a formação dos grãos (CARDOSO et al., 2015).

## 2.3 Déficit hídrico

O estresse hídrico na planta é causado por uma deficiência no abastecimento de água, detectada como uma redução do conteúdo no solo, ou das respostas fisiológicas da planta à baixa disponibilidade de água (IHUOMA; MADRAMOOTOO, 2017). É um problema que afeta aproximadamente 45% das áreas agrícolas, sendo, portanto, a maior restrição global da produtividade das culturas agrícolas, tornando-se um grande problema (MADABULA et al., 2016).

O déficit hídrico do solo é condicionado pela relação entre a precipitação e/ou irrigação e a evapotranspiração e por sua capacidade de água disponível, que é variável entre diferentes locais, podendo ser modificada pelo manejo adotado (CASTELLVÍ; MORMENEO; PERES, 2004). Contudo, supõe-se que o comportamento da disponibilidade de água às plantas apresente semelhança com a distribuição dos índices de precipitação (WAGNER et al., 2013).

O déficit hídrico caracteriza-se pela baixa disponibilidade de água no solo, isso acarreta, nas plantas, reduções no fluxo contínuo de água no sistema solo-planta-atmosfera levando inicialmente ao murchamento das folhas (SOUZA, 2017). O déficit hídrico, afeta quase todos os aspectos relacionados ao crescimento e desenvolvimento das plantas, uma vez que reduz a área foliar (por diminuir o crescimento ou pela senescência das folhas); reduz a taxa fotossintética (devido à diminuição da área foliar, murcha, enrolamento de folhas e fechamento dos estômatos) brotação, absorção de nutrientes e translocação de fotoassimilados (BERGAMASCHI et al., 2006; SINGH et al., 2015).

Devido à falta ou baixa disponibilidade de água nas folhas, várias enzimas que são responsáveis pela expansão foliar são inibidas, originando folhas novas com área foliar reduzida (SOUZA et al., 2018). A redução da área foliar, consequentemente, diminui a área fotossintética das plantas, inicialmente, um fator prejudicial, todavia diminui a perda de água pela planta, devido uma menor taxa transpiratória por área foliar (LARCHER, 2000; AVRAMOVA et al., 2015).

A produtividade das culturas possui estreita relação com a área foliar, que é uma característica relevante no desenvolvimento inicial das gramíneas, visto que as folhas são fonte de fotoassimilados para o desenvolvimento das raízes, estruturas que participam da assimilação de nutrientes e desempenham importante papel na

resistência ao déficit hídrico (BONFIM-SILVA et al., 2011), além disso, esse déficit também induz uma diminuição de nutrientes nas plantas em função da falta de absorção dos nutrientes ou ainda provada pela inativação de transportadores proteicos e enzimas ligadas ao processo de assimilação (LOPES et al., 2011; SILVA et al., 2011).

Na cultura do milho, o período mais sensível ao déficit hídrico situa-se entre o pendoamento e o enchimento de grãos, pois impacta diretamente na produtividade, sendo seus danos irreversíveis nesse período (BERGAMASCHI et al., 2006). A ocorrência de déficit hídrico durante essa etapa poderá comprometer a fertilização dos óvulos, a produção de carboidratos, formação de grãos e ainda promover um menor acúmulo de matéria seca nos grãos e consequentemente redução na produção final da cultura (SOUZA; SOUZA; MAGALHÃES, 2018). Tem sido relatado que o milho é mais tolerante ao estresse hídrico imposto durante os estágios iniciais de crescimento vegetativo porque nesse período a demanda de água pela planta é baixa, e essas são capazes de se adaptar ao estresse hídrico para reduzir o efeito de períodos subsequentes de estresse provocado pela baixa disponibilidade hídrica (MANSOURI-FAR et al., 2010).

Mansouri-far et al. (2010), estudando as respostas agronômicas e fisiológicas de dois híbridos de milho (Single cross 647 e Triple cross 647) à deficiência hídrica em estádio de crescimento pouco sensíveis (suspensão da irrigação no estádio V8, no estádio de enchimento inicial de grãos (R3) e nos estádios V8 e R3 e um tratamento bem irrigado - controle) em dois locais (Tehran e Kermanshah –Irã) constataram que em ambos os locais, o estresse hídrico imposto ao milho em três estádios de crescimento de baixa sensibilidade resultou em maior redução de rendimento durante o estádio R3 do que no estádio V8, em comparação com o tratamento de controle, demonstrando que o milho é bem mais tolerante ao déficit hídrico no estádio vegetativo V8.

Silva et al. (2021), avaliando o efeito do déficit hídrico a partir de diferentes fases fenológicas do milho (híbrido M274) na região semiárida do município de Piranhas - AL, observaram que a imposição de estresse hídrico a partir da fase de pendoamento do milho provoca a não formação de espiga pela planta; e quando a imposição do déficit de água ocorre a partir da fase de polinização, o milho produz espigas mal formadas e apresenta baixo rendimento, além de redução na área foliar e matéria seca, demonstrando maior sensibilidade da cultura ao déficit hídrico

nessas fases. Assim, a produtividade do milho cultivado em regime de sequeiro pode ser afetada mesmo em anos climaticamente favoráveis, se ocorrer veranico que provoque déficit de água no período crítico de desenvolvimento da cultura (ROCHA et al., 2021).

O déficit hídrico é apontado como um dos fatores mais importantes que limitam a produtividade de milho, especialmente nas áreas onde existe um período prolongado de seca, como nas regiões semiáridas (SILVA, 2009), a deficiência de água causa grandes prejuízos ao crescimento e desenvolvimento da planta, reduzindo em até 100% o rendimento de grãos da cultura (ROCHA et al., 2021). A escassez hídrica provocada pela seca de 2012 nos EUA reduziu os rendimentos e a produção nacional de milho em 21% e 15%, respectivamente, em relação aos níveis médios de 2009-2011 (EDMEADES, 2013). No Brasil a baixa disponibilidade hídrica provocada pela estiagem que atingiu as principias regiões produtoras de milho provocou uma redução de aproximadamente 15,1% na produção de grãos na safra 2020/2021, em relação à produção média de 2019/2020 (CONAB, 2022).

Os métodos tradicionais de monitoramento do déficit hídrico das lavouras contam com medições diretas do conteúdo de água no solo e medição direta e indireta de variáveis fisiológicas da cultura, via condutância estomática e potencial de água na folha (IHUOMA; MADRAMOOTOO, 2017). Entretanto, esses métodos são demorados, trabalhosos, de alto custo e, além disso, não levam em consideração a variabilidade do solo e das culturas (LI et al., 2010). Métodos como a medição da condutância estomática, potencial hídrico na folha e fluxo de seiva, entre outros, têm sido usados com sucesso na cultura do milho para detectar o estresse hídrico na planta (GOMIDE, et al., 2005; MARTINS et al., 2010; BRITO et al., 2013), porém, esses métodos, são baseados em dados coletados em locais de origem pontual de uma área de cultivo, o que não representa a variabilidade espacial do solo, bem como da cultura.

Recentemente, os estudos têm se concentrado no uso de dados de sensoriamento remoto (SR) como alternativa às medições tradicionais de parâmetros de estresse hídrico das culturas, uma vez que o SR fornece informações sobre a variabilidade espacial e temporal das culturas (ROSSINI et al., 2015; PANIGADA et al., 2014; BALLESTER et al., 2017; ZHANG et al., 2021; ANDRADE JÚNIOR et al., 2021). A detecção do estresse hídrico por SR permite que grandes

áreas sejam monitoradas e, portanto, apresenta-se como um método mais apropriado para uso em safras extensivas plantadas com milho.

## 2.4 Crescimento de planta

Em síntese, análise de crescimento se refere a um método que descreve as condições morfológicas das plantas em intervalos de tempo e propõe acompanhar a dinâmica da produção fotossintética, mediante o acúmulo de biomassa (POVH; ONO, 2008). Neste tipo de análise, são coletados dados em intervalos de tempo preestabelecidos pelo pesquisador, levando em conta o ciclo da cultura em estudo. Com os dados de biomassa das partes da planta e da planta conglomerada, são realizados diferentes cálculos que permitem fazer uma estimativa do crescimento da planta (SANTOS et al., 2013).

A análise de crescimento representa a referência inicial na análise de produção das espécies vegetais, requerendo informações que podem ser obtidas sem a necessidade de equipamentos sofisticados. Tais informações referem-se à quantidade de material contido na planta toda e em suas partes (folhas, colmo, raízes e frutos), e o tamanho do aparelho fotossintetizante (área foliar), informações essas obtidas a intervalos de tempo regulares durante o desenvolvimento fenológico da planta (PEREIRA; MACHADO, 1987).

Ao se avaliar os efeitos de sistemas de manejo sobre as plantas, a análise de crescimento é uma ferramenta fundamental, pois descreve as mudanças na produção vegetal em função do tempo, o que não é possível apenas com a avaliação do rendimento (BENINCASA, 1988; URCHEI et al., 2000), ou seja, a análise de crescimento propõe-se a acompanhar a dinâmica da produção fotossintética avaliada por meio do acúmulo de matéria seca, assim, a análise de crescimento pode ser utilizada para conhecer a adaptação ecológica das plantas a novos ambientes, à competição interespecífica, aos efeitos de sistemas de manejo, bem como à capacidade de interações com o ambiente (KVET et al., 1971). Sabendo que o crescimento de uma planta resulta da interação de mecanismos físicos e bioquímicos bastantes complexos, a maioria dos quais pouco esclarecidos ou mesmo desconhecidos (BENINCASA, 1988).

As plantas, em sua grande maioria, seguem um modelo de crescimento sigmoide, ou seja, no início o crescimento é lento e, logo após vai aumentando gradativamente até atingir um platô, ou estabilização (GUISCEM et al., 2002). Ainda conforme estes autores a menor taxa de crescimento inicial são verificados porque o número de células que se dividem é pequeno, o que proporciona uma área foliar reduzida e consequentemente um menor aproveitamento da radiação fotossinteticamente ativa.

Para avaliar os efeitos do estresse hídrico sobre as plantas, a análise de crescimento é fundamental, uma vez que descreve as mudanças na produção vegetal em função do tempo. Nesse contexto, a análise de crescimento permite avaliar o crescimento final da planta como um todo e a contribuição dos diferentes órgãos no crescimento final. A partir dos dados de crescimento (matéria seca total e área foliar) é possível inferir atividade fisiológica, isto é, estimar de forma bastante precisa, as causas de variações de crescimento entre plantas geneticamente diferentes ou mesmo entre plantas crescendo em ambientes diferentes (BENINCASA, 1988).

O acúmulo de biomassa e o incremento da área foliar, quantificados em função do tempo pela análise de crescimento, são utilizados para estimar vários índices fisiológicos de crescimento relacionados às diferenças de desempenho entre cultivares ou diferentes materiais da mesma espécie e das comunidades vegetais (LIMA et al., 2007). Entre os mais utilizados, encontram-se o índice de área foliar (IAF), taxa de crescimento da cultura (TCC), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa assimilatória líquida (TAL) e a razão da área foliar (RAF).

O IAF é determinado pela relação entre a área foliar de uma planta e a superfície correspondente de terreno; A TCC equivale ao incremento de material da planta entre duas amostragens em unidade de tempo e indica a velocidade média de crescimento ao longo ciclo da planta; já a TCR é decorrente do material inicial, isto é, do material preexistente e corresponde ao incremento de matéria seca total por unidade de matéria seca existente por unidade de tempo. A TAL reflete a eficiência do aparelho fotossintético em termos de matéria seca produzida em gramas por centímetros quadrado de área foliar por unidade de tempo. Por sua vez, a RAF expressa a razão entre a área foliar (responsável pela interceptação luminosa) e a massa seca total (resultado da fotossíntese) e representa a área foliar usada pela planta para produzir uma unidade de massa seca (BENINCASA, 1988).

O crescimento das plantas é afetado por muitos fatores, incluindo a disponibilidade hídrica, teor de nutrientes, aeração e temperatura. Estudos experimentais com diferentes manejos das culturas agrícolas demonstram efeitos variáveis sobre os índices fisiológicos de crescimento das plantas. Garcia et al. (2008), investigando resposta da cultura do milho aos efeitos de três regimes hídricos sobre o desenvolvimento, observaram que a deficiência hídrica afeta negativamente os índices fisiológicos do crescimento e que a deficiência durante o período vegetativo (após a emissão da 12ª folha) foi a que mais afetou a cultura em termos fisiológicos e de produção.

Motazedian et al. (2019), avaliando os efeitos combinados de regimes de irrigação e incorporação de resíduos de trigo no solo sobre o crescimento e a produção de milho doce, constataram que o maior IAF (3,49) foi alcançado quando a cultura era plenamente irrigada (100% ETc) e semeada em 25% de resíduo de trigo incorporado ao solo.

Soares et al. (2020), avaliando o crescimento, desenvolvimento e rendimento agrícola do milho submetido a lâminas de irrigação, constataram que o IAF do milho cresceu com o desenvolvimento da cultura, tendo atingido o valor máximo de 4,4 (no tratamento 160% da ETc), cerca de 59 DAS, época em que a plantas encontravam-se no estádio de polinização. Ainda conforme os autores, quando as plantas atingiram o IAF máximo começaram a translocar os fotoassimilados para a espiga.

## 2.5 Sensoriamento remoto aplicado à agricultura

O termo SR se refere à obtenção de imagens à distância sobre a superfície terrestre, utilizando sensores embarcados em aeronaves ou satélites. O SR aplicado à agricultura é baseado na espectroscopia da radiação refletida após interação da radiação eletromagnética incidente proveniente do sol com diferentes alvos na superfície terrestre. Essas medidas são oriundas do espectro refletido, mais especificadamente abrangendo a região do visível (0,4 – 0,7 µm); infravermelho próximo (0,7 – 1,3 µm) e infravermelho de ondas curtas (1,3 – 2,5 µm) (JORGE; INAMASU, 2014).

No contexto agrícola, o SR refere-se a medições sem contato da radiação refletida ou emitida pelos campos agrícolas, e as plataformas para essas medições incluem sensores de mão, sensores montados em trator, satélites, aeronaves tripuladas e aeronaves remotamente pilotada (ARPs) (MULLA, 2013). Sabe-se que a refletância dos espectros de luz das plantas muda com o tipo de planta, o teor de água nos tecidos e outros fatores intrínsecos (CHANG et al., 2016).

As principais aplicações para o SR da vegetação são baseadas nos seguintes espectros de luz, a saber: I – a região ultravioleta (UV), cujo comprimento varia de 10 a 380 nm; II – os espectros visíveis, que são compostos das regiões de comprimento de onda azul (450 - 495 nm), verde (495 – 570 nm) e vermelho (620 – 750 nm); e III – a banda infravermelho próximo e médio (850 – 1700 nm) (CRUDEN et al., 2012; BIN ABDUL RAHIM et al., 2016).

Os dados obtidos a partir de SR podem ser usados para estimar características de interesse da vegetação como: cobertura da vegetação, índice de área foliar, biomassa, altura de planta, temperatura do dossel, teor de clorofila e produtividade; além da detecção de estresse hídrico e/ ou nutricional em plantas. Essas informações da vegetação obtidas a partir das imagens de SR são interpretadas principalmente pelas diferenças e alterações das folhas verdes das plantas e pelas características espectrais do dossel. Por sua vez, o processo de validação mais comum dessas informações é realizado por meio de correlações diretas ou indiretas entre os índices de vegetação obtidos das imagens e as características de interesse da vegetação medidas no campo (XUE; SUN, 2017).

O uso de imagens capturadas por satélites tem grande utilidade na agricultura, porém possui algumas limitações decorrentes da frequência na obtenção de imagens, da presença de nuvens que inviabilizam seu uso, custos elevados, baixa resolução (espaço-temporal) e necessidade de conhecimento específico para o processamento das imagens (SAMSEEMOUNG et al., 2012). Mesmo com tais limitações as técnicas de SR podem fornecer informações muito úteis sobre a variabilidade espacial e temporal de muitas características importantes das culturas, que são difíceis de monitorar por meio de medições de campo tradicionais (PANIGADA et al., 2014) é possível, através da radiação refletida que é coletada pelos sistemas sensores  adquirir informações que podem estar relacionadas com o tipo de cultura plantada, suas condições fenológicas ou nutricionais e,

consequentemente, com a produtividade, possibilitando estimar a produção da cultura agrícola (RUDORFF; MOREIRA, 2002).

Além disso, a técnica de SR vem oferecer um potencial para estimativa da evapotranspiração (ET) sobre grandes áreas e regiões em que não existe uma densa rede de estações de dados meteorológicos básicos que subsidiam os inúmeros métodos de cálculos, resultando em alternativa para o monitoramento da ET com boa variabilidade espacial e temporal. Uma das vantagens em se utilizar o SR na estimativa da ET é a análise da variação espacial desse fenômeno, sobretudo em grandes áreas, devido às diferenças dos elementos que compõem a paisagem, bem como em virtude das variações dos componentes climáticos (VELOSO, FERREIRA; SILVA, 2017).

Dentre as culturas em que se aplica a agricultura de precisão o milho tem grande destaque na utilização do SR, sendo esta ferramenta aplicada principalmente no levantamento da variabilidade espacial do vigor da cultura por meio de índices de vegetação (IV), recomendação de nitrogênio em doses variadas utilizando sensores remotos proximais e ainda a predição de produtividade com base na refletância da cultura (OLIVEIRA, 2017). A predição da produtividade utilizando dados proximais de SR se dá pela geração de modelos que expressam a relação linear entre IVs e a produtividade real da cultura (BERTOLIN et al., 2017; OLIVEIRA, 2017).

Bertolin et al. (2017) posicionam em seu estudo o SR como ferramenta para a estimativa da produtividade do milho irrigado, em que objetivaram modelar uma equação empírica, utilizando a relação de índices de vegetação (IV) obtidos via SR, com a produtividade do milho sendo capaz de predizer a produtividade das safras seguintes, em que para essa análise foram testados os IV: NDVI, NDWI, SAVI e GVI. As imagens utilizadas foram oriundas do satélite Landsat-8 para as safras 2013, 2014 e 2015, com o intuito em validar o modelo de regressão linear adotado, a equação gerada foi testada para a safra de 2016, onde o NDVI foi o único IV a apresentar boa correlação com a produtividade, com $R^2$ de 0,81. A produtividade estimada, com base no NDVI, apresentou uma subestimativa média de 11,95 sacas/hectare, subestimando o valor da produtividade observada em 6,32%. Essa diferença percentual foi considerada satisfatória em se tratando de estimativa de produtividade.

## 2.6 Aeronave remotamente pilotada (ARP)

São consideradas aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), os equipamentos de voo sem piloto a bordo, que podem ser no formato de helicópteros, aviões ou drones, e que recebem o incremento de uma ou mais tecnologias de monitoramento por meio de câmeras, sensores e navegação por GPS, para cumprir uma tarefa ou coleta de vários dados da cultura (ZENG et al., 2020). Por meio da verificação de imagens feitas por ARPs é possível determinar índices de vegetação e sua variabilidade espacial, bem como fazer uma estimativa de rendimento de uma cultura (SCHUT et al., 2018).

As ARPs, popularmente conhecidas como drones, foram desenvolvidas para fins militares, com o objetivo de resistir a ambientes hostis e para trabalhos pesados onde seriam de difícil acesso para o ser humano. Atualmente esse tipo de aeronave é aplicado em diferentes setores da sociedade, especialmente no setor agropecuário (JORGE; INAMASU, 2014). As ARPs caracterizam-se como uma tecnologia de SR em baixa altitude, que é menos afetada por fatores atmosféricos durante o processo de aquisição das imagens, além disso, possuem vantagens como acessibilidade, operação simples, alta velocidade de imageamento, bem como, altas resoluções espaciais e temporais, que são incomparáveis em relação às tecnologias tradicionais de SR baseadas em satélites (WANG et al., 2013). Diante disso, nos últimos anos, as ARPs têm se mostrado como uma plataforma promissora para o monitoramento de safras em nível de campo, particularmente no campo da agricultura de precisão, uma vez que são capazes de preencher efetivamente a lacuna (mobilidade, flexibilidade e alta resolução temporal e espacial) entre o RS baseado em satélite (QI et al., 2021).

Dentre as vantagens que levaram as ARPs a serem empregadas na agricultura, está o fato que elas podem trabalhar em baixas altitudes de voo (próximo dos alvos) e em áreas inacessíveis; o baixo custo de operação em ambiente de monitoramento; além disso, a aquisição de imagens a partir de ARP pode ser programada em função da hora, do dia e das condições do tempo no qual seja mais adequada a aquisição de imagens. Portanto, a aplicação das ARPs no setor agrícola surgiu como uma importante ferramenta da agricultura, especialmente

da agricultura de precisão na missão de reconhecimento da exploração agropecuária por meio de tomadas de imagens (VIANA et al., 2018).

O uso de ARPs como plataforma de SR vem expandindo de forma aguda e tem se mostrado um mercado altamente promissor, principalmente para pesquisas em agricultura. Dentre os fatores que tem possibilitado essa expansão estão os custos reduzidos das ARPs nos últimos anos e os avanços tecnológicos e à comercialização de tecnologia de sensores, o que tem atraído mais empresas do setor agrícola a desenvolver e oferecer serviços de gerenciamento de culturas baseadas em ARP (MARESMA et al., 2020). Além disso, a literatura cientifica sobre a eficácia de sensores montados em ARP para decisões de gerenciamento agrícola tem se expandido rapidamente (PÁDUA et al., 2017).

Os sistemas de SR baseados em ARP geralmente incluem vários sensores de imagem para capturar diferentes tipos de estrutura e informações de reflectância das culturas em diferentes comprimentos de onda, incluindo câmeras RGB (red, green e blue) que abrangem a região visível, multiespectral (RGB e infravermelho próximo), hiperespectral e térmicas (FENG et al., 2021; JORGE; INAMASU, 2014).

Dentre as aplicações de ARPs para a agricultura, pode-se citar o manejo agrícola, detecção do estresse hídrico, estimativa de falhas no plantio e mapeamento de áreas para aplicação de defensivos ou adubação. Entre as aplicações das ARPs no setor agrícola, a detecção e quantificação de estresse hídrico é sem dúvida a que tem recebido a maior atenção, provavelmente devido ao potencial impacto positivo que a detecção precoce de estresse pode ter na atividade agrícola (BARBEDO, 2019). Quando as plataformas de ARPs são adotadas para detectar o estresse hídrico da cultura, há duas fontes de dados baratas comumente usadas: imagens térmicas e multiespectrais (ZHANG et al., 2021)

Recentemente, a detecção de estresse hídrico na cultura do milho com a plataforma ARP foi investigada por alguns pesquisadores. Rossini et al. (2015) revelaram a variabilidade de mapear o estresse hídrico na cultura por meio de índices espectrais de vegetação, aproveitando a capacidade de alta resolução espacial que são mais difíceis na região térmica.

Andrade Júnior et al. (2021), avaliando o estado hídrico de cultivares de milho por meio de índices térmico e de vegetação gerados de imagens aéreas multiespectrais obtidas por ARP, observaram que os índices NDVI e OSAVI podem ser utilizados em substituição ao índice térmico “Crop Water Stress Index” (CWSI)

nas avaliações do estado hídrico de plantas de milho, confirmando o potencial de utilização do SR por ARP como ferramenta para detectar remotamente o estresse hídrico em culturas de milho.

Diante desses resultados, fica evidente que a plataforma de ARP apresenta-se como uma ferramenta vital para os produtores no monitoramento de culturas agrícolas, tendo em vista que esse tipo de plataforma pode cobrir grandes áreas, além disso, podem aproveitar as novas tecnologias de SR para mapeamento e análise de dados (IHUOMA; MADRAMOOTOO, 2017). O mapeamento em tempo e a análise rápida de imagens obtidas pelas plataformas ARP também fornecem a detecção precoce do estresse hídrico da planta, o que é de extrema importância para o planejamento da irrigação em tempo hábil, devido ao potencial de aumentar a escala de informações desde a folha até o dossel em nível de campo (GAGO et al., 2015).

## 2.7 Índices de Vegetação

Os índices de vegetação (IVs) consistem em operações algébricas de valores obtidos de diferentes faixas do espectro eletromagnético, principalmente nas regiões do visível (verde, azul e vermelho) e do infravermelho próximo (NIR), também denominadas bandas espectrais (FRANCHINI et al., 2018). O objetivo dos IVs é condensar as informações espectrais e discriminar o que é vegetação e o que não é, bem como avaliar as condições de crescimento das culturas, como ataque de pragas, doenças e adversidades meteorológicas como seca e geada (LIU, 2007).

Portanto, um IVs representa uma combinação ou um processo de filtragem de vários conjuntos de dados espectrais para criar um único valor para ponto em uma imagem, gerado geralmente por modelo matemático e usado para desenvolver um mapa de cores em escala (MCKINNON; HOFF, 2017). Na literatura cientifica são encontrados mais de 50 IVs, sendo que um dos IVs mais utilizado para avaliação de culturas é o índice de Vegetação por Diferença Normalizada ou Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), que é calculado pela diferença entre as refletâncias detectadas nas bandas do vermelho e infravermelho próximo (NIR), divididas pelas somas dessas quantidades.

Alguns índices de vegetação (IVs) obtidos a partir de imagens multiespectrais estão relacionados ao estado hídrico das lavouras (Gago et al., 2015). Existe uma correlação significativa entre o IV obtido de imagens multiespectrais, como NDVI e OSAVI, e indicadores de estresse hídrico em videiras, como condutância estomática (BALUJA et al., 2012). Wijewardana et al. (2019) avaliaram o uso potencial de IVs para detectar o estado hídrico em planta de soja, os autores concluíram que o IV NDVI apresentou alta correlação linear positiva com o potencial hídrico foliar e condutância estomática na cultura da soja.

Em se tratando da cultura do milho vários estudos destacam a capacidade dos IVs calculados a partir de dados de SR para detectar o estresse hídrico na cultura do milho. Isso inclui, por exemplo, a determinação do rendimento de grãos (ELMETWALLI; TYLER, 2020), concentração de clorofila (ZHANG et al., 2021), deficiência de nitrogênio, biomassa acima do solo, altura de planta e estresse por deficiência hídrica (ANDRADE JÚNIOR et al., 2021).

## 3 REFERÊNCIAS


ALMEIDA, A. C. S. et al. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 3, p. 1448-1457, 2017.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. et al. Water status evaluation of maize cultivars using aerial images. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 2, p. 432 – 442, 2021.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. et al. Atlas climatológico do Estado do Piauí. **Embrapa Meio-Norte-Documentos (**INFOTECA-E**)**, 2004.

AVRAMOVA, V. et al. Drought induces distinct growth response, protection and recovery mechanisms in the maize leaf growth zone. **Pant Physiology**, Rockville, v. 169, n.2, p. 1382-1396, 2015.

BALLESTER, C. et al. Monitoring the effects of water stress in cotton using the green red vegetation index and red edge ratio. **Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 873, 2017.

BALUJA, J. et al. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). **Irrigation Science**, v. 30, n. 6, p. 511-522, 2012.

BARBEDO, J. G. A. A Review on the Use of Unmanned Aerial Vehicles and Imaging Sensors for Monitoring and Assessing Plant Stresses. **Drones**, v. 3, n. 2, p. 40, 2019.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p.

BERGAMASCHI, H. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERTOLIN, N. O. et al. Predição da produtividade de milho irrigado com auxílio de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1627, 2017.

BIN ABDUL RAHIM, H. R. et al. “Applied light-side coupling with optimized spiral-patterned zinc oxide nanorod coatings for multiple optical channel alcohol vapor sensing,” **Journal of Nanophotonics**, vol. 10, no. 3, Article ID 036009, 2016.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 42p.

BONFIM-SILVA, E. M. et al. Desenvolvimento inicial de gramíneas submetidas ao estresse hídrico. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 2, p. 180-186, 2011.

BUSO, W. H. D. et al. Desempenho agronômico de híbridos de milho em três épocas de semeadura no cerrado goiano. **Revista de Agricultura Neotropica**l, v. 4, n. 4, p. 46-52, 2017.

BRITO, M. E. B. et al. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, 2013.

CARDOSO, M. J. et al. Rendimento de grãos e eficiência do uso de água no cultivo de milho geneticamente modificado no município de Teresina - PI, Brasil, em condições climáticas contrastantes. **Revista Brasileira de Geografia Física,** v. 08, n. especial IV SMUD, p. 697-704, 2015.

CARVALHO, M. W.L. **Arranjo de plantas para máxima produtividade de grãos e espigas verdes de milho com e sem deficiência hídrica**. 130 p. (2020). Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí – Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura Tropical, Teresina, 2020.

CASTRO, M. V. L. et al. Rendimento industrial e composição química de milho de alta qualidade proteica em relação a híbridos comerciais. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.39, p.233-242, 2009.

CASTELLVÍ, F.; MORMENEO, I.; PEREZ, P. J. Generation of daily amounts of precipitation from standard climatic data: a case study for Argentina. **Journal of hydrology**, v. 289, n. 1-4, p. 286-302, 2004.

CECCATO, P. et al. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote sensing of environment**, v. 77, n. 1, p. 22-33, 2001.

CESCONETTO, L. F. et al. Aspectos técnicos de manejo utilizados no Sul Catarinense na cultura do milho. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v.34, n.2, p.73-77, 2021.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Perspectivas para a agropecuária: safra 2019/2020.** Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília, v. 7, p. 1-100, 2019.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: safra 2019/2020 - n. 5 quinto levantamento: fevereiro. 2020. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília, v. 7, n5, p. 1-112, 2020.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2021/2022 - Quarto levantamento: janeiro/2022. **Companhia Nacional de Abastecimento**, Brasília, v.9, n.4 - p. 1-98, 2022.

CONTINI, E. et al. Milho: caracterização e desafios tecnológicos. Brasília: Embrapa**. (Desafios do Agronegócio Brasileiro, 2)**, 2019.

COSTA, J.P.N. et al. Evapotranspiração e rendimento do milho a diferentes lâminas e salinidade da água de irrigação. **Irriga**, v.1, n.2, p.74-80, 2015.

CHANG, L. et al. “A review of plant spectral reflectance response to water physiological changes,” **Chinese Journal of Plant Ecology**, vol. 40, no. 1, pp. 80–91, 2016.

CRUDEN, B. A.; PRABHU, D.; MARTINEZ, R. “Absolute radiation measurement in venus and mars entry conditions,” **Journal of Spacecraft and Rockets**, vol. 49, no. 6, pp. 1069–1079, 2012.

EDMEADES, G. O. Progress in achieving and delivering drought tolerance in maize-an update. **ISAAA: Ithaca, NY**, v. 130, 2013.

ELMETWALLI, A. H.; TYLER, A. N. Estimation of maize properties and differentiating moisture and nitrogen deficiency stress via ground–Based remotely sensed data. **Agricultural Water Management**, v. 242, p. 106413, 2020.

FANCELLIO, A. L. Ecofisiologia, fenologia e implicações básicas de manejo. In: GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A**. Milho: do plantio à colheita**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2017.p. 49-75.

FIESP. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP). **Safra Mundial de Milho 2021/2022:** 3º levantamento do USDA. Disponível em: http:// www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=252610. Acesso em: 12 de janeiro de 2022.

FENG, L. et al. A comprehensive review on recent applications of unmanned aerial vehicle remote sensing with various sensors for high-throughput plant phenotyping. **Computers and Electronics in Agriculture,** v. 182, p. 106033, 2021.

FERNANDES, C. N. V. **Instalação e calibração de um lisímetro de precisão com uma célula de carga**. 2010. 63f. Monografia (Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

FRANCHINI, J. C. et al. Uso de imagens aéreas obtidas com drones em sistemas de produção de soja. Londrina: Embrapa Soja, 2018. (**Documentos n.408**). p. 39.

GAGO, J. et al. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. **Agricultural water management**, v. 153, p. 9-19, 2015.

GARCIA, A. et al. Análise de crescimento de uma cultura de milho submetida a diferentes regimes hídricos. **Revista Nucleus**, v. 5. n. 1 , p. 239-251, 2008.

GOMIDE, R. L. et al. Caracterização de estresse hídrico de duas linhagens de milho (Zea mays L.) com sondas de fluxo de seiva. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 4, n. 03, 2005.

GUISCEM, J. M. et al. Crescimento e Desenvolvimento de Cultivares de Milho (zea mays L.) no Plantio de" Safrinha". In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, Florianópolis, SC, 2002.

IHUOMA, S.O.; MADRAMOOTOO, C.A. Recent advances in crop water stress detection. **Computers and Electronics in Agriculture,** n.141, p. 267–275, 2017.

JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A.C.C. et al. **Agricultura de Precisão Resultados de um Novo Olhar**. Brasília, 2014. Cap. 8, p.11-134.

KVET, J. et al. Methods of growth analysis. In: SESTAK, Z. et al. ed. **Plant photosynthetic production.** The Hague: Dr. W. Junk, 1971. p. 343-84.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: RiMa, 2000. 529 p.

LI, L. et al. Evaluating the Crop Water Stress Index and its correlation with latent heat and CO2 fluxes over winter wheat and maize in the North China plain. **Agric. Water Manag.**, v. 97, p.1146–1155, 2010.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2007. p. 881.

LIMA, J. L. et al. Índices fisiológicos e crescimento inicial de mamoeiro (caricapapaya l.) em casa de vegetação. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 5, p. 1358-1363, 2007.

LOPES, M. S. et al. Enhancin drought tolerance in C4 crops. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, p. 3135-3153, 2011.

LUZ, G. L. et al. **Introdução ao uso de imagens aéreas para manejo da cultura do milho**. 1. ed. Curitiba: Appis, 2020, p. 86.

MADABULA, F. P. et al. Rice genotypes for drought tolerance: morphological and transcriptional evaluation of auxin-related genes. **Bragantia**, v.75, p. 428- 434, 2016.

MANSOURI-FAR, C. et al. Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 1, p. 12-22, 2010.

MARESMA, A et al. Accuracy of NDVI-derived corn yield predictions is impacted by time of sensing. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 169, p. 105236-105246, 2020.

MARTINS, J. D. et al. Potencial hídrico foliar em milho submetido ao déficit hídrico. **Irriga**, v. 15, n. 3, p. 324-334, 2010.

MÁXIMO, P. J. M. et al. Adubação nitrogenada em cobertura em dois cultivares de milho no Cariri-CE. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 6, n. 1, p. 23-28, 2019.

MELO, R. F. et al. Desenvolvimento e produtividade do milho BRS Gorutuba sob diferentes lâminas de irrigação e adubação orgânica. **Revista Científica Intelletto**, v.3, n.1, p. 1-14, 2018.

MEDEIROS, R. M.; CAVALCANTE, E. P.; DUARTE, J. F. M. Classificação Climática de Köppen para o Estado do Piauí – Brasil. **Revista Equador (UFPI)**, v. 9, n 3, p.82-99, 2020.

MENEZES, C. B. et al. Adaptabilidade e estabilidade de linhagens de sorgos em ambientes com e sem restrições hídricas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 1, p. 101-115, 2015.

MCKINNON, T.; HOFF, P. Comparing RGB-based vegetation indices with NDVI for drone based agricultural sensing. **Agribotix. Com**, v. 21, n. 17, p. 1-8, 2017.

MOTAZEDIAN, A.; KAZEMEINI, S. A.; BAHRANI, M. J. Sweet corn growth and grain yield as influenced by irrigation and wheat residue management. **Agricultural Water Management**, v. 224, p. 105748, 2019.

MULLA, D. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Enginneering,** v.114, p.358–371, 2013.

NASCIMENTO, F.N. et al. Parâmetros fisiológicos e produtividade de espigas verdes de milho sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.2, p. 167-181, 2015.

NUNES, J. L. S. **Milho**. AGROLINK. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/culturas/ milho/informações/caracteristicas_361401.html. Acesso em 01 dez. 2021.

OLIVEIRA, M. F. **Modelos de predição de produtividade da cultura do milho por meio de NDVI em arranjos espaciais**. 44f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Veterinárias, 2017.

PÁDUA, L. et al. UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. **International Journal of Remote Sensing,** v. 38, p. 2349–2391, 2017.

PANIGADA, C. et al. Colombo, R. Fluorescence, PRI and canopy temperature for water stress detection in cereal crops. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,** n. 30, p. 267-278, 2014.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais.** Campinas: Instituto Agronômico 33p. (Boletim Técnico, 44), 1987.

POVH, J.A.; ONO, E.O. Crescimento de plantas de Salvia officinalis sob ação de reguladores de crescimento vegetal. **Ciência Rural**, v. 38, n. 8, p.2186-2190, 2008.

QI, H. et al. Monitoring of peanut leaves chlorophyll content based on drone-based multispectral image feature Extraction. **Computers and Electronics in Agriculture**, n. 187, p. 1-12, 2021.

RIBEIRO, R.B. et al. Crescimento do milho BRS Caatingueiro irrigado no Cariri Cearense**. Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v.8, n.3, p.81-86, 2015.

ROCHA, D. S. et al. drought tolerance in intervarietal maize hybrids. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 1, p. 80 – 89, 2021.

ROSSINI, M. et al. Discriminating Irrigated and Rainfed Maize with Diurnal Fluorescence and Canopy Temperature Airborne Maps. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, n. 4, v.2, p. 626-646, 2015.

RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, M. A. **Sensoriamento Remoto Aplicado a Agricultura**, Capítulo 9. 2002, INPE, São José dos Campos. INPE-8984-PUD/62.

SALES, R. M. et al. Estimativa das necessidades hídricas do milho cultivado nas condições edafoclimáticas de São Mateus – ES. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 598-609, 2016.

SAMSEEMOUNG, G. et al. Application of low altitude remote sensing (LARS) platform for monitoring crop growth and weed infestation in a soybean plantation. **Precision Agriculture**, v. 13, p. 611-627, 2012.

SANGOI, L.; SILVA, P. R. F. Crescimento, desenvolvimento e épocas de semeadura. *In*: WORDELL FILHO, J. A.; CHIARADIA, L. A. **A cultura do milho em Santa Catarina**. 3. ed. Florianópolis: Epagri, 2016. p. 25-83.

SILVA, S. et al. Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. **Irriga - Edição Especial – Nordeste**, v. 1, n. 1, p. 30-41, 2021.

SILVA, E. C. et al. Drought stress and plant nutritivo. **Plant Stress**, v. 5, p. 32-41, 2011.

SILVA, L. Safrinha o solo, lucro à vista na mão. **O Brasil agrícola**. A Granja. Porto Alegre – RS, N 723, p16-19, mar. 2009.

SILVEIRA, D. C. et al. Caracterização agromorfológica de variedades de milho crioulo (Zea mays l.) Na região noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência & Tecnologia**, v. 1, n. 1, p. 01-11, 2015.

SINGH, M. et al. Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. **Review in Environmental Science and Bio /Technology**, v. 14, p. 407-426, 2015.

SOARES, M. A. et al. Fenologia, componentes de produção e rendimento agrícola do milho sob lâminas de irrigação na região de Rio Largo, Alagoas. **IRRIGA**, v. 25, n. 2, p. 279-295, 2020.

SANTOS, V. M. et al. Índices fisiológicos de plântulas de milho (Zea mays L.) sob ação de bioestimulantes. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 4, n.3, p. 232-239, 2013.

SOUZA, T. C. Ecofisiologia e suas implicações no manejo cultural do milho safrinha. In: SEMINÁRIO NACIONAL [DE] MILHO SAFRINHA, 14., 2017, Cuiabá. **Construindo sistemas de produção sustentáveis e rentáveis**: anais. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2017. p. 42-85.

SOUZA, T. C.; SOUZA, K. R. D.; MAGALHÃES, P. C. Respostas morfofisiológicas do milho e sorgo sob déficit hídrico. In: PAES, M. C.; PINHO, R. G. V.; MOREIRA, S. G. **Soluções integradas para os Sistemas de Produção de Milho e Sorgo no Brasil**. Sete Lagoas: ABMS, 2018. Cap. 20, p.576-621.

SOUZA, E. J. et al. Eficiência do uso da água pelo milho submetido ao déficit hídrico e a diferentes concentrações de silício. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 8, n. 29, p. 260-267, 2016.

SOUZA, L. B. et al. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p.715-721, 2011.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações.** Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2017.

URCHEI, M. A.; RODRIGUES, J. D.; STONE, L. F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.3, p.497-506, 2000.

SCHUT, A. G. T. et al. Assessing yield and fertilizer response in heterogeneous smallholder fields with UAVs and satellites. **Field Crops Research**, v. 221, p. 98-107, 2018.

USDA – United States Department of Agriculture. 2021. “World Agricultural Production. Circular Series WAP 8-21, August, 2021.” https:// https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf

VELOSO, G. A.; FERREIRA, M. E.; SILVA, B. B. Determinação da evapotranspiração real diária em áreas irrigadas do projeto Jaíba (Minas Gerais, Brasil), mediante imagens Landsat 5 – TM. **Revista Cerrados**, v.15, n. 1, p.53-76, 2017.

WAGNER, M. V. et al. Estimativa da produtividade do milho em função da disponibilidade hídrica em Guarapuava, PR, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 170-179, 2013.

WANG, X. et al. Determining the canopy water stress for spring wheat using canopy hyperspectral reflectance data in loess plateau semiarid regions. **Spectroscopy Letters**, v. 48, n. 7, p. 492-498, 2015.

WANG, L. et al. “Applications of unmanned aerial vehicle images on agricultural remote sensing monitoring,” Nongye Gongcheng Xuebao/ Transactions of the Chinese **Society of Agricultural Engineering**, v. 29, n. 18, p. 136–145, 2013.

WIJEWARDANA, C. et al. Physiological assessment of water deficit in soybean using midday leaf water potential and spectral features. **Journal of Plant Interactions,** v.14, p. 533-543, 2019.

XUE, J.; SUN, B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. **Journal of Sensors,** v. 1, p. 1-18, 2017.

ZENG, C. et al. A new tilt-arm transitioning unmanned aerial vehicle: introduction and conceptual design. **Aerospace Science and Technology**, v. 99, p. 1-15, 2020.

ZHANG, L. et al. Evaluating the sensitivity of water stressed maize chlorophyll and structure based on UAV derived vegetation indices. **Computers and Electronics in Agriculture,** v.1, p. 1-9, 2021.

# CAPÍTULO I

## ANÁLISE DE CRESCIMENTO DE HÍBRIDOS DE MILHO SUMETIDOS A DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS


### RESUMO

A disponibilidade de água no solo é um dos fatores mais importantes para o crescimento e desenvolvimento do milho. O objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento de dois híbridos de milho BRS 3046 (híbrido triplo convencional) e Status VIP3 (híbrido simples transgênico) submetidos a distintos regimes hídricos nas condições de solo e clima de Teresina, PI. O estudo foi conduzido na área experimental da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI, de agosto a novembro de 2019. O delineamento utilizado foi de blocos ao acaso, com quatro repetições e parcelas subdivididas. As parcelas constaram de cinco regimes hídricos (RH), com base na evapotranspiração da cultura (ETc): 40, 60, 80, 100 e 120% e as subparcelas pelos híbridos de milho. Para avaliação da área foliar e da produção de matéria seca total (MST), foi coletada uma planta por parcela, em dez avaliações. Foram avaliados também: o índice de área foliar (IAF), a taxa de crescimento da cultura (TCC), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa assimilatória líquido (TAL) e a razão de área foliar (RAF). O aumento na disponibilidade de água no solo decorrente da aplicação dos RH mais favorecidos (100 e 120% ETc) induz incremento no acúmulo de matéria seca total e no IAF e na TCC. Dentre os híbridos o Status Vip 3 apresenta maior acúmulo de matéria seca total e os maiores valores IAF e TCC.


**Palavras-chaves:** Estresse hídrico; Parâmetros fisiológicos; *Zea mays*.

# CHAPTER I

## GROWTH ANALYSIS OF CORN HYBRIDS SUBMITTED TO DIFFERENT WATER REGIMES


### ABSTRACT

The availability of water in the soil is one of the most important factors for the growth and development of maize. The objective of this work was to evaluate the growth of two corn cultivars BRS 3046 (conventional triple hybrid) and Status VIP3 (transgenic single hybrid) submitted to different water regimes in soil and climate conditions of Teresina, PI. The study was conducted in the experimental area of Embrapa Mid-North, Teresina, PI, from August to November 2019. The design used was randomized blocks, with four replications and split plots. The plots consisted of five water regimes (RH), based on crop evapotranspiration (ETc): 40, 60, 80, 100 and 120% and the subplots by corn hybrids. To evaluate the leaf area and total dry matter (MST) production, one plant per plot was collected in ten evaluations. The following were also evaluated: leaf area index (LAI), crop growth rate (CGR), relative growth rate (RGR), net assimilation rate (NAR) and leaf area ratio (RAF). The increase in the availability of water in the soil resulting from the application of the most favored RH (100 and 120% ETc) induces an increase in the accumulation of total dry matter and in the LAI and CGR. Among the hybrids, Status VIP3 has the highest total dry matter accumulation and the highest LAI, and GCR values.


**Keywords:** Water stress; Physiological parameters; *Zea mays*.

# 1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays L*.) destaca-se como um dos cereais mais cultivados em todo o mundo, faz parte da composição de produtos amplamente utilizados na alimentação humana e animal e é matéria prima para a indústria de alta tecnologia, como a produção de filmes e embalagens biodegradáveis (LUCENA et al., 2017; MACHADO et al., 2020). A produtividade depende da quantidade de água disponível, sendo o rendimento da cultura prejudicado quando submetido a déficit hídrico nos períodos críticos de desenvolvimento. Nesse sentido, o déficit hídrico é apontado como um dos fatores mais importantes que limitam a produção de milho, especialmente nas áreas onde ocorre período prologado de seca, como em região com escassez hídrica (SILVA, 2009).

A redução do nível de água no solo constitui-se num dos principais fatores limitantes ao crescimento das plantas, que depende da formação dos tecidos bem como da expansão e diferenciação celular. O crescimento das plantas é reduzido em condições de déficit hídrico devido à diminuição da área foliar e, portanto, da absorção de luz e redução de $CO_2$ absorvido decorrente do fechamento dos estômatos, provocando redução da taxa de fotossíntese por unidade de área (KRAMER, 1980).

Uma das formas de avaliar o crescimento das plantas é através da análise, que possibilita avaliar o crescimento final da planta bem como a contribuição dos diferentes órgãos no crescimento total. Para essa análise são coletados dados, tais como área foliar e massa seca, em intervalos de tempo definidos, com os quais pode-se inferir a atividade fisiológica, isto é, estimar de forma precisa as causas das variações de crescimento entre plantas em resposta a fatores bióticos e abióticos (BENINCASA, 1988).

A análise de crescimento descreve as mudanças na produção vegetal em função do tempo, e propõe-se a acompanhar a dinâmica da produção fotossintética avaliada por meio do acúmulo de massa seca, o que não é possível com o simples registro do rendimento, (URCHEI; RODRIGUES; STONE, 2000). O crescimento das plantas está diretamente relacionado ao suprimento de água e ao status da água na planta, assim, quando a disponibilidade hídrica no solo é insuficiente, as plantas ficam sob estresse hídrico, o que leva à redução do rendimento das culturas (XUE;

SU, 2017). Garcia et al. (2008) observaram que a deficiência hídrica afeta negativamente os índices fisiológicos do crescimento do milho, e que durante o período vegetativo (após a emissão da 12ª folha), foi a que mais afetou a cultura em termos fisiológico e de produção.

Diante disso, considerando a importância do milho na alimentação humana e animal e o fato de seu crescimento e produtividade serem prejudicados sob condições de déficit hídrico, este trabalho teve como objetivo avaliar o crescimento de dois genótipos de milho, o BRS 3046 (híbrido triplo convencional) e Status Vip 3 (híbrido simples transgênico), submetidos a distintos regimes hídricos nas condições de solo e clima de Teresina, PI.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na área experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina, PI (05°05’ S; 42°48’ W e 74,4 m), no período de agosto a novembro de 2019 (Figura 1). O clima da região segundo a classificação climática de Thornthwaite e Mather (1955) é C1sA’a’, caracterizado como subúmido seco, megatérmico, com excedente hídrico moderado no verão com temperatura média anual de 28,5°C e precipitação pluvial anual média de 1.318 mm (BASTOS; ANDRADE JÚNIOR, 2019).

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (MELO; ANDRADE JÚNIOR; PESSOA, 2014). Seus atributos físico-hídricos foram determinados pelo Laboratório de Solos da Embrapa Meio-Norte, apresentando os seguintes valores: na camada 0-0,2 m: areia grossa (AG) = 532,0 g $kg^{-1}$, areia fina (AF) = 344,5 g $kg^{-1}$; silte (S) = 37,5 g $kg^{-1}$; argila (A) = 86,0 g $kg^{-1}$, capacidade de campo (CC) = 21,7% (em volume), ponto de murcha permanente (PMP) = 5,3% (em volume) e densidade (DS) = 1,7 g $cm^{-3}$; e na camada 0,2-0,4 m: AG = 453,0 g $kg^{-1}$, AF = 358,5 g $kg^{-1}$; S = 52,5 g $kg^{-1}$; A = 136,0 g $kg^{-1}$, CC = 20,8% (em volume), PMP = 6,0% (em volume) e DS = 1,65 g $cm^{-3}$.

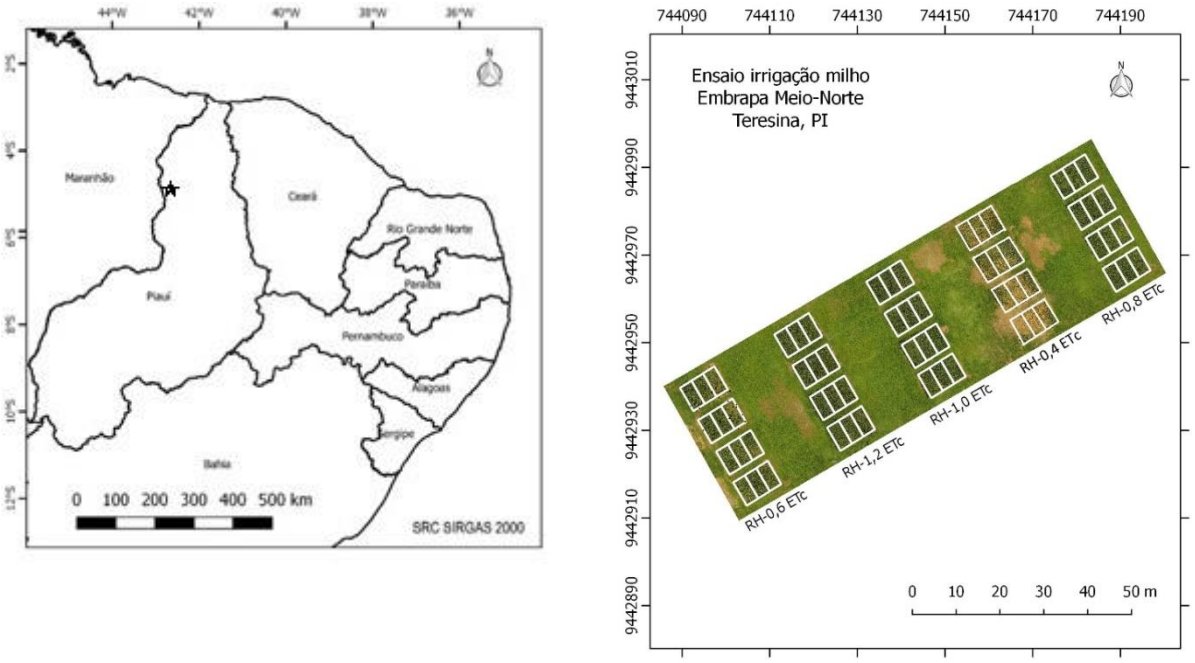



**Figura 1**. Localização do município de Teresina, PI (à esquerda) e imagem digital aérea da área experimental (à direita). Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens. A adubação foi realizada conforme a análise prévia do solo e a recomendação para a cultura do milho (CARDOSO et al., 2012). Na adubação de fundação aplicou-se 75 kg de N $ha^{-1}$, 80 kg de $P_2O_5$ $ha^{-1}$, 35 kg de $K_2O$ $ha^{-1}$ e 3 kg de Zn $ha^{-1}$. Por ocasião da 6ª folha completamente emergida, foi efetuada a adubação de cobertura, com aplicação de 75 kg de N $ha^{-1}$ e 35 kg de $K_2O$ $ha^{-1}$. Nas adubações utilizou-se como fonte de N o sulfato de amônio, de $P_2O_5$ o superfosfato triplo, de $K_2O$ o cloreto de potássio e de Zn o sulfato de zinco.

O experimento foi conduzido sob irrigação por aspersão convencional fixa, com os aspersores espaçados em 12 x 12 m. Avaliou-se a aplicação de cinco regimes hídricos (RH) com base na evapotranspiração da cultura (ETc) (40, 60, 80, 100 e 120% da ETc) em dois híbridos de milho. Os híbridos utilizados foram o “BRS 3046” (híbrido triplo convencional) e “Status VIP3” (híbrido simples transgênico). Os RH diferenciados foram aplicados utilizando-se tempos de irrigação distintos. Utilizou-se o método de Penman Monteith para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) e valores de coeficientes de cultura (Kc) da FAO (ALLEN et al., 1998). Para a aplicação dos RH adotou-se o seguinte manejo de irrigação: aplicação de lâmina uniforme equivalente a 100% da ETc da semeadura aos 36 dias após a semeadura

(DAS) (fase de desenvolvimento vegetativo); e dos 37 aos 88 DAS, aplicação de lâminas de irrigação diferenciadas com base na ETc.

Utilizou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso, com os tratamentos arranjados em parcelas subdivididas (RH, nas parcelas, e híbridos, nas subparcelas), em quatro repetições. A semeadura foi efetuada em um espaçamento de 0,5 m entre fileiras, com quatro plantas por metro (8,0 plantas $m^{-2}$). A subparcela foi composta por seis fileiras com seis metros (18 $m^2$), com as quatro fileiras centrais (12 $m^2$) usadas nas avaliações, dos quais 6 $m^2$ foram usados para retirada de plantas para análise de crescimento e 6 $m^2$ para medida da produção final. A parcela experimental mediu 36 $m^2$. A semeadura ocorreu em 05/08/2019 e a colheita (grãos secos) em 12/11/2019 (aos 99 DAS).

Para o monitoramento do conteúdo de água do solo (%, em volume) foram instalados três tubos de acesso de PVC em cada RH, com 1,0 m de profundidade, dispostos entre as fileiras centrais. Utilizou-se uma sonda de capacitância (FDR) modelo Diviner 2000® da Sentek Pty Ltda, Austrália. As leituras foram realizadas diariamente, sempre antes e aproximadamente 24 horas após as irrigações. O conteúdo de água no solo em cada camada (0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 m) dos regimes hídricos, foi calculado pela média dos valores de umidade medidos durante o ciclo do milho.

Para a avaliação da massa seca total da parte aérea (MST, em g) e da área foliar (AF, em $cm^2$), foram realizadas dez coletas de planta ao longo do ciclo da cultura, uma planta por subparcela. Cada coleta constou do corte, na altura do colo, da parte aérea de uma planta por subparcela. As coletas destrutivas foram iniciadas 24 dias após a semeadura (DAS) e seguiram com intervalo de sete dias até os 87 DAS, totalizando 10 coletas ao longo do ciclo da cultura (24, 31, 38, 45, 52, 59, 66, 73,80 e 87 DAS). As plantas depois de colhidas foram levadas ao laboratório de Ecofisiologia da Embrapa Meio-Norte, para avaliação da MST da planta. A MST seca foi medida após secagem em estufa com circulação de ar forçada a 70°C até peso constante. Antes da secagem, mediu-se a área foliar de cada planta, utilizando-se um integrador de área LI-3100 (Licor Inc., Lincoln, EUA). A partir da AF foi calculado o índice de área foliar (IAF), determinado pela relação entre a AF média de uma planta e a superfície correspondente de terreno, em cada tratamento. Os valores do IAF e MST foram ajustados, em função do tempo, por uma equação exponencial quadrática (PORTES; CASTRO JUNIOR, 1991).

Com os dados de IAF e MST estimaram-se os seguintes parâmetros fisiológicos: I – taxa de crescimento da cultura (TCC), determinada por meio da derivada da equação ajustada da matéria seca total em relação ao tempo, em g $m^{-2}$ $dia^{-1}$; II – taxa de crescimento relativo (TCR), expressa em g $g^{-1}$ $dia^{-1}$ e calculada pelo quociente entre a TCC e a MS; III – taxa assimilatória líquida (TAL), determinada pela razão entre a TCC e o IAF, em g $m^{-2}$ $dia^{-1}$; IV – razão de área foliar (RAF), definida como sendo o quociente entre a AF e a MS. Para essas estimativas utilizou-se o programa ANACRES (PORTES; CASTRO JÚNIOR, 1991).

Com o programa ANACRES geraram-se equações de regressão que melhor apresentaram ajustes aos dados de AF e MST, para cada híbrido e RH avaliado. Para os parâmetros fisiológicos de crescimento (TCC, TCR, TAL e RAF), calculados na análise de crescimento, não foram feitas as apreciações de variância, pois, sendo variáveis calculadas, não é possível afirmar que as mesmas obedeçam às pressuposições básicas para esse tipo de análise (BANZANTO; KRONKA, 1989).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a fase inicial de estabelecimento do experimento, não houve diferenciação na aplicação da lâmina de irrigação, sendo diferenciada apenas a partir do trigésimo sétimo dia após a semeadura (DAS). Essa diferença pode ser observada pela separação dos níveis de irrigação aplicada apresentados pelo gráfico, onde RH1=40, RH2=60, RH3=80, RH4=100 e RH5=120% da evapotranspiração da cultura (ETc) (Figura 2).

Durante a aplicação dos RH diferenciados nos tratamentos com reposição de 40, 60, 80, 100 e 120% da ETc, foram aplicadas lâminas de irrigação de 152; 222,2; 284,9; 363,9 e 438,7 mm, respectivamente. Esses resultados demonstram que durante o período de imposição dos RH diferenciados as lâminas de irrigação deficitária (40, 60 e 80% da ETc) corresponderam a 41,7; 61 e 78,3% da irrigação plena (100% ETc), respectivamente, confirmando a diferenciação das lâminas de irrigação dentro dos RH avaliados (Figura 2).

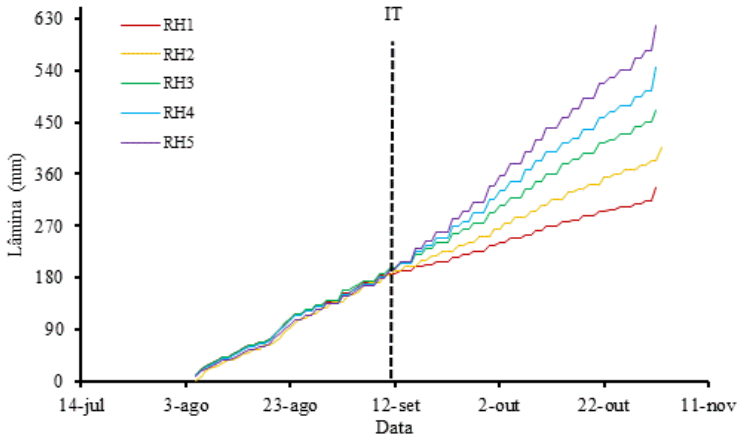



**Figura 2.** Lâminas de irrigação acumuladas durante o ciclo do milho em resposta aos regimes hídricos aplicados. Teresina, PI, 2019. IT: início da aplicação dos RH diferenciados (37 DAS).

No total, durante todo o ciclo da cultura, as lâminas de irrigação aplicadas em cada RH totalizaram 336 (RH1), 406,8 (RH2), 471,3 (RH3), 546,0 (RH4) e 618,6 mm (RH5), resultando em lâmina média diária de 3,8, 4,6, 5,3, 6,2 e 7,0 mm, nesta ordem, entre os RH de 40% ETc a 120% ETc. Estudos têm demonstrado que a quantidade de água consumida por uma lavoura de milho durante o seu ciclo varia de 500 a 800 mm, dependendo das condições climáticas, da cultivar e do manejo da cultura (DOORENBOS; KASSAN, 1994; ZANETTI et al., 2019; AVILEZ et al., 2020). A maior exigência hídrica ocorre durante o pendoamento ao início do enchimento de grãos, quando a planta apresenta maior valor em área foliar, o que aumenta a transpiração da cultura (ALMEIDA et al., 2017).

A variação média do teor de água no solo até 0,4 m de profundidade indica que houve um gradiente decrescente do teor de água no solo, obedecendo a ordem de aplicação de água dos RH, ou seja, onde houve maior aplicação de água a umidade do solo foi maior (Figura 3a). Observou-se maior variabilidade nas camadas de 0,1 e 0,2 m. Para a profundidade total avaliada (0,0-0,4 m), os valores médios oscilaram de 7,7% (RH1) a 17,0% (RH5), resultando em uma variação média na disponibilidade de água no solo de 47,0% e 108,1%, respectivamente (Figura 3b). Quanto ao tratamento RH3 (80% ETc), o teor de água no solo permaneceu acima do ponto de murcha permanente, porém abaixo do limite de água disponível para a cultura do milho, que segundo Doorenbos e Kassam (1994), é de 50%.

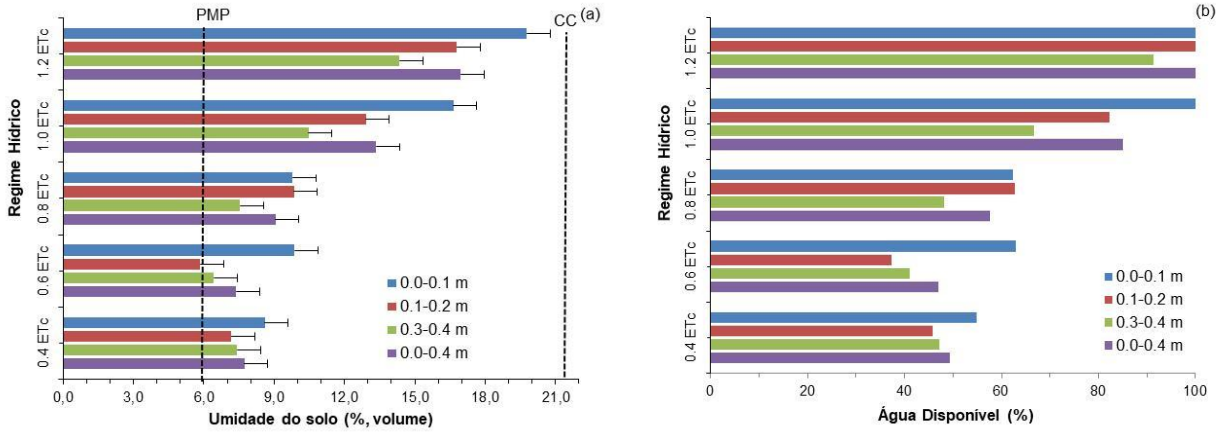
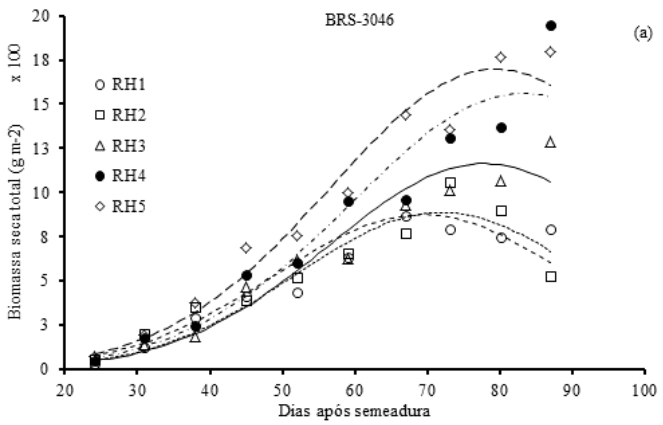



**Figura 3.** Umidade (%, volume) (a) e água disponível (AD, %) (b) no solo, nas profundidades de 0,1 m, 0,2 m, 0,3-0,4 m e 0,0-0,4 m, em resposta aos regimes hídricos (RH-ETc) aplicados às plantas. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

Conforme a Figura 3b, ao se aplicar as maiores lâminas (RH5 e RH4), os níveis de água disponível mantiveram-se acima de 66% em todo o perfil do solo (0,00 m a 0,4 m). Já tratamento intermediário RH3 (80% ETc), apresentou percentual de água disponível com valores entre 48 e 63% em todo o perfil do solo. As lâminas RH1 (40% ETc) e RH2 (60%ETc) apresentaram comportamento semelhante entre si em quase todo o perfil, estabelecendo-se entre 37 e 62% da água disponível, permanecendo acima do PMP, porém, abaixo da umidade crítica constatando-se um maior déficit hídrico neste tratamento.

As curvas ajustadas de massa seca total da parte aérea (MST) em função do tempo são apresentadas nas Figuras 4a e 4b. A MST das plantas de milho em função dos RH ajustou-se a um modelo de regressão exponencial quadrática. Até os 40 DAS não houve diferenças no acúmulo de MST para os híbridos BRS 3046 e Status VIP3, justificado por ainda não ter sido iniciado a diferenciação dos RH.



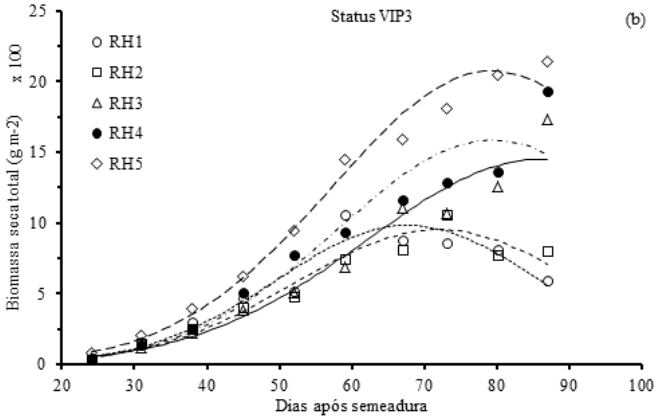



**Figura 4.** Produção de matéria seca total da parte aérea em híbridos de milho submetidos a diferentes regimes hídricos (RH1=40, RH2=60, RH3=80, RH4=100 e RH5=120% da ETc) ao longo do ciclo. Teresina, PI, 2019.

A partir dos 50 DAS, as diferenças no acúmulo de massa seca da parte aérea passam a ser maior, intensificando do início da fase de pendoamento e floração e, quando a necessidade hídrica da planta tende a aumentar, até a fase de enchimento de espiga, com posterior declínio na fase de maturidade fisiológica do grão. Além disso, é na fase de enchimento de grãos que ocorre o aumento na deposição de matéria seca, estando à matéria seca relacionada com a fotossíntese, e se esta for afetada pela deficiência hídrica, haverá uma menor produção de carboidratos, o que implicaria em menor volume de matéria seca nos grãos (MAGALHÃES et al., 2009; SOUZA et al., 2013).

Os maiores valores de MST foram obtidos com a aplicação do RH equivalente a 120% ETc (1.969,8 g $m^{-2}$), enquanto os menores foram alcançados com a aplicação do menor RH1 (40%ETc/927,8 g $m^{-2}$). Dentre os híbridos, o Status VIP3 foi o que produziu a maior quantidade de MST com aplicação de 120% ETc com acúmulo de 2.142,8 g $m^{-2}$), enquanto o BRS 3046 acumulou 1.942,3 g $m^{-2}$ com aplicação do RH4 (100% ETc).

Verifica-se que, independentemente do RH, o formato da curva de acúmulo de MST permanece o mesmo, portanto, a alteração que ocorre variando-se a lâmina de irrigação é somente na velocidade com que a planta cresce e acumula matéria seca. Observa-se que os menores valores de MST, independentemente do híbrido, foram obtidos nos RH correspondentes a aplicação das frações 40 e 60% da ETc, ou seja, o efeito mais severo do déficit hídrico na perda de matéria seca foi observado para os tratamentos correspondentes a reposição das menores frações da ETc. O déficit hídrico afeta quase todos os aspectos relacionados ao

desenvolvimento das culturas: reduz a área foliar, a taxa fotossintética, brotação, absorção de nutrientes e translocação de fotoassimilados (BERGAMASCHI et al., 2006), resultando em menor acúmulo de massa seca pela planta.

As plantas cultivadas sob condições inadequadas de fornecimento de água apresentam frequentemente menor produção de biomassa, quando comparadas àquelas mantidas a elevados potenciais da água no solo; ocorrendo nas plantas submetidas a déficit hídrico redução da taxa fotossintética, com consequente diminuição na produção de MST (FUMIS; PEDRAS; SAMPAIO, 1997). As curvas de acúmulo de matéria seca do milho sugerem que a aplicação do RH equivalente a 120% da ETc possibilitou melhor desenvolvimento da cultura, o que pode ser decorrente do aumento da disponibilidade de água no solo apontada na Figura 3 b.

As equações exponenciais quadráticas ajustadas aos dados de MST, com seus respectivos coeficientes de determinação ($R^2$), bem como os valores estimados, são apresentadas na Tabela 1. Para ambos os híbridos, indiferentemente ao RH aplicado, a produção de MST estimada foi obtida com elevado $R^2$ ($R^2 \geq 0,97$).

**Tabela 1.** Equações de regressão, valor estimado de matéria seca total (MST, g $m^{-2}$) de híbridos de milho e coeficientes de determinação ajustados ($R^2$), para os diferentes regimes hídricos em função dos dias após a semeadura (DAS). Teresina, PI, 2019.

| Híbrido | Equações | Est.[1] | DAS | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| **RH1 – 40% ETc** | | | | |
| BRS3046 | $1,3634 \text{ Exp } (0,1802 \text{ DAS} - 1,2535\times10^{-3} \text{ DAS}^2)$ | 887,2 | 72 | 0,97 |
| Status VIP3 | $0,9168 \text{ Exp } (0,2060 \text{ DAS} - 1,5212\times10^{-3} \text{DAS}^2)$ | 983,9 | 68 | 0,98 |
| **RH2 – 60% ETc** | | | | |
| BRS3046 | $2,8017 \text{ Exp } (0,1658 \text{ DAS} - 1,1975\times10^{-3} \text{ DAS}^2)$ | 874,5 | 69 | 0,97 |
| Status VIP3 | $1,240 \text{ Exp } (0,1847 \text{ DAS} - 1,2848\times10^{-3} \text{ DAS}^2)$ | 951,3 | 72 | 0,98 |
| **RH3 – 80% ETc** | | | | |
| BRS3046 | $1,4201 \text{ Exp } (0,1724 \text{ DAS} - 1,1082\times10^{-3} \text{ DAS}^2)$ | 1163,2 | 78 | 0,98 |
| Status VIP3 | $2,4331 \text{ Exp } (0,1483 \text{ DAS} - 8,6139\times10^{-4} \text{ DAS}^2)$ | 1448,7 | 86 | 0,99 |
| **RH4 – 100% ETc** | | | | |
| BRS3046 | $2,8487 \text{ Exp } (0,1518 \text{ DAS} - 9,1423\times10^{-4} \text{ DAS}^2)$ | 1562,1 | 83 | 0,98 |
| Status VIP3 | $1,4486 \text{ Exp } (0,1764 \text{ DAS} - 1,1120\times10^{-3} \text{ DAS}^2)$ | 1585,5 | 79 | 0,98 |
| **RH5 – 120% ETc** | | | | |
| BRS3046 | $3,8923 \text{ Exp } (0,1531 \text{ DAS} - 9,6430\times10^{-3} \text{ DAS}^2)$ | 1697,5 | 79 | 0,99 |
| Status VIP3 | $3,0696 \text{Exp } (0,1644 \text{ DAS} - 1,0369\times10^{-3} \text{ DAS}^2)$ | 2075,2 | 79 | 0,99 |

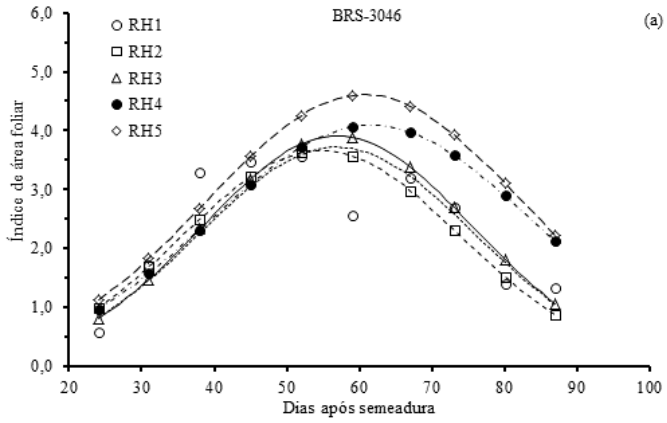
[1]Valor Estimado

Derivando a equação encontrada para MST, encontrou-se um valor máximo de 1.697,5 e 2.075,2 g aos 79 DAS para os híbridos BRS 3046 e VIP3, respectivamente, quando submetidas ao RH correspondente à aplicação de 120%

ETc, esses resultados demonstram que o acúmulo de MST do milho foi claramente influenciado pelos RH, com a aplicação da maior lâmina proporcionando os maiores valores de MST, destacando-se o híbrido Status VIP3 (2.075,2 g). Garcia et al. (2008) constataram, aos 107 dias após a emergência, que plantas de milho submetidas ao déficit hídrico, seja inicial ou após o florescimento, apresentaram menor acúmulo de MST, resultados semelhantes aos obtidos no presente estudo.

O híbrido Status VIP3 exibiu acúmulo de MST das plantas de milho superior ao BRS 3046 em todos os tratamentos hídricos, como pode ser visualizado na Tabela 1. Contudo, os tratamentos referentes à reposição de 100% ETc e 120% ETc estimaram os maiores valores de MST para ambos os híbridos. Os valores para esta variável alteraram de 983,9 a 2.075,2 g para Status VIP3 e 887,2 a 1697,5 g no BRS 3046.

A Figura 5 evidencia as curvas ajustadas do IAF em função do tempo, para todos os tratamentos. O IAF máximo obtido pelas curvas ajustadas, em todos os tratamentos, ocorreu em torno dos 59 DAS. Os valores mais altos dessa variável ocorreram com aplicação do RH5 (120% ETc), assim como observado para MST, sobressaindo mais uma vez o híbrido Status VIP3 em relação ao BRS 3046. As diferenças entre RH aumentaram a partir dos 50 DAS para BRS 3046 (Figura 5a) e aos 40 DAS para VIP3 (Figura 5b), intensificando-se ainda mais durante o período reprodutivo da cultura. Os menores valores de IAF foram observados ao final do ciclo da cultura com valores próximos a um no RH2 híbrido BRS 3046; e próximos a 1,3 no RH1 híbrido Status VIP3. A redução do IAF no final do ciclo da cultura justifica-se pela senescência e abscisão foliar, que se intensifica e antecipa nos tratamentos com menor reposição da necessidade hídrica da cultura (AGUIAR NETO et al., 2000).



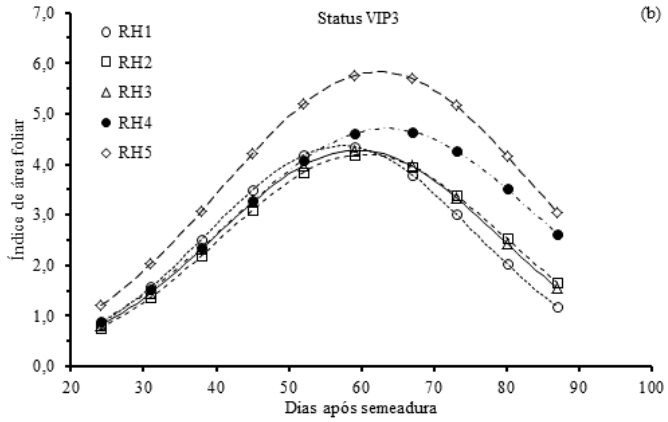



**Figura 5.** Índice de área foliar de milho, durante o ciclo de desenvolvimento, BRS 3046 (a) e Status VIP3 (b), sob diferentes regimes hídricos (RH1=40, RH2=60, RH3=80, RH4=100 e RH5=120% da ETc). Teresina, PI, 2019.

As equações ajustadas para o IAF em resposta aos RH foram exponenciais quadráticas (Tabela 2). Dentre os tratamentos, o IAF do híbrido Status VIP3 atingiu valor máximo aos 62 DAS, no estádio reprodutivo da cultura, com o maior valor observado de 5,83 no tratamento referente ao RH5 e o menor de 4,19 no RH2 aos 60 DAS. O BRS 3046 atingiu valor máximo de IAF aos 61 DAS, com valor estimado de 4,61 e o menor de 3,66 aos 55 DAS, com a reposição das frações de 120% ETc e 60% ETc, respectivamente.

**Tabela 2.** Equações de regressão, valor estimado do índice de área foliar (IAF) de híbridos de milho e coeficientes de determinação ajustados ($R^2$), para os diferentes regimes hídricos em função dos dias após a semeadura (DAS). Teresina, PI, 2019.

| Híbrido | Equações | Est.[1] | DAS[2] | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| **RH1 – 40% ETc** | | | | |
| BRS3046 | $4{,}0859\times10^{-2}$ Exp (0,1586 DAS - $1{,}3951\times10^{-3}$ $DAS^2$) | 3,72 | 57 | 0,90 |
| Status VIP3 | $3{,}3782\times10^{-2}$ Exp (0,1698DAS - $1{,}4838\times10^{-3}DAS^2$) | 4,36 | 57 | 0,93 |
| **RH2 – 60% ETc** | | | | |
| BRS3046 | $5{,}9270\times10^{-2}$ Exp (0,1506DAS - $1{,}3763\times10^{-3}$ $DAS^2$) | 3,66 | 55 | 0,90 |
| Status VIP3 | $3{,}6594\times10^{-2}$ Exp (0,1573DAS - $1{,}3056\times10^{-3}DAS^2$) | 4,19 | 60 | 0,95 |
| **RH3 – 80% ETc** | | | | |
| BRS3046 | $3{,}5884\times10^{-2}$ Exp (0,1647 DAS - $1{,}4456\times10^{-3}$ $DAS^2$) | 3,91 | 57 | 0,88 |
| Status VIP3 | $3{,}8568\times10^{-2}$ Exp (0,15856 DAS - $1{,}3347\times10^{-3}DAS^2$) | 4,27 | 59 | 0,93 |
| **RH4 – 100% ETc** | | | | |
| BRS3046 | $8{,}6260\times10^{-2}$ Exp (0,1253DAS - $1{,}01774\times10^{-3}$ $DAS^2$) | 4,09 | 62 | 0,90 |
| Status VIP3 | $6{,}3638\times10^{-2}$ Exp (0,1356DAS - $1{,}0682\times10^{-3}$ $DAS^2$) | 4,71 | 63 | 0,93 |
| **RH5 – 120% ETc** | | | | |
| BRS3046 | $9{,}5448\times10^{-2}$ Exp (0,1278DAS - $1{,}0536\times10^{-3}$ $DAS^2$) | 4,61 | 61 | 0,95 |
| Status VIP3 | $8{,}8834\times10^{-2}$ Exp (0,1342DAS - $1{,}0764\times10^{-3}$ $DAS^2$) | 5,83 | 62 | 0,94 |

[1]Valor Estimado

A redução, em relação ao valor máximo do IAF para ambos os híbridos foi de 20,7%. Referente ao RH com reposição de 60% ETc, a justificativa para ocorrência dessa redução é que as plantas submetidas ao déficit hídrico têm como consequência imediata a diminuição da expansão celular, com redução da área foliar (SOARES et al., 2020), e consequentemente, tal fato causa decréscimo da taxa de crescimento da cultura e do IAF.

As equações ajustadas do IAF e seus valores máximos confirmam que o milho teve melhor desenvolvimento com a reposição de 120% da necessidade hídrica da cultura, a qual possibilitou maior expansão e menor abscisão das folhas, implicando elevação do IAF. Sob melhores condições de cultivo, maior será a probabilidade de a planta expressar todo seu potencial genético, assim, quando a lâmina de irrigação foi maior, as condições hídricas foram melhores, com isso houve um maior crescimento em área das folhas (BRITO et al., 2013).

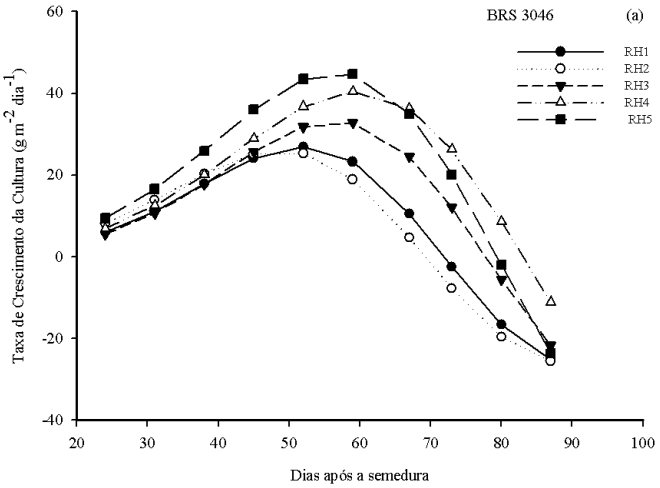
Em condições de déficit hídrico as plantas tendem a apresentar decréscimo da área foliar, fechamento estomático, aceleração da senescência e abscisão das folhas (TAIZ; ZEIGER, 2017), desse modo, quando as plantas são expostas a situações de déficit hídrico, exibem frequentemente respostas fisiológicas que resultam de modo indireto na conservação da água no solo, como se estivessem economizando para períodos posteriores (KÜSTER et al., 2020).

Os valores máximos de IAF atingidos pelos híbridos BRS 3046 e Status VIP3, próximos a cinco e seis, respectivamente assemelham-se aos relatados por Garcia et al. (2008), em estudo com o híbrido Dina-70 aos 67 dias após a emergência, no estádio de florescimento e por Guiscem et al. (2002) avaliando as cultivares BR 201 e BR 106 e as linhagens CMS 455, CMS 28 e CMS 136 no plantio de safrinha.

O menor valor de IAF (3,66) foi observado para o híbrido BRS 3046, quando submetido à aplicação do RH equivalente a 60% ETc. As curvas ajustadas do IAF e seus respectivos valores máximos confirmam que os híbridos de milho tiveram melhor desenvolvimento com a reposição da fração 120% ETc, o qual possibilitou maior expansão e menor abscisão das folhas, implicando elevação do IAF. Uma das consequências imediatas do déficit hídrico é a diminuição da expansão celular, que causa redução da área foliar. Por sua vez, a redução da área foliar causa decréscimo da taxa de crescimento da planta, especialmente durante os estádios iniciais de crescimento e, em consequência, menor interceptação da radiação solar (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Além disso, plantas em condições de deficiência hídrica tendem a fechar seus estômatos e, consequentemente, reduz a taxa fotossintética, o crescimento e a fixação de $CO_2$ (TAIZ; ZEIGER, 2017), contribuindo para redução da produtividade da planta. Esses efeitos foram observados, notadamente com aplicação das menores reposições da ETc (40 e 60%), em que foram constatados os menores valores do IAF, corroborando com Garcia et al. (2008) que constataram que a suspensão da irrigação até a 12ª folha proporcionou os menores valores de IAF para milho.

A taxa de crescimento da cultura (TCC) é um parâmetro que pode ser usado para se ter ideia da velocidade média de crescimento da planta ao longo do período de observação. A TCC apresentou fase inicial com rápido acúmulo de massa seca em todos os tratamentos, até chegar ao seu ponto máximo, que ocorreu em torno de 59 DAS, posteriormente observa-se uma redução nos valores da TCC em todos os tratamentos durante o restante do período de avaliação (Figura 6a e 6b). De acordo com Zucareli et al. (2010), normalmente, os valores da TCC, após um aumento inicial, chegam a seus valores máximos, decrescendo conforme a maturidade fisiológica das plantas em decorrência da paralisação do crescimento vegetativo e da senescência, com queda e morte das folhas.



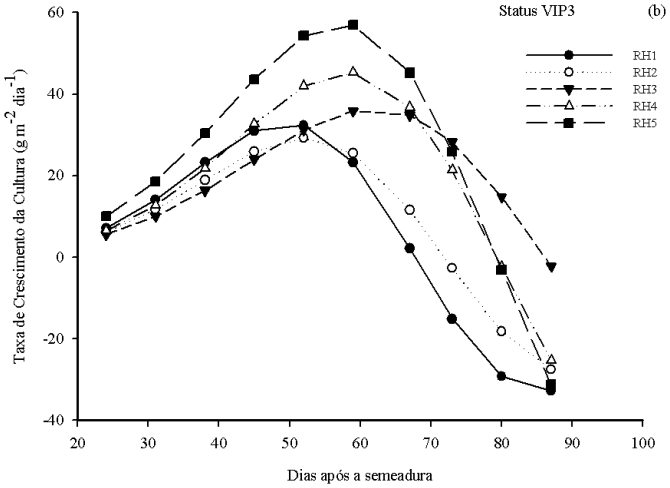



**Figura 6.** Taxa de crescimento da cultura para dos híbridos de milho BRS 3046 (a) e Status VIP3 (b) em função de diferentes regimes hídricos (RH1=40, RH2=60, RH3=80, RH4=100 e RH5=120% da ETc). Teresina, PI, 2019.

As curvas da TCC em função do tempo, para os diferentes RH, evidenciam maior acúmulo de matéria seca de milho para as plantas submetidas à aplicação do RH5 (50,8 g $m^{-2}$ $dia^{-1}$), enquanto as plantas submetidas aos RH1 (34,8 g $m^{-2}$ $dia^{-1}$) e RH2 (27,3 g $m^{-2}$ $dia^{-1}$) apresentaram os menores valores de TCC. Observa-se que, no início, as diferenças entre os tratamentos são pequenas, justificado por ainda não ter sido iniciado a diferenciação dos RH, somente a partir dos 45 DAS (nove dias após o início da diferenciação dos RH), as diferenças passam a ser bastante acentuadas e crescentes até atingir a TCC máxima, em torno dos 59 DAS com posterior decréscimo apresentando valores negativos no final do período de observação.

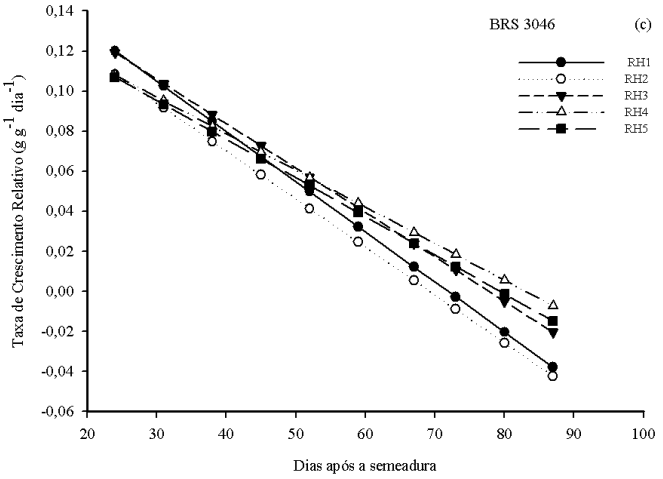
Dentre os híbridos avaliados, os maiores valores da TCC em seu ponto máximo de crescimento foram observados para o Status VIP3 (57,0 g $m^{-2}$ $dia^{-1}$) com aplicação do RH5 (Figura 6b). Por sua vez, as plantas submetidas às frações 40% e 60% da ETc apresentaram os menores valores de TCC, independentemente do híbrido. A TCC pode ser usada para se ter ideia da velocidade média de crescimento da planta ao longo do período de observação de forma que quanto maiores seus valores, maior a velocidade de crescimento das plantas (SANTOS et al., 2013).

Verificou-se que durante o crescimento da cultura as curvas da TCC com aplicação dos RH, apresentaram comportamento semelhante àquele observado para o IAF, além de guardarem correspondência com as curvas de MST. Assim, tal como ocorreu com o IAF, a maior taxa de crescimento se manifestou em torno dos 60

DAS, durante o período reprodutivo, decrescendo sistematicamente a partir dessa coleta (Figura 6).

Guiscem et al. (2002), avaliando o comportamento fisiológico de cultivares de milho no plantio de “safrinha”, por meio de análise de crescimento, verificaram que as maiores TCC ocorreram entre o período de 35 até, aproximadamente, 60 DAS, período este correspondente ao final do primórdio floral e início do florescimento. Após 60 dias, essa taxa apresentou valores negativos o que se deve, provavelmente, à senescência e queda das folhas, principalmente daquelas abaixo da espiga.

As curvas da taxa de crescimento relativo (TCR), em razão dos DAS dos híbridos de milho submetidos a distintos RH estão apresentadas nas Figuras 7a e 7b. Verifica-se, em todos os RH, um declínio sistemático na TCR com o desenvolvimento da cultura. Observando as figuras 7a e 7b verificamos que independentemente do RH aplicado, os valores de TCR entre os tratamentos foram bem próximos, o que induz a afirmação de que possivelmente a imposição dos RH não influenciou tal variável, demonstrando que a TCR é menos sensível a variações no RH.



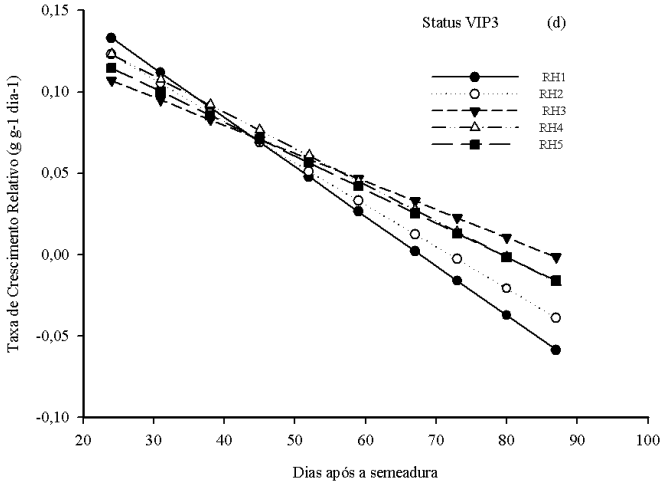



**Figura 7.** Taxa de crescimento relativo (TCR) para os híbridos de milho BRS 3046 (a) e Status VIP3 (b) em função de diferentes regimes hídricos (RH1=40, RH2=60, RH3=80, RH4=100 e RH5=120% da ETc). Teresina, PI, 2019.

Esse declínio na TCR, geralmente, está associado ao acúmulo contínuo de matéria seca no decorrer do período, ocasionada pelo acréscimo de componentes estruturais que não contribuem para o crescimento, e pela redução da capacidade relativa da planta em produzir material novo (ANTONIAZZI; DESCHAMPS 2006; FALQUETO et al. 2009). O que pode ser explicado pelo fato de não serem fotossinteticamente ativos é também devido à elevação da atividade respiratória e auto sombreamento (URCHEI; RODRIGUES; STONE, 2000), além disso, na fase final da cultura, o crescimento torna-se negativo em função da morte de folhas, gemas e aumento gradual de tecido não-assimilatório (MILTHORPE; MOORBY, 1974), conforme observado nesse estudo em todos os diferentes RH.

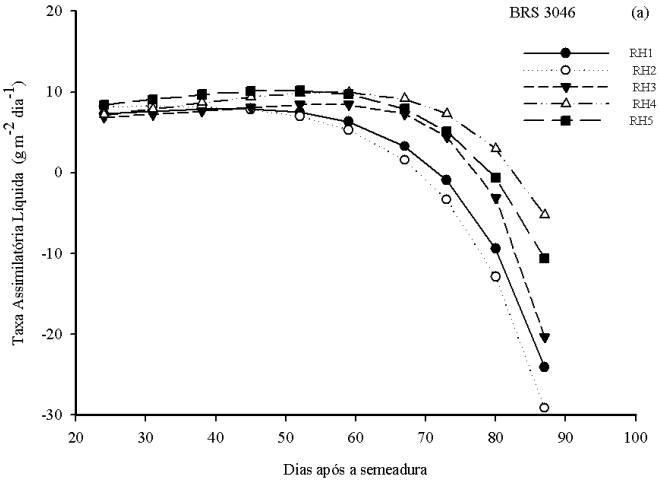
Os resultados obtidos indicam que os híbridos e os RH não expressaram diferenças significativas quanto ao índice fisiológico TCR. Esse resultado induz a afirmação de que os híbridos apresentam semelhanças na eficiência assimilatória de suas folhas e da massa de área foliar, que varia de acordo com a disponibilidade de água no solo (PEREIRA et al., 2010). Os maiores valores da TCR foram observados aos 24 DAS (nessa fase todos recebiam irrigação plena) com valores variando de 0,11 a 0,13 g $g^{-1}$ $dia^{-1}$, chegando a valores próximos de zero aos 67 DAS. Em geral, constatou-se que o comportamento dos híbridos em relação à TCR foi semelhante ao longo do desenvolvimento das plantas.

As Figuras 8a e 8b representam a taxa de assimilação líquido (TAL) para os híbridos submetidos a distintos RH, em função do intervalo de tempo entre coletas.

Para os dois híbridos, a TAL aumentou em todos os tratamentos até atingir seu crescimento máximo entre 52 e 59 DAS. Os maiores valores de TAL foram alcançados com a aplicação das frações de 100 e 120% da ETc com valores variando de -10,6 a 10,4 g $m^{-2}$ $dia^{-1}$, enquanto os tratamentos de menor reposição hídrica (40, 60 e 80% da ETc) foram os que apresentaram menores valores de TAL (com valores variando de -29,1 a 9,2 g $m^{-2}$ $dia^{-1}$), justificado pelo efeito deletério do déficit hídrico sobre o desenvolvimento das plantas. Os maiores valores de TAL para o híbrido BRS 3046 (10,2 g $m^{-2}$ $dia^{-1}$) e Status VIP3 (10,4 g $m^{-2}$ $dia^{-1}$) foram observados aos 52 DAS com aplicação do RH5.

O comportamento crescente nos valores de TAL no início do desenvolvimento das plantas é devido à menor área foliar existente e à elevada capacidade das folhas jovens realizarem fotossíntese. Porém, com o avanço do desenvolvimento da cultura os valores tendem a ir diminuindo, em função da planta encontrar-se em fase de senescência, com queda e morte das folhas, resultando inclusive em TAL negativo ao final do ciclo da cultura (ANTONIAZZI; DESCHAMPS, 2006).

Até os 45 DAS, as diferenças na TAL foram praticamente inexistentes, justificado pelo pouco período de tempo do início da diferenciação dos RH. A partir dos 52 aos 59 DAS, as diferenças passam a ser maiores. Aos 59 DAS observou-se queda na TAL para ambos os híbridos, independentemente do RH. Contudo, para os tratamentos avaliados neste estudo não foi verificado uma queda acentuada na TAL, como observado por Garcia et al. (2008), relatando que a queda abrupta da TAL se deve ao surgimento de tecidos e estruturas não assimilatórias, espigas e grãos, além do auto sombreamento, secamento e queda de folhas com a idade da planta.



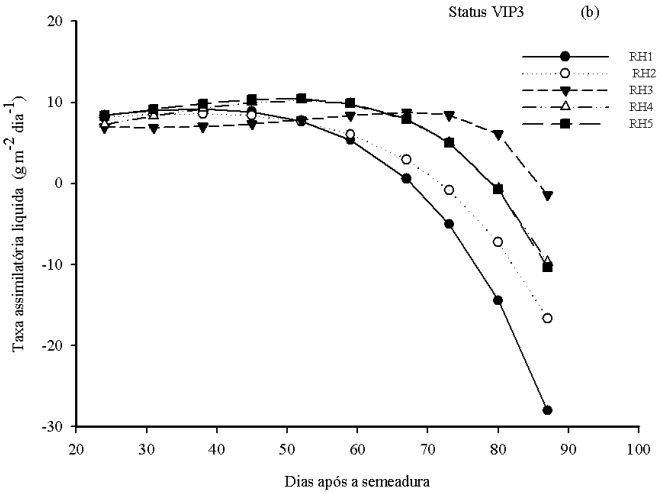
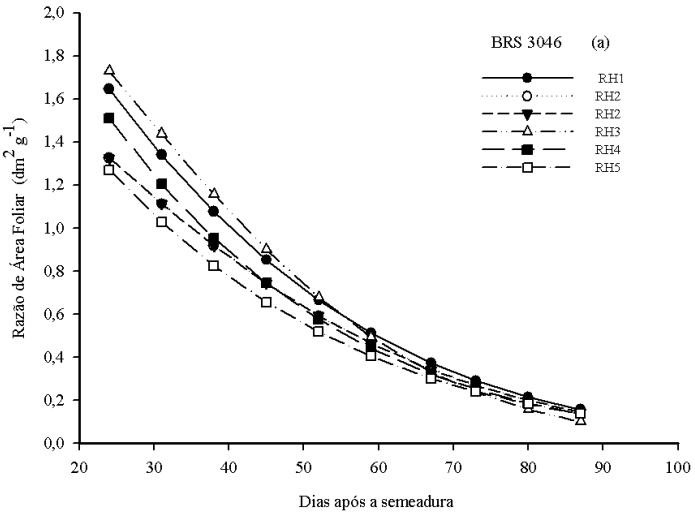



**Figura 8.** Taxa assimilatória líquido (TAL) para os híbridos de milho BRS 3046 (a) e Status VIP3 (b) em função de diferentes regimes hídricos (RH1=40, RH2=60, RH3=80, RH4=100 e RH5=120% da ETc). Teresina, PI, 2019.

Nota-se que a partir dos 67 DAS até a última avaliação, para todos os RH e para os dois híbridos, houve redução da TAL, justificado pelo surgimento de tecidos e estruturas não assimilatórias (espigas e grãos). Os menores valores de TAL em todos os tratamentos foram observados ao final do período de coleta, apresentando inclusive dados negativos.

A razão da área foliar (RAF) (Figuras 9a e 9b) é um componente morfológico do crescimento da planta, pois expressa a razão entre a área foliar (responsável pela interceptação luminosa) e a massa seca total (resultado da fotossíntese) e representa a área foliar usada pela planta para produzir uma unidade de massa seca (BENINCASA, 1988).



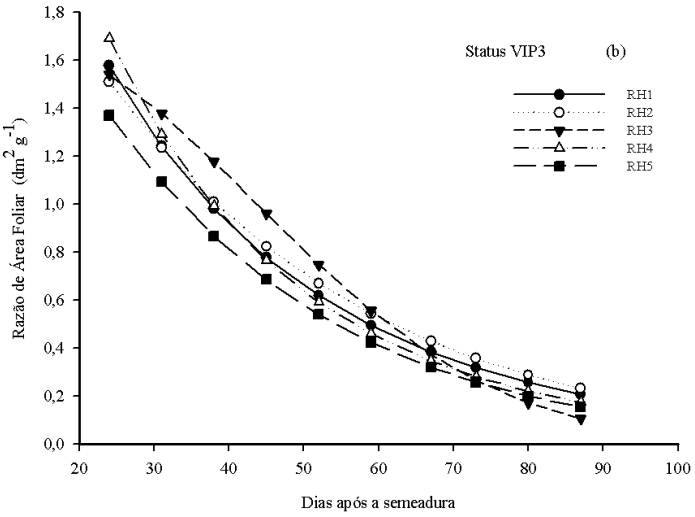



**Figura 9.** Razão de área foliar em plantas de milho dos genótipos BRS 3046 (a) e Status VIP3 (b) submetidas a diferentes regimes hídricos (RH1=40, RH2=60, RH3=80, RH4=100 e RH5=120% da ETc). Teresina, PI, 2019.

De maneira geral, a RAF, que é a área foliar útil para a fotossíntese decresceu com o desenvolvimento das plantas de milho, coincidindo com o relatado por Lacerda et al. (2010); Garcia et al. (2008); Benincasa (1988). Esse comportamento da RAF se justifica, possivelmente, por causa do sombreamento de folhas superiores em folhas inferiores, diminuindo, assim, a taxa fotossintética, além do surgimento de tecidos e estruturas que são drenos altamente competitivos (órgãos reprodutivos) (GARCIA et al., 2008).

Os maiores valores da RAF foram observados aos 24 DAS, para os dois híbridos, evidenciando que, nesse período, a maior parte do material fotossintetizado é convertida em folhas, para maior captação da radiação solar disponível (URCHEI; RODRIGUES; STONE, 2000). Observa-se que os tratamentos RH1, RH3 e RH4 apresentaram os maiores valores de RAF (com valores variando de 1,5 a 1,7 $dm^2$ $g^{-1}$), ficando o tratamento RH5 com valores mais baixos. Esses resultados são diferentes dos obtidos para IAF e MST, pois verificou-se uma inversão, ou seja, o tratamento RH5, que obteve valor mais elevado para esses parâmetros, apresentou decréscimos na RAF, ocorrendo o contrário com os tratamentos RH1 e RH3.

Essa redução da RAF no tratamento RH5 pode ter sido decorrente da maior eficiência das folhas em converter energia luminosa e $CO_2$ em matéria seca, já que a RAF é a área foliar útil para fotossíntese, sendo o quociente entre a AF e a MST, ou seja, a AF utilizada pela planta para produzir um grama de matéria seca (URCHEI; RODRIGUES; STONE, 2000).

Em relação aos híbridos é interessante ressaltar que, apesar de apresentar menor acúmulo de matéria seca e menor IAF, o BRS 3046 apresentou os maiores valores de RAF com aplicação dos RH equivalente a reposição de 80% ETc (1,7 $dm^2$ $g^{-1}$) e 40% ETc (1,6 $dm^2$ $g^{-1}$) que os demais RH, talvez como estímulo da planta sob estresse hídrico em converter a maior parte dos assimilados em folhas, visando elevar a captação da radiação solar (GARCIA et al., 2008). Por sua vez, para o híbrido VIP3 os maiores valores de RAF (1,7 $dm^2$ $g^{-1}$) foram observados com a reposição de 100% da ETc.

## 4. CONCLUSÕES

O aumento na disponibilidade de água no solo induz incremento no acúmulo de matéria seca total e no índice de área foliar e taxa de crescimento da cultura nos híbridos de milho BRS 3046 e Status VIP3.

O híbrido de milho Status VIP3 apresenta maior acúmulo de matéria seca e os maiores valores de índice de área foliar e taxa de crescimento da cultura em relação ao híbrido BRS 3046.

## 5. REFERÊNCIAS


ALMEIDA, A. C. S. et al. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada,** v.11, n.3, p. 1448-1457, 2017.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998.

AVILEZ, A. M. A. et al. Necessidade hídrica e de irrigação do milho em função da data de semeadura no município de Irecê-Bahia. In: XXIX CONGRSSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM e IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SALINIDADE, INOVAGRE Meeting Virtual, 2020.

AGUIAR NETTO, A. O.; RODRIGUES, J. D.; PINHO, S.Z. Análise de crescimento na cultura da batata submetida a diferentes lâminas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.5, p.901-907, 2000.

ANTONIAZZI, N.; DESCHAMPS, C. Análise de crescimento de duas cultivares de cevada após tratamentos com elicitores e fungicidas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1065-1071, 2006.

BANZATTO, D.A.; KRONKA, S.N. **Experimentação Agrícola**. Jaboticabal: FUNEP, 1989. 247p.

BASTOS, E. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. **Boletim agrometeorológico do ano de 2018 para o Município de Teresina, PI**. Embrapa Meio-Norte: Teresina, 2019. 34p (Embrapa Meio-Norte, Documentos, 266).

BENICASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. 2. ed. Jaboticabal: Funep, 1988. 42p.

BERGAMASCHI, H. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.2, p.243-249, 2006.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p.

BRITO, M. E. B. et al. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Biosci. J**., v. 29, n. 5, p. 1244-1254, 2013.

CARDOSO, M. J. et al. **Rendimento de grãos, componentes de rendimento e eficiência de uso da água de híbridos de milho em condições climáticas contrastantes**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2012. 23p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 103).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

FALQUETO, A. R. et al. Partição de assimilados em cultivares de arroz diferindo no potencial de produtividade de grãos. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 3, p. 453-461, 2009.

FUMIS, T. F.; PEDRAS, J. F.; SAMPAIO, A. C. Análise de crescimento em cultivares de trigos (Triticum aestivum L.) submetidos a déficits hídricos, na região de Bauru-SP. **Irriga**, v. 2, n. 3, p. 101-114, 1997.

GARCIA, A. et al. Análise de crescimento de uma cultura de milho submetida a diferentes regimes hídricos. **Revista Nucleus**, v. 5. n. 1, p. 239-251, 2008.

GUISCEM, J. M. et al. Crescimento e Desenvolvimento de Cultivares de Milho (zea mays L.) no Plantio de" Safrinha". In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, Florianópolis, SC, 2002.

KRAMER, P. J. Drought etress and the origin of adaptations. **In:** TURNER. N.C., KRAMER, P. J. Adaptations of plants to water and high temperature stress. New York: John Willey, p. 7-20, 1980.

KÜSTER, M. C. T. et al. Efeito do déficit hídrico no crescimento inicial de quatro espécies agrícolas. **Caderno de Pesquisa**, v. 32, n. 1, 2020.

LACERDA, C. F. et al. Análise de crescimento de milho e feijão sob diferentes condições de sombreamento. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.5, n. 1, p.18-24, 2010.

LUCENA, C. A. A. et al. Development of xylan and xylan/gelatin biofilms for production of biodegradable packages. **Polímeros**, v. 27, p. 35-41, 2017.

MACHADO R. W. B. et al. Inoculação foliar de plantas de milho com Bacillus subtilis e Azospirillum brasilense. **Enciclopédia Biosfera**, v. 17, n. 34, p. 289-298, 2020.

MAGALHÃES, P. C. et al. Caracterização ecofisiológica de linhagens de milho submetidas à baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento. **Brazilian Journal of Maize and Sorghum**, v. 8, n. 03, 2009.

MELO, F. B.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; PESSOA, B. L. O. **Levantamento, zoneamento e mapeamento pedológico detalhado da área experimental da Embrapa Meio-Norte em Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2014. 47 p. (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-866X; 231).

MILTHORPE, F.L.; MOORBY, J. **An introduction to crop physiology**. Cambridge, Grã-Bretanha: Cambridge University, 1974. 201p.

PEREIRA, M. R. R. et al. Análise de crescimento em clones de eucalipto submetidos a estresse hídrico. **Irriga**, v.15, n.1, p.98-110, 2010.

PORTES, T.A.; CASTRO JR., L.G. Análise de crescimento de plantas: um programa computacional auxiliar. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**. Campinas, v.3, n.1, p.53-56, 1991.

SANTOS, V. M. et al. Índices fisiológicos de plântulas de milho (Zea mays L.) sob ação de bioestimulantes. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 4, N.3: pp. 232-239, 2013.

SILVA, L. Safrinha o solo, lucro à vista na mão. **O Brasil agrícola**. A Granja. Porto Alegre – RS, N 723, p16-19, 2009.

SOARES, M. A. et al. Fenologia, componentes de produção e rendimento agrícola do milho sob lâminas de irrigação na região de Rio Largo, Alagoas. **IRRIGA**, v. 25, n. 2, p. 279-295, 2020.

SOUZA, T. C. et al. Morphophysiology, morphoanatomy, and grain yield under field conditions for two maize hybrids with contrasting response to drought stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 11, p. 3201-3211, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal** [recurso eletrônico] /tradução: MASTROBERTI et al.]; revisão técnica: oliveira, P. L. 6. ed. –Porto Alegre: Artmed, 2017.

URCHEI, M. A.; RODRIGUES, J. D.; STONE, L. F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.3, p.497-506, 2000.

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. **Journal of sensors**, v. 2017, p. 1-18, 2017.

ZANETTI, W. A. L.; COSMO, B. M. N.; GALERIANI, T. M. Irrigação na cultura do milho: qual sistema usar? In: **VIII JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica**, 2019.

ZUCARELI, C. et al. Índices biométricos e fisiológicos em feijoeiro sob diferentes doses de adubação fosfatada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 1, p. 1313-1323, 2010.

# CAPÍTULO II

## PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA EM HÍBRIDOS DE MILHO SUBMETIDOS A DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS


### RESUMO

O déficit hídrico é um dos principais fatores limitantes da produtividade de grãos de milho. O objetivo deste trabalho foi avaliar os componentes de produção, a produtividade de grãos e a eficiência do uso da água de dois genótipos de milho: o BRS 3046 (híbrido triplo convencional) e Status VIP3 (híbrido simples transgênico), em função de diferentes regimes hídricos. O experimento foi conduzido, sob irrigação por aspersão convencional, na área experimental da Embrapa Meio-Norte, no período de 05/08 a 12/11/2019. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, em esquema de parcela subdividida, sendo as parcelas representadas por cinco níveis de água, com base na evapotranspiração da cultura (ETc): 40; 60; 80;100 e 120% ETc e as subparcelas representadas pelos híbridos de milho, com quatro repetições. A produtividade de grãos tende a aumentar com maiores reposições hídricas, independentemente do híbrido. Os componentes de produção e a eficiência de uso da água apresentam incrementos positivos com uma tendência linear crescente à aplicação dos regimes hídricos. O híbrido Status VIP3 apresenta maior produtividade de grãos (10.898,3 kg $ha^{-1}$) e maior eficiência de uso da água (1,8 kg $m^{-3}$), com a aplicação de 618,6 mm (120% ETc).


**Palavras chaves:** Irrigação; cultivar; Componentes de produção.

# CHAPTER II

## GRAIN YIELD AND WATER USE EFFICIENCY IN CORN HYBRIDS SUBMITTED TO DIFFERENT WATER REGIMES


### ABSTRACT

Water deficit is one of the main limiting factors of corn grain yield. The objective of this work was to evaluate the production components, grain yield and water use efficiency of two corn cultivars, BRS 3046 (triple conventional hybrid) and Status VIP3 3 (single transgenic hybrid) submitted to different water regimes. The experiment was carried out, under conventional sprinkler irrigation system, in the experimental area of Embrapa Middle North, from 05/08/2019 to 12/11/2019. The experimental design adopted was in randomized blocks in a split-plot design, with the plots being represented by five water levels, based on crop evapotranspiration (ETc): 40; 60; 80;100 and 120% ETc and the subplots represented by the corn hybrids, with four replications. Grain yield tends to increase with greater water replacement, regardless of the hybrid. The production components and water use efficiency show positive increments with an increasing linear trend to the application of water regimes. The Status VIP3 hybrid has higher grain yield (10,898.3 kg $ha^{-1}$) and greater water use efficiency (1.8 kg $m^{-3}$), with the application of 618.6 mm (120% ETc).


**Keywords:** Irrigation; grow crops; Production components.

## 1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.), um cereal da família Poaceae, é o terceiro cereal mais importante do mundo, depois do trigo e do arroz. Tem sido amplamente utilizado na alimentação humana e animal e é uma importante fonte de matéria prima para a indústria, principalmente em função da quantidade e da natureza das reservas energéticas acumuladas nos grãos (BRITO et el., 2013). No Brasil, o milho apresenta posição de destaque, com estimativa de área plantada em cerca de 20.943,7 milhões de hectares, com uma produtividade média em torno de 5.391 t $ha^{-1}$ (CONAB, 2022); porém, tem enorme contraste de produtividade entre as regiões do país, em decorrência das diferentes condições climáticas e de cultivos às quais a cultura é submetida (SOUZA et al., 2011).

Entre os fatores que com maior frequência e intensidade afetam o rendimento da cultura do milho destaca-se a deficiência hídrica (DANTAS JÚNIOR et al., 2016). O estresse induzido pela deficiência hídrica é considerado o principal obstáculo que limita o crescimento e a produtividade do milho mais do que quaisquer outros fatores ambientais (HAO et al., 2016), principalmente nas fases de floração e enchimento de espiga. Além disso, mesmo em anos em que o clima é favorável ao cultivo, à ocorrência de estresse hídrico no período crítico causa decréscimo no rendimento da cultura (SOUZA et al., 2015).

A sensibilidade do potencial de produção do milho está associada diretamente à quantidade de água disponível no ciclo produtivo da cultura. Para a cultura, os períodos considerados mais sensíveis ao déficit hídrico correspondem ao pendoamento e o enchimento de grãos, podendo reduzir a produção mesmo em anos climaticamente favoráveis (BERGAMASCHI et al., 2004; BERGAMASCHI et al., 2006). Nesse período, a transpiração da cultura é alta devido à máxima área foliar e aos processos de formação do zigoto e enchimento de grãos (ALMEIDA et al., 2017). Além disso, os processos produtivos desse estádio fenológico são muito rápidos; portanto, déficit hídrico, mesmo que por um curto período de tempo durante esses estádios, pode reduzir a produtividade da cultura drasticamente (SOUZA et al., 2011).

Nesse sentido, o uso da tecnologia da irrigação apresenta-se como uma alternativa que pode garantir adequada disponibilidade hídrica no solo e a obtenção do máximo potencial produtivo dessa cultura; sobretudo, em regiões com notória escassez hídrica, já que a água é um importante fator que limita a produtividade da cultura. Diante disso, vários trabalhos têm sido executados em diversas regiões do Brasil, visando definir lâminas que otimizem a produtividade de grãos de milho nas diversas regiões produtora do país (COSTA et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2015; RIBEIRO et al., 2015; MELO et al., 2018a; SOARES et al., 2020).

Os estudos indicam que há respostas distintas do milho à irrigação de acordo com a cultivar e com as condições de solo e clima, dessa forma, há necessidade de estudo para avaliar a resposta à irrigação das cultivares modernas de milho, assim, o aprofundamento do estudo de diferentes lâminas de irrigação merece importante destaque por se tratar de uma maneira bastante prática para estimar a quantidade de água que a cultura necessita para crescer e produzir numa dada região (AZEVEDO; BEZERRA, 2008). De tal modo, o manejo adequado, bem como a determinação da lâmina de água a ser aplicada, sobretudo nas fases críticas da cultura, como pendoamento, floração e enchimento de grãos, são fatores importantes a serem considerados, pois, podem ocorrer reduções de produtividades, devido à falta ou excesso de água (MELO et al., 2018a).

Dessa forma, objetivou-se com este estudo, avaliar os componentes de produção e a produtividade de grãos de cultivares de milho (BRS 3046 – híbrido triplo convencional e Status VIP3 – híbrido simples transgênico) em função de diferentes regimes hídricos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de campo, na área experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina, PI (05°05’ S; 42°48’ W e 74,4 m), entre os meses de agosto a novembro de 2019, devido ao fato de nesta época não haver registros históricos de precipitação que venham a comprometer a imposição dos regimes hídricos desejados. O clima da região segundo a classificação climática de Thornthwaite e Mather (1955) é C1sA’a’, caracterizado como subúmido seco,

megatérmico, com excedente hídrico moderado no verão e uma concentração de 32,2% da evapotranspiração potencial no trimestre setembro, outubro e novembro. A temperatura média anual é de 28,5°C, com precipitação média anual de 1.318 mm (BASTOS; ANDRADE JÚNIOR, 2019).

As variáveis climáticas foram monitoradas durante todo o experimento. Os dados foram obtidos de uma estação meteorológica automática da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022) localizada próxima à área de estudo. Os dados são referentes aos meses de agosto até novembro de 2019, período que abrange a condução do experimento. A temperatura média do ar foi de 29,5°C, com média das máximas de 37°C e das mínimas de 22°C e precipitação de 18,6 mm (Figura 1).

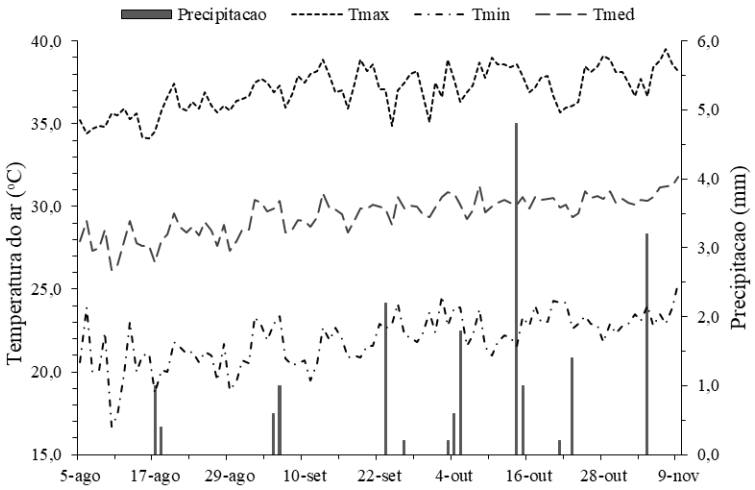



**Figura 1.** Valores de temperatura do ar e precipitação referentes ao período de 5 de agosto a 9 de novembro de 2019, obtidas da estação automática do INMET, situada na Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (MELO; ANDRADE JÚNIOR; PESSOA, 2014), textura arenosa (areia= 876,5 g $kg^{-1}$, silte=37,5 g $kg^{-1}$ e argila 86 g $kg^{-1}$), conteúdo de água no solo na capacidade de campo de 21,7% (em volume), ponto de murcha permanente de 5,3% e densidade do solo de 1,65 g $cm^{-3}$. O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens. A adubação mineral de semeadura constou da aplicação de 75 kg de N $ha^{-1}$, 80 kg de $P_2O_5$ $ha^{-1}$, 35 kg de $K_2O$ $ha^{-1}$ e 3 kg de Zn $ha^{-1}$, seguindo as recomendações de Cardoso et al. (2012) para a cultura do milho. Por ocasião da 6ª folha completamente emergida foi efetuada a adubação de cobertura, com aplicação de 75 kg de N $ha^{-1}$ e 35 kg de $K_2O$

$ha^{-1}$. Nas adubações utilizou-se o sulfato de amônio, o superfosfato triplo, o cloreto de potássio e o sulfato de zinco como fontes de N, $P_2O_5$, $K_2O$ e Zn, respectivamente.

O experimento foi conduzido sob irrigação por aspersão convencional fixa, com aspersores espaçados em 12 x 12 m. O turno de irrigação foi fixo, com irrigações realizadas as 2as, 4as e 6as feiras, repondo-se a ETc do período anterior. Avaliou-se a aplicação de cinco regimes hídricos (RH), determinados a partir da evapotranspiração da cultura (ETc) (40, 60, 80, 100 e 120% ETc) em dois híbridos de milho (BRS 3046 – híbrido triplo convencional e Status VIP3 (VIP3) – híbrido simples transgênico). Os RH distintos foram aplicados utilizando-se tempos de irrigação distintos. Utilizou-se o método de Penman Monteith para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) e valores de coeficientes de cultura (Kc) da FAO (ALLEN et al., 1998). O cálculo da ETc foi estimado pelo produto entre ETo e o Kc.

Para a aplicação dos RH adotou-se o seguinte manejo de irrigação: da semeadura até os 36 dias após a semeadura (DAS) a irrigação foi plena para ambos os tratamentos (fase de desenvolvimento vegetativo); a partir dos 37 DAS até a maturidade fisiológica dos grãos houve aplicação dos RH diferenciados através da reposição de 40, 60, 80, 100 e 120% da ETc. Na condução do experimento, determinaram-se os valores médios das lâminas de irrigação aplicadas por parcela, através de coletores instalados dentro das parcelas, cujo conteúdo era medido por meio de uma proveta graduada em milímetros após cada irrigação.

Para o monitoramento do conteúdo de água no solo (%, volume) foram instalados três tubos de acesso de PVC em cada regime hídrico, com 0,7 m de profundidade, dispostos entre as fileiras centrais. Utilizou-se uma sonda de capacitância (FDR) modelo Diviner 2000® da Sentek Pty Ltda, Austrália. As leituras foram realizadas diariamente, sempre antes e aproximadamente 24 horas após as irrigações. O conteúdo de água no solo em cada camada (0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 m) dos RH, foi calculado pela média dos valores de umidade medidos durante o ciclo do milho.

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, com os tratamentos arranjados em parcelas subdivididas (RH, nas parcelas, e os híbridos de milho, nas subparcelas), com quatro repetições. A semeadura foi efetuada em fileiras espaçadas de 0,5 m, com quatro plantas por metro (8 plantas $m^{-2}$). A subparcela era composta por seis fileiras de 6 m com as duas fileiras centrais ($6m^2$)

usadas para medida da produtividade final de grãos. A semeadura foi realizada com semeadora tracionada por trator, no dia 5 de agosto de 2019.

A colheita para todos os RH foi realizada no dia 12 de novembro de 2019 (grãos secos) de forma manual aos 99 DAS. Antes da colheita, determinou-se o número de espigas por metro quadrado (NE $m^{-2}$). No momento da colheita das espigas secas, determinou-se o peso total de grãos na área útil (PTG) da parcela e o peso de cem grãos (PCG). Para a determinação do peso total de grãos da área útil, colheram-se todas as espigas de uma área de 6m² em cada subparcela, nas linhas centrais das subparcelas. Em seguida as espigas colhidas foram trilhadas em uma trilhadeira mecânica, para separação dos grãos. A produtividade de grãos secos (PG) foi determinada pela extrapolação do peso PTGC para kg $ha^{-1}$ após a correção da umidade dos grãos para 13% conforme equação 1:

$$PTGC = \frac{100 - TU\%}{87} * PGNC \qquad eq.1$$

Onde: PTGC corresponde à produção total de grãos corrigida; PGNC a produção de grãos não corrigida; TU% ao teor de umidade dos grãos determinada pelo equipamento Digital Gehaka G650i.

Determinou-se o índice de grão (IG) pela relação entre o peso total de grãos e o peso total das espigas secas. A eficiência de uso da água (EUA em kg $ha^{-1}$ $mm^{-1}$) foi calculada relacionando a produtividade de grãos (PG) e a lâmina de água aplicada, utilizando a seguinte expressão (ALMEIDA et al., 2017):

$$EUA = \frac{PG}{LI} \qquad eq.2$$

em que, PG = produtividade de grãos (kg $ha^{-1}$) e LI = lâmina de irrigação acumulada (mm).

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F, ao nível de 5% de significância. Havendo significância, os efeitos das lâminas foram submetidos à análise de regressão, em que foram testados modelos lineares e quadráticos. Na análise de regressão as equações que melhor se ajustaram aos dados foram escolhidas com base na significância dos coeficientes de regressão a 1

e 5% de probabilidade pelo teste F e no maior coeficiente de determinação ($R^2$). A comparação de médias foi realizada usando-se o teste de Tukey a 5% de significância. Todas as análises (ANOVA e regressão) foram realizadas com auxílio do software R utilizando o pacote ExpDes.pt do software R (FERREIRA et al., 2014).

.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Lâminas de irrigação e umidade do solo

Do início da irrigação até a aplicação dos regimes hídricos diferenciados foram aplicadas lâminas de irrigação de 184,0, 184,6, 186,4, 182,1 e 179,0 mm nos tratamentos com reposição de 40, 60, 80, 100 e 120% ETc, em ambos os híbridos (BRS 3046 e Status VIP3), confirmando que os regimes hídricos (RH) receberam lâminas de irrigação uniforme em todos os tratamentos durante o período de estabelecimento da cultura (Figura 2).

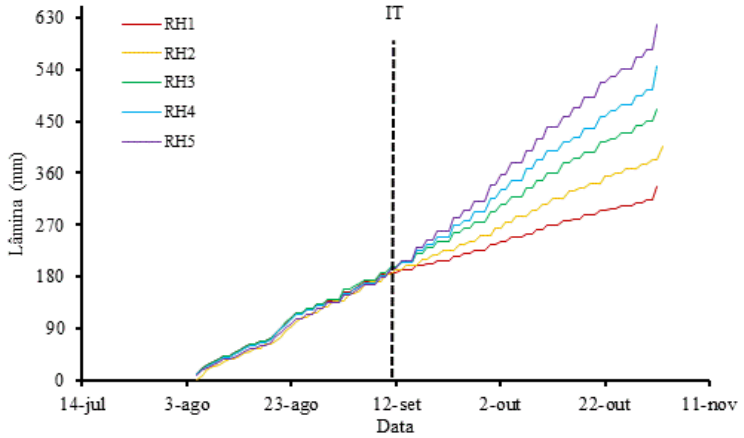



**Figura 2.** Lâminas de irrigação acumuladas durante o ciclo do milho em resposta aos regimes hídricos aplicados. Teresina, PI, 2019.

Durante a aplicação dos RH diferenciados (37 aos 88 DAS), nos tratamentos com reposição de 40, 60, 80, 100 e 120% ETc, foram aplicadas lâminas de 152; 222,2; 284,9; 363,9 e 438,7 mm, respectivamente. Esses resultados demonstram que durante o período de imposição dos RH diferenciados as lâminas de irrigação deficitária (40, 60 e 80% ETc) corresponderam a 41,7; 61 e 78,2% da irrigação plena

(100% ETc), respectivamente, para ambos os híbridos, confirmando a diferenciação das lâminas de irrigação dentro dos RH avaliados.

No total, durante todo o ciclo da cultura, os tratamentos com reposição de 40, 60, 80, 100 e 120% da ETc receberam lâminas de 336; 406,8;471,3; 546 e 618,6 mm, respectivamente. Estudos indicam que, dependendo das condições climáticas, época de semeadura, cultivar e manejo da cultura a necessidade total de água varia entre 500 e 800 mm/ciclo para que a cultura do milho obtenha o máximo rendimento de grãos (DOORENBOS; KASSAN, 1994; ZANETTI et al., 2019; AVILEZ et al., 2020). Apenas os tratamentos com reposição hídrica de 100 e 120% da ETc apresentaram lâminas totais dentro dos limites recomendados para a cultura do milho.

A variação média do teor de água no solo até 0,4 m de profundidade é apresentada da Figura 3. Os resultados demonstram que houve um gradiente decrescente do teor de água no solo, havendo maior disponibilidade de água no solo nos tratamentos com aplicação da maior lâmina de irrigação (Figura 3a). Observou-se maior variabilidade nas camadas de 0,1 e 0,2 m de profundidade. Para a profundidade total avaliada (0,0-0,4 m), os valores médios oscilaram de 7,4% (RH=60% ETc) a 17,0% (RH=120%ETc), resultando em variação média na disponibilidade de água no solo de 47,0% (RH=60%ETc) a 108,1% (RH=120%ETc) (Figura 2b). Por sua vez, o tratamento intermediário (80% ETc), a disponibilidade de água no solo permaneceu próximo aos limites de água disponível para cultura do milho (9,1%), que segundo Doorenbos e Kassam (1994), é de 50%.

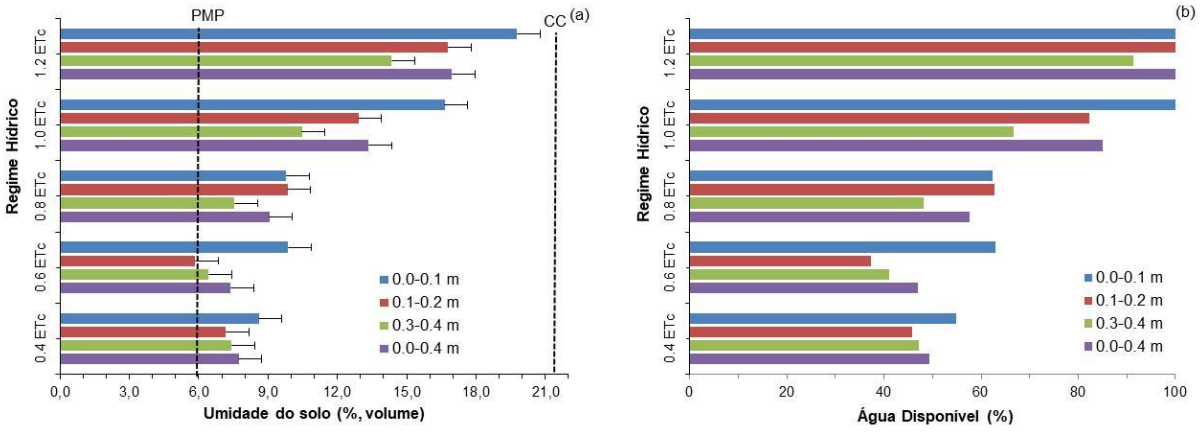



**Figura 3.** Umidade (A) e água disponível (B) no solo, nas profundidades de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,3-0,4 m e 0,0-0,4 m, em resposta aos regimes hídricos (RH-ETc) aplicados no ensaio. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI, 2019.

Observando a Figura 3b, ao aplicar as lâminas correspondentes as frações de 120 e 100% ETc, os níveis de água disponível mantiveram-se acima de 66% em todo o perfil do solo (0,0 m a 0,4 m). Já as lâminas correspondentes as frações 40 e 60% da ETc apresentaram comportamentos semelhantes entre si em todo o perfil, estabelecendo-se entre 37,3 e 62,9% da água disponível, considerando a profundidade total avaliada (0,0-0,4 m) os níveis de água disponível mantiveram-se abaixo da umidade crítica e acima do ponto de murcha permanente, constatando-se um maior déficit hídrico nestes tratamentos.

O déficit de água no solo em geral é responsável por desencadear uma variedade de respostas fisiológicas nas plantas, que se prolongadas ao longo do tempo, podem afetar negativamente o crescimento e a produtividade (OSAKABE et al., 2014). No caso do milho, a ocorrência de estresse por déficit hídrico causa muitos danos na cultura, como a redução da produtividade, altura das plantas e diâmetro dos colmos, além da redução na fotossíntese causada pelo decréscimo na expansão celular e pelos danos causados ao aparato fotossintético (GUIMARÃES; ROCHA; PATERNIAN, 2019), que resultaram em redução na produtividade da cultura.

## 3.2 Produção e componentes de produção

A análise de variância mostrou efeito significativo da interação lâmina de irrigação (L) x híbrido (H) para as características índice de grão (IG), eficiência do uso de água (EUA) e produtividade de grãos (PG). Para as características número de espiga por metro quadrado (NE) e massa de cem grãos (MCG) houve efeito isolado dos fatores L e H (Tabela 1). Dessa forma, realizaram-se os desdobramentos dos fatores L e H para as características com efeito da interação. Para as características NE e MCG, que não apresentaram interação significativa, os efeitos dos fatores H e L foram estudados isoladamente (Tabela 1).

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância para índice de grão (IG), número de espigas por m² (NE), massa de cem grãos (MCG), produtividade de grãos (PG) e eficiência de uso da água (EUA) para híbridos de milho (*Zea mays L*.) em função das lâminas de irrigação aplicadas e seu desdobramento. Teresina, PI, 2019.

| FV | GL | IG | NE | MCG | EUA | PG |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bloco | 3 | 20,285$^{ns}$ | 2,375$^{ns}$ | 5,169$^{ns}$ | 0,115$^{ns}$ | 2691407* |
| Lâmina(L) | 4 | 230,422*** | 10,186** | 71,513*** | 1,612*** | 77215945*** |
| Erro a | 12 | 16,378 | 1,193 | 3,031 | 0,051 | 568457 |
| Híbrido (H) | 1 | 37,210** | 6,626* | 94,618*** | 0,807*** | 8960440*** |
| L x H | 4 | 87,535*** | 0,3012$^{ns}$ | 2,696$^{ns}$ | 0,148* | 6787252*** |
| Erro b | 15 | 2,474 | 0,922 | 4,251 | 0,047 | 257015 |
| CV (a)% | --- | 5,14 | 17,83 | 6,95 | 22,42 | 15,54 |
| CV (b)% | --- | 1,9 | 15,67 | 8,23 | 21,62 | 10,45 |

[1]ns: Não (p>0.5); *: Significativo (0.5≥p>0.010); **: Significativo (0.01≥p>0.001); ***: Significativo (p≤0.001) pelo teste F.

O híbrido Status VIP3 apresentou o maior número de espigas por m² (6,5 espigas $m^{-2}$) em relação ao BRS 3046 (5,7 espigas $m^{-2}$) (Figura 4a). O híbrido transgênico também apresentou (p<0,05) os maiores valores de massa de cem grãos (26,5 g) em relação ao híbrido convencional (23,4 g) (Figura 4b). Resultados semelhantes foram obtidos por Soares et al. (2010), que obtiveram diferença estatisticamente significativa no peso médio de mil grãos, entre dois híbridos de milho (BRS 3150 e BM 1201) cultivados no município de Jaguari, RS, na safra 2005/2006. Estas diferenças entre híbridos segundo Hallauer e Sears (1973) é devido à variabilidade genética das cultivares.

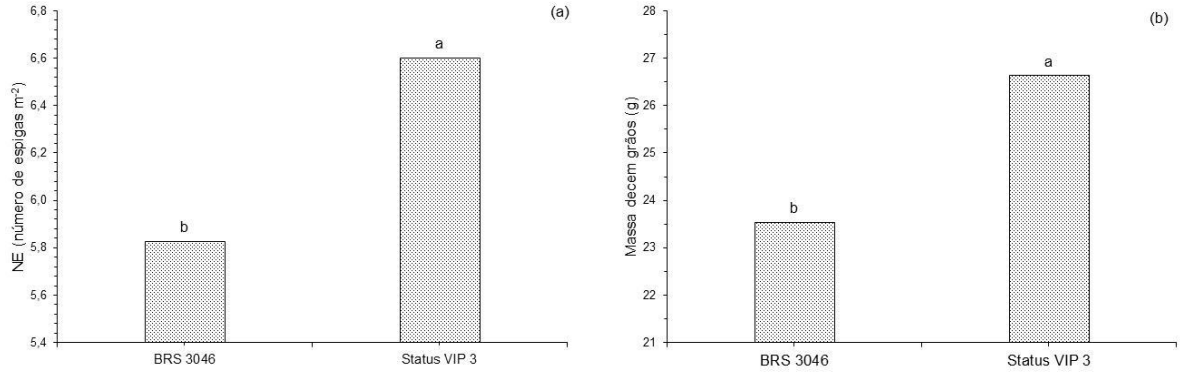



**Figura 4.** Valores médios de número de espigas por área (a) e massa de 100 grãos (b) em função dos híbridos de milho em estudo, Teresina, PI, 2019. *Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p>0,05).

As lâminas de irrigação, independente dos híbridos avaliados, proporcionaram ajuste linear para as variáveis NE e MCG (Figuras 5a e 5b). Os maiores NE e MCG foram encontrados na lâmina de 120% da ETc, que representa uma adição de água de 618,6 mm durante o ciclo da cultura. Os resultados para MCG corroboram os

observados por Melo et al. (2018a), que avaliando o desenvolvimento e produtividade da cultivar BRS Gorutuba sob diferentes lâminas de irrigação e adubação orgânica, observaram que as maiores reposições hídricas possibilitaram maior peso médio de massa de cem grãos.

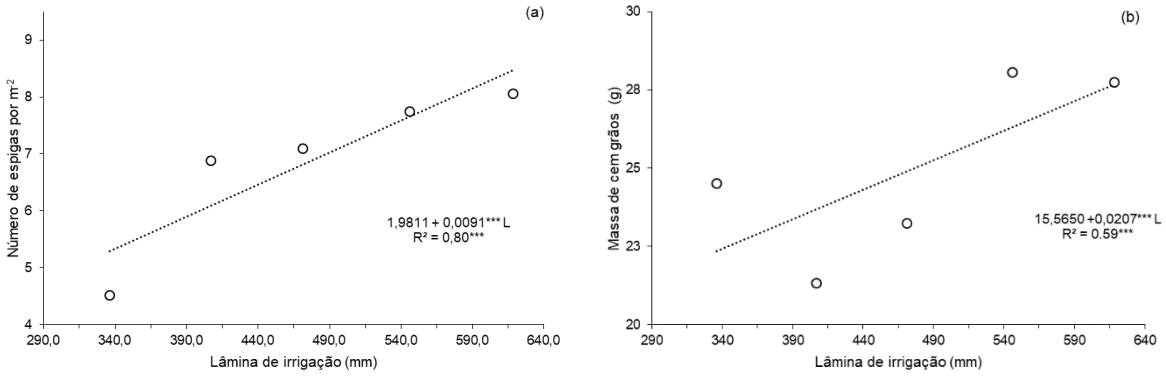



**Figura 5.** Número de espigas por m² (a) e massa de cem grãos (b) em híbridos de milho submetidos a diferentes lâminas de irrigação nas condições de clima e solo de Teresina, PI, 2019. Coeficiente da equação significativo a ***: significativo (P<=0.001) pelo teste F.

O aumento da disponibilidade de água no solo favorece o desenvolvimento radicular, permitindo que as plantas realizem os processos metabólicos necessários ao seu crescimento (SOUZA et al., 2017), resultando em aumento nos componentes de produção da cultura. Na cultura do milho, a ocorrência de déficit hídrico, principalmente nas fases de floração e enchimento de grãos, é responsável pela redução da massa de grãos por espiga, que é componente determinante da produtividade de grãos (SOARES et al., 2020).

Analisando-se o índice de grãos dos híbridos (Figura 6), por meio de equações de regressão, verificou-se resposta linear crescente, com incremento de 0,01705% para cada milímetro de água aplicado no híbrido Status VIP3. Por outro lado, o híbrido BRS 3046 apresentou resposta quadrática ao aumento na lâmina de irrigação com valor médio estimado de 84,2% e ponto crítico de 580,3 mm. Pode-se inferir que, sob melhores condições de cultivo, maior será a probabilidade da planta expressar seu potencial genético (BRITO et al., 2013).

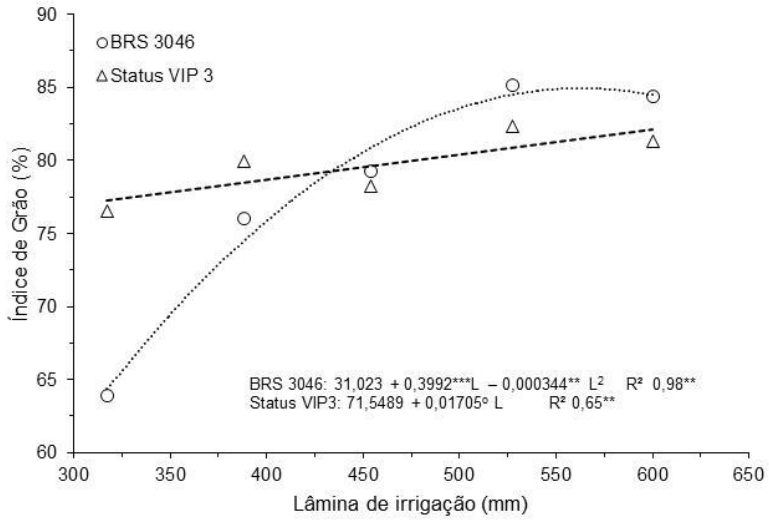



**Figura 6.** Índice de grãos nos híbridos de milho BRS 3046 e Status VIP3 em função das lâminas de irrigação aplicadas. Teresina, PI, 2019. o: significativo (0.10>=P>0.05); *: significativo (0.05>=P>0.01); **: significativo (0.01>=P>0.001); ***: significativo (P<=0.001).

Em relação à produtividade de grãos, observa-se que a maior lâmina de irrigação (618,6 mm) promoveu incrementos significativos na produtividade, da ordem de 7.653,8 e 10.898,3 kg $ha^{-1}$ (Tabela 2, Figura 7) para os híbridos BRS 3046 e VIP3, respectivamente. O híbrido transgênico superou a média do convencional em 29,8%. Na mesma região, Cardoso et al. (2014) aplicando uma lâmina de 620 mm verificou que a produtividade de milho híbrido simples transgênico (11.210 kg $ha^{-1}$) foi em média 6,4% superior que às plantas de milho híbrido triplo transgênico (10.494 kg $ha^{-1}$). Cardoso et al. (2016), avaliando o comportamento produtivo de híbridos de milho transgênico e convencional no Meio-Norte Brasileiro em regime de sequeiro, constataram que os transgênicos produzem mais grãos em relação aos convencionais, o que demonstra o potencial produtivo desses híbridos mesmo em condição de sequeiro.

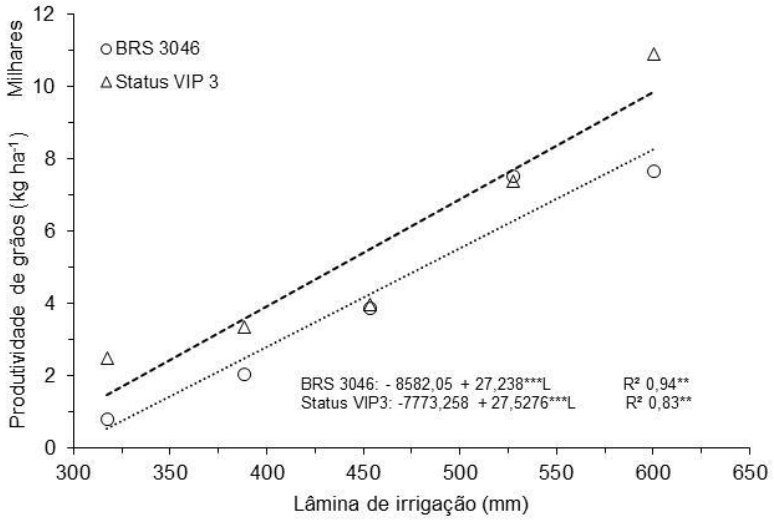



**Figura 7**. Produtividade média de grãos de híbridos de milho em função das lâminas de irrigação. Teresina, PI, 2019. *: significativo (0.05>=P>0.01); **: significativo (0.01>=P>0.001); ***: significativo (P<=0.001).

Contudo, verificou-se nas condições avaliadas que a relação entre a produtividade de grãos dos híbridos de milho em função da lâmina de irrigação foi linear (Figura 7). Tal constatação significa que os híbridos ainda poderiam proporcionar maiores valores de produtividade com o aumento da lâmina aplicada. Portanto, não sendo possível identificar a lâmina de irrigação ótima, capaz de expressar a máxima produtividade de grãos. Esses resultados demonstram a responsividade dos híbridos à disponibilidade hídrica quanto à produtividade de grãos. Porém, o comportamento linear de produtividade de grãos em resposta à aplicação de água deve ser complementado com uma avaliação, que se considerem os custos diretos e indiretos da água aplicada, já que a irrigação só deve ser aplicada em condição de relação benefício-custo positivo (ANDRADE JÚNIOR et al., 2018).

Soares et al. (2020), estudando a resposta da cultura do milho à aplicação de diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio (N), verificaram que o aumento da lâmina de irrigação além do valor considerado ótimo ocasionou um decréscimo da produção, sendo obtida a máxima produtividade (8,4 t $ha^{-1}$) com aplicação da lâmina de 524 mm, enquanto para as condições desse estudo a lâmina de 618,6 mm foi a que proporcionou maior produtividade de grãos, porém, diferente dos autores acima, para tal estudo não definiu-se a lâmina ótima capaz de expressar a máxima produtividade.

Tal situação permite inferir que a época de semeadura, as condições climáticas durante o período de condução do ensaio (temperatura do ar elevada e baixa umidade relativa) e a densidade de plantio (80.000 plantas $ha^{-1}$) podem ter modificado o consumo hídrico da planta. O aumento da temperatura pode alterar a disponibilidade de água no solo, bem como influenciar a taxa de evapotranspiração das plantas (CARDOSO et al., 2012). Em um estudo nas condições do Rio Grande do Sul Bergamaschi et al. (2001), observaram que para uma população de 67 mil plantas $ha^{-1}$, um híbrido precoce de milho necessita de uma média de 650 mm de água em todo o ciclo, valor 4,8% superior a maior lâmina aplicada no presente estudo. O que deixa claro que a alta densidade de planta nesse estudo também influenciou para a ocorrência de uma resposta linear dos híbridos às lâminas de irrigação aplicada.

Vale ressaltar que, o híbrido Status VIP3 apresentou potencial em produzir com baixa quantidade de água (471,3mm) com produtividade de 3.989,5 kg $ha^{-1}$, valor este superior à média de produtividade observada na maioria dos estados do Nordeste, onde dificilmente ultrapassa 1.000 kg $ha^{-1}$ (CONAB, 2020), em áreas de cultivo de sequeiro. Mesmo em condição de baixa disponibilidade de água, porém bem distribuída ao longo do ciclo da cultura pode resultar em boas produtividades de grãos. Os valores de produtividade de grãos do híbrido Status VIP3 encontrados foram 2.510,7; 3.370,6; 3.989,5; 7.368,3 e 10.898,3 kg $ha^{-1}$ para as lâminas de 336; 406,8; 471,3; 546 e 618,6 mm, respectivamente. Por outro lado, os valores de produtividade de grãos do BRS 3046 encontrados foram 801,5; 2.040; 3.861,7; 7.523,4 e 7.653,8 kg $ha^{-1}$ para as mesmas respectivas lâminas de irrigação.

O milho é uma cultura muito exigente em água, entretanto, pode ser cultivada em regiões onde a precipitação média varia de 250 a 5.000 mm anuais (AMARAL et al., 2016). Estudos indicam que a quantidade de água consumida pela planta durante seu ciclo, em condição sem déficit hídrico, varia de 500 a 800 mm (DOORENBOS; KASSAN, 1994; ZANETTI et al., 2019; AVILEZ et al., 2020), sendo o período mais crítico à ocorrência de déficit o que se estende da pré-floração ao início de enchimento de espiga. Porém, a ocorrência de déficit hídrico pode ocasionar danos em todas as fases do milho. No estudo em questão, ficou evidente que quando se reduziu a lâmina média de água de 618,6 mm (RH=120% ETc) para 336 mm (RH=40%ETc) ocorreu uma redução de 89,52 e 76,96% no rendimento dos

híbridos BRS 3046 e Status VIP3, respectivamente, o que demonstra maior sensibilidade do BRS 3046 ao déficit hídrico.

Essa menor produtividade no tratamento 40% ETc foi devido ao elevado déficit hídrico (336 mm), ocorrido ao longo do ciclo da cultura, provocado pela aplicação da menor fração da ETc. Este estudo mostrou que as maiores produtividades de grãos foram alcançadas com as lâminas correspondentes às frações de 120 e 100% ETc. Os altos rendimentos podem ser atribuídos à quantidade apropriada de irrigação aplicada nesses tratamentos.

Almeida et al. (2017), avaliando diferentes estratégias de manejo hídrico na cultura do milho, constataram que a produtividade de grãos variou de acordo com o tratamento, sendo que, nos tratamentos irrigados os valores de produtividade foram duas vezes e meia maiores do que no tratamento em condição de sequeiro. Os autores atribuíram essa menor produtividade no sequeiro ao elevado déficit hídrico (178 mm) ocorrido ao longo do ciclo da cultura, provocado pelos veranicos, corroborando os resultados obtidos nesse estudo em que as reduções de rendimento foram maiores nas combinações com os regimes de irrigação mais baixos (40 e 60% ETc).

Estudos demostram que os maiores rendimentos de grãos de milho têm ocorrido quando o consumo de água está entre 500 e 800 mm bem distribuídos durante todo o ciclo da cultura (SALES et al., 2016; MELO et al., 2018; SOARES et al., 2020). Elmetwalli e Tyler (2020), avaliando o efeito da combinação de quatro níveis de irrigação (1.25; 1.0; 0.8 e 0.6 da ETc) e três doses de N (120, 180 e 240 kg $ha^{-1}$), constataram que o estresse hídrico reduziu fortemente o rendimento de grãos. Os maiores rendimentos 8,41 e 9,42 Mg $ha^{-1}$ foram registrados com a combinação 1.25 ETc e 240 kg N $ha^{-1}$.

O estado de umidade do solo é importante para manter a produtividade de grãos ideal do milho, e a manutenção da umidade ideal do solo é facilitada pela irrigação (KO; PICINNI, 2009). Os resultados do presente estudo demonstram que o fornecimento limitado de água, dependendo de sua severidade, diminui significativamente a produtividade da cultura, visto que o milho é altamente sensível ao estresse hídrico.

Rocha et al. (2021), em estudo visando identificar genótipos com maior rendimento e estabilidade, responsivos à irrigação e tolerantes ao déficit hídrico, verificaram menor rendimento de grãos, com rendimento médio de 5.359,79 kg $ha^{-1}$

no regime de irrigação plena e 4.391,01 kg $ha^{-1}$ no regime de déficit hídrico, ou seja, houve uma redução de quase 20% no rendimento de grãos. Para os autores, a produtividade de grãos é uma característica complexa, muito influenciada pelo meio ambiente, sobretudo o déficit hídrico, envolve praticamente todos os genes da planta e, portanto, depende do resultado da expressão de várias características, tais como floração, altura da planta e massa do grão.

Avaliando o desempenho agronômico de genótipos de milho submetidos ao estresse hídrico, Melo et al. (2018) verificaram que o ambiente sem estresse hídrico proporcionou valores significativamente maiores de produtividade em comparação com o ambiente com estresse hídrico. Soares et al. (2020), avaliaram o efeito de déficit hídrico no rendimento de grãos de milho e relataram que a produtividade de grãos teve incremento proporcional ao incremento nas lâminas de irrigação até 160% ETc**.** Porém, o rendimento começou a reduzir com a lâmina de reposição de 200% ETc. Conforme os autores uma explicação para isso é que o excesso de água acarreta injúrias nas plantas e consequentemente redução da produtividade de grãos.

Verificou-se que a eficiência de uso da água (EUA) aumentou com o incremento da lâmina de água aplicada, sendo a maior EUA obtida com a lâmina correspondente a 120% ETc (Figura 8). Tal comportamento pode ser explicado pelo fato dos híbridos de milho ter maior resposta produtiva ao incremento da lâmina de água, como verificado na Figura 7. Dentre os híbridos, o Status VIP3 foi o que apresentou maior EUA (1,8 kg $m^{-3}$) obtida com a lâmina total de 618,6 mm.

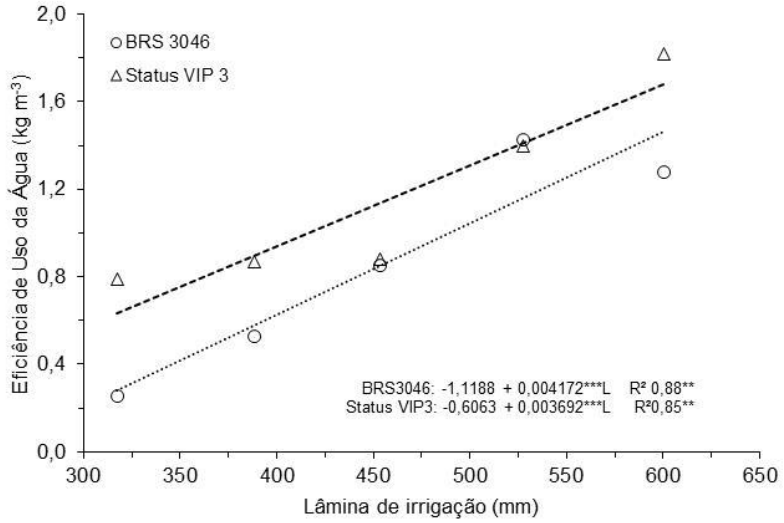



**Figura 8**. Eficiência de uso da água em híbridos de milho em função das lâminas de irrigação. Teresina, PI, 2019. *: significativo (0.05>=P>0.01); **: significativo (0.01>=P>0.001); ***: significativo (P<=0.001).

Brito et al. (2013), estudando a resposta do milho doce (BR 400) a diferentes lâminas de irrigação, verificaram maior EUA em lâminas inferiores (60 a 40%ETc); porém, segundo os autores esses percentuais de irrigação proporcionaram estresses hídricos às plantas que implicaram em menor crescimento e produtividade de grãos. A EUA tende a diminuir com o aumento da lâmina, porque esses fatores são inversamente proporcionais. Porém, os resultados obtidos nesse estudo demonstraram que a EUA acresceu com o aumento da lâmina de irrigação (SOUZA et al., 2016), para obtenção de alta EUA é necessário ter-se boas condições hídricas nas fases críticas do milho (ALMEIDA et al, 2017).

Nesse estudo o fator que mais contribuiu para obtenção de EUA elevada foi a obtenção de maiores produtividades com a imposição dos RH com maior volume de água aplicado, que possibilitou condição hídrica favorável para o pleno desenvolvimento da cultura. Corroborando com resultados de outros autores (ALMEIDA et al., 2017; SOUZA et al., 2011), onde a produtividade do milho apresenta uma relação proporcional com o consumo hídrico acumulado, sendo considerada altamente responsiva à disponibilidade hídrica.

Em muitas pesquisas são relatados maiores valores de EUA em cultivos com certo nível de déficit hídrico e com menor volume de água consumida (BRITO et al., 2013; MOTAZEDIAN et al.,2019; SOARES et al., 2020), porém, para o presente estudo, as condições hídricas para a cultura nos tratamentos 40 e 60% ETc foram muito limitantes, uma vez que os níveis de água disponíveis para a cultura em tais tratamentos mantiveram-se abaixo da umidade critica (50% da água disponível) (Figura 3b) comprometendo o desenvolvimento da cultura e consequentemente reduzindo a produtividade de grãos, justificando assim, os baixos valores de EUA obtidos com a imposição dos tratamentos com reposição das menores frações da ETc.

Diferente dessa pesquisa, Soares et al. (2020) e Carvalho (2020) avaliando a produtividade de grãos do milho sob lâminas de irrigação, encontraram resposta quadrática para a variável EUA, onde a lâmina ótima (172 mm) e (419 mm), gerou um valor máximo de EUA (3,85 kg $m^{-3}$) e (1,7 kg $m^{-3}$), respectivamente. No presente estudo, os valores de EUA foram maiores que os obtidos por Carvalho (2020) e inferiores aos relatados por Soares et al. (2020), podendo tal diferença está associada às características dos híbridos em estudo (LOCATELLI et al., 2014). Além

disso, EUA é afetada por outros fatores, dentre estes o tipo de solo, as condições climáticas, bem como o estádio de crescimento do milho (LI et al.,2020).

Os resultados desse estudo mostram que os componentes de produção, produtividade de grãos e EUA são significativamente afetados pela aplicação dos regimes hídricos. Para as condições em que foi conduzido este estudo demonstra que elevadas produtividades de grãos (7-10 t $ha^{-1}$) foram obtidas pela aplicação de quantidade de água de irrigação de 618,6 mm.

## 4. CONCLUSÕES

A produtividade de grãos de milho responde de forma linear às lâminas de irrigação, com uma adição 27,52 kg $ha^{-1}$, para o híbrido Status VIP 3, e 27,23 kg $ha^{-1}$ para o híbrido BRS 3046, para cada mm de água aplicado.

Nos híbridos em estudo, a eficiência de uso da água e os componentes de produção, tais como número de espigas por metro quadrado, massa de cem grãos e índice de grãos aumentam linearmente com a aplicação dos regimes hídricos.

O híbrido simples Status VIP3, apresenta maior produtividade de grãos (10.898,3 kg $ha^{-1}$) e eficiência de uso da água (1,8 kg $m^{-3}$), relativamente 29,7% e 29,8 %, respectivamente em relação ao híbrido triplo BRS 3046.

## 5. REFERÊNCIAS


ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 1998.

ALMEIDA, A. C. S. et al. G.A. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada,** v.11, n.3, p. 1448-1457, 2017.

AMARAL, T. et al. **Resposta de cultivares de milho ao estresse hídrico**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 27p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 207), 2016.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. et al. **Produtividade de colmos e eficiência do uso de água em cultivares de cana-de-açúcar em gotejamento subsuperficial**. Teresina: Embrapa Meio-Norte. 12p. (Embrapa Meio-Norte. Comunicado Técnico, 244), 2018.

AVILEZ, A. M. A. et al. Necessidade hídrica e de irrigação do milho em função da data de semeadura no município de Irecê-Bahia. **In:** XXIX CONGRSSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM e IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SALINIDADE, INOVAGRE Meeting Virtual, 2020.

AZEVEDO, J. H. O.; BEZERRA, F. M. L. Resposta de dois cultivares de bananeira a diferentes lâminas de irrigação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 1, p. 28-33, 2008.

BASTOS, E. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. **Boletim Agrometeorológico de 2018 para o Município de Teresina, Piauí.** Teresina: Embrapa Meio-Norte. 34 p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 266), 2019.

BERGAMASCHI, H. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.2, p.243-249, 2006.

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H. et al. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, v.1, p.23-27, 2001.

BRITO, M. E. B. et al. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, 2013.

CARDOSO, M J et al. Comportamento de híbridos de milho transgênico e convencional em ambientes do Meio-Norte brasileiro. **In:** CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 31, Bento Gonçalves, 2016, Bento Gonçalves. Resumos Expandidos ... Sete Lagoas: ABMS/ALICE, 2016.

CARDOSO, M.J. et al. Eficiência do uso da água e produtividade de grãos de híbridos simples e triplos transgênicos de milho no centro norte piauiense. **In:** XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campo Grande, MT, 2014. **Resumo Simples**, MT: SBEA/UFMT, 2014.

CARDOSO, M. J. et al. **Rendimento de grãos, componentes de rendimento e eficiência de uso da água de híbridos de milho em condições climáticas contrastantes**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2012. 23p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 103).

CARVALHO, M. W.L. **Arranjo de plantas para máxima produtividade de grãos e espigas verdes de milho com e sem deficiência hídrica**. 130 p. (2020). Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí – Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura Tropical, Teresina, 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 8, safra 2021/22, n. 4 quarto levantamento, janeiro. 2022. Disponível em: Ebook_BoletimZdeZSafrasZZ12oZlevantamento1.pdf (www.gov.br).

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**: safra 2019/2020 - n. 5 quinto levantamento: fevereiro. 2020. **Companhia Nacional de Abastecimento**, Brasília, v. 7, n5, p. 1-112, 2020.

COSTA, J.P.N. et al. Evapotranspiração e rendimento do milho a diferentes lâminas e salinidade da água de irrigação. **Irriga**, v.1, n.2, p.74-80, 2015.

DANTAS JÚNIOR, E. E; CHAVES, L. G.; FERNANDES, J. D. Lâminas de irrigação localizada e adubação potássica na produção de milho verde, em condições semiáridas. **Revista Espacios**, v. 37, n. 27, 2016.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

ELMETWALLI, A. H.; TYLER, A. N. Estimation of maize properties and differentiating moisture and nitrogen deficiency stress via ground–Based remotely sensed data. **Agricultural Water Management**, v. 242, p. 106413, 2020.

FERREIRA, E.; CAVALCANTI, P.; NOGUEIRA, D. **ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs**. 682 Applied Mathematics 2014, 5, 2952-2958.

GUIMARÃES, P. S.; ROCHA, D. S.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidencia**, v. 19, n. 2, p. 93-112, 2019.

HAO, B. et al. Radiation-use efficiency, biomass production, and grain yield in two maize hybrids differing in drought tolerance. **Journal of agronomy and crop science**, v. 202, n. 4, p. 269-280, 2016.

HALLAUER, A. R.; SEARS, J. H. Changes in quantitative traits associated with inbreeding in a synthetic variety of maize. **Crop Science**, Madison, v.13, n. 2, p.327-330, 1973.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Dados históricos: 2019. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acessado em: 30 novembro, 2021.

KO, J.; PICCINNI, G. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 5, p. 799-808, 2009.

LI, C. et al. Effect of irrigation and fertilization regimes on grain yield, water and nitrogen productivity of mulching cultivated maize (Zea mays L.) in the Hetao Irrigation District of China. **Agricultural Water Management,** v. 232, p. 106065, 2020.

LOCATELLI, V. et al. Componentes de produção, produtividade e eficiência da irrigação do feijão-caupi no cerrado de Roraima. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 574-580, 2014.

MELO, F. B.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; PESSOA, B.L.O. **Levantamento, zoneamento e mapeamento pedológico detalhado da área experimental da Embrapa Meio-Norte em Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2014. 47 p. (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-866X; 231).

MELO, A. V. et al. A. Desempenho agronômico de genótipos de milho submetidos ao estresse hídrico no sul do estado do Tocantins**. Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.17, n.2, p. 177-189, 2018.

MELO, R. F. et al. Desenvolvimento e produtividade do milho BRS Gorutuba sob diferentes lâminas de irrigação e adubação orgânica. **Revista Científica Intelletto**, v.3, n.1, p. 1-14, 2018a.

MOTAZEDIAN, A.; KAZEMEINI, S. A.; BAHRANI, M. J. Sweet corn growth and Grain Yield as influenced by irrigation and wheat residue management. **Agricultural Water Management**, v. 224, p. 105748, 2019.

NASCIMENTO, F.N. et al. Parâmetros fisiológicos e produtividade de espigas verdes de milho sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.2, p. 167-181, 2015.

OSAKABE, Y. et al. Response of plants to water stress. **Front. Plant Sci**., n.5, p.86, 2014.

ROCHA, D. S. et al. Drought tolerance in intervarietal maize hybrids. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 1, p. 80- 89, 2021.

RIBEIRO, R. B. et al. Crescimento do milho BRS catingueiro irrigado no cariri cearense. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v.8, n.3, p.81-86, 2015.

SALES, R. M. et al. Estimativa das necessidades hídricas do milho cultivado nas condições edafoclimáticas de São Mateus – ES. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 598-609, 2016.

SOARES, M. A. et al. Fenologia, componentes de produção e rendimento agrícola do milho sob lâminas de irrigação na região de Rio Largo, Alagoas. **IRRIGA**, v. 25, n. 2, p. 279-295, 2020.

SOARES, F. C. et al. Resposta da produtividade de híbridos de milho cultivado em diferentes estratégias de irrigação. **Irriga,** v. 15, n. 1, p. 36-50, janeiro-março, 2010.

SOUZA, F. M. et al. Crescimento inicial do milho sob doses de esterco caprino e disponibilidade de água no solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 2, p. 241-245, 2017.

SOUZA, E. J. et al. Eficiência do uso da água pelo milho doce em diferentes lâminas de irrigação e adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, n. 4, p. 750-757, 2016.

SOUZA, L. C. et al. Comportamento bioquímico no milho submetido ao déficit hídrico e a diferentes concentrações de silício. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 8, n. 29, p. 260-267, 2015.

SOUZA, L. B. et al. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p.715-721, 2011.

ZANETTI, W. A. L.; COSMO, B. M. N.; GALERIANI, T. M. Irrigação na cultura do milho: qual sistema usar? In: **VIII JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica**, 2019.

# CAPÍTULO III

## DETECÇÃO DO STATUS HÍDRICO EM MILHO COM IMAGENS AÉREAS OBTIDAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA


**RESUMO**

Imagens aéreas digitais obtidas por câmeras multiespectrais embarcadas em aeronaves remotamente pilotadas (ARP) têm sido aplicadas na detecção e monitoramento de estresse hídrico em milho. O estudo objetivou avaliar a capacidade de índices de vegetação (IV) obtidos de imagens aéreas por ARP em detectar o estado hídrico de plantas de milho submetidas a diferentes regimes hídricos, nas condições de solo e clima da microrregião de Teresina, Piauí, Brasil. Avaliaram-se três híbridos de milho: BRS 3046 (triplo convencional), BRS 2022 (duplo convencional) e Status VIP3 (simples transgênico), submetidos a cinco regimes hídricos (RH) (40, 60, 80, 100 e 120% da evapotranspiração da cultura – ETc). O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, parcelas subdivididas, sendo as parcelas os RH e as subparcelas os híbridos, com quatro repetições. Cada subparcela continha seis linhas de 6 m de comprimento, espaçadas de 0,5 m entre linhas, com área de 18 m² e uma área útil para avaliação da produtividade de grãos de 6 m². Avaliaram-se 29 IV obtidos de imagens aéreas de câmera multiespectral, os quais foram correlacionados com medidas de condutância estomática (gs), conteúdo relativo de água na folha (CRA), déficit de pressão de vapor (DPV) e produtividade de grãos (PG). Os IVs NDVI e TCARI-RE apresentaram correlação linear com gs; por outro lado, o NDVI e NGRD correlacionaram-se com o DPV; por sua vez, os IVs MNGRD e GCI foram correlacionados com o CRA, e, portanto, são considerados promissores na detecção do estresse hídrico na cultura do milho. Os IVs NDVI e WDRVI foram bem correlacionados com a PG. Os mapas de NDVI, MNGRV e WDRVI mostram elevada correlação espacial com os parâmetros de gs, DPV, CRA e PG em resposta aos regimes hídricos, indicando aplicação potencial na detecção do status hídrico na cultura do milho por meio de imagens aéreas obtidas por ARPs.



**Palavras-chave:** *Zea mays*; drone; híbrido; índice de vegetação.

# CHAPTER III

## DETECTION OF WATER STATUS IN CORN WITH AERIAL IMAGES OBTAINED BY REMOTE PILOTTED AIRCRAFT


### ABSTRACT

Digital aerial images obtained by multispectral cameras onboard remotely piloted aircraft (RPA) have been applied in the detection and monitoring of water stress in corn. The study aimed to evaluate the ability of vegetation indices (IVs) obtained from aerial images by RPA to detect the water status of corn plants subjected to different water regimes, under soil and climate conditions of the Teresina microregion, Piauí, Brazil**.** Three corn hybrids were evaluated: BRS 3046 (triple conventional), BRS 2022 (double conventional) and Status VIP3 (single transgenic), submitted to five water regimes (WR) (40, 60, 80, 100 and 120% of the evapotranspiration of culture – ETc). The experimental design was randomized blocks, split-plots, being the WH plots and the subplots the hybrids, with four replications. Each subplot contained six rows of 6 m in length, spaced 0.5 m between rows, with an area of 18 m² and a useful area for grain yield evaluation of 6 m². 29 VIs obtained from aerial multispectral camera images were evaluated, which were correlated with measurements of stomatal conductance (gs), relative leaf water content (CWR), vapor pressure deficit (VPD) and grain yield (GY). The NDVI and TCARI-RE showed a linear correlation with gs; on the other hand, NDVI and NGRD correlated with VPD. MNGRD and GCI were correlated with CWR, and therefore, are considered promising in detecting water stress in corn. NDVI and WDRVI were well correlated with GY. The NDVI, MNGRV and WDRVI maps show high spatial correlation with the parameters of gs, VPD, CWR and GY in response to water regimes, indicating potential application in the detection of water status in corn through aerial images obtained by RPAs.


**Keywords:** *Zea mays*; drone; hybrid; vegetation index.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um dos fatores mais limitantes à produtividade de grãos da cultura do milho (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Em condição de déficit hídrico, a cultura pode apresentar diferentes respostas de produtividade de grãos, de acordo com o período e a intensidade do estresse. O estresse hídrico interfere no rendimento de grãos devido a alterações na área foliar, no florescimento, na polinização e no enchimento de grãos (SOUZA et al., 2016).

Os métodos tradicionais de monitoramento do estresse hídrico das culturas contam com medições diretas do conteúdo de água no solo e medição direta e indireta de variáveis fisiológicas da planta, via condutância estomática e potencial de água na folha (IHUOMA; MADRAMOOTOO, 2017). Porém, esses métodos são demorados, trabalhosos e de alto custo e não levam em consideração a variabilidade espacial do solo e das culturas (LI et al., 2010).

Recentemente, os estudos têm se concentrado no uso de dados de sensoriamento remoto, principalmente de plataformas emergentes de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), como alternativa às medições tradicionais de parâmetros de estresse hídrico das culturas. Os dados de imagens aéreas obtidas por ARP fornecem informações sobre a variabilidade espacial e temporal das lavouras (ROSSINI et al., 2015; PANIGADA et al., 2014; BALLESTER et al., 2017; ZHANG et al., 2021).

A detecção do estresse hídrico por meio de imagens capturadas em câmeras embarcadas em ARPs permite que grandes áreas sejam monitoradas e, portanto, apresenta-se como um método mais apropriado para uso em culturas que ocupam áreas extensas como o milho. Nesse contexto, as ARPs destacam-se como uma ferramenta viável para fazer a detecção remota do estresse hídrico em plantas por meio do uso de imagens multiespectrais.

Estudos têm mostrado que os índices de vegetação (IVs) calculados a partir de imagens multiespectrais capturadas por ARPs podem ser usadas para estimar o potencial de água na folha e mapear a variabilidade do status da água nas culturas agrícolas (BAJULO et al., 2012; ZHANG et al., 2021; ANDRADE JÚNIOR et al., 2021). A capacidade de detectar o estresse hídrico nas lavouras em estágio inicial é de extrema importância para evitar reduções significativas na sua produtividade.

Nesse contexto, os dados de SR por ARPs têm a possibilidade de fornecer uma ferramenta rápida e precisa para auxiliar no manejo específico do local na produção da cultura do milho.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar a capacidade de índices de vegetação (IV) obtidos de imagens aéreas por aeronave remotamente pilotada (ARP) em detectar o estado hídrico de plantas de milho submetidas a diferentes regimes hídricos, nas condições de solo e clima da microrregião de Teresina, Piauí, Brasil.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Localização, características do local e arranjo experimental.

O estudo foi conduzido na área experimental (05°05’ S; 42°48’ W e 74,4 m de altitude) da Embrapa Meio-Norte, em Teresina, PI, Brasil, no período de agosto a novembro de 2019 (Figura 1). O clima da região é caracterizado como subúmido seco, megatérmico, com excedente hídrico moderado no verão e concentração de 32,2% da evapotranspiração potencial no trimestre que compreende os meses de setembro, outubro e novembro. As normais climatológicas do período de 1978 a 2017 registram valores de temperatura do ar correspondente a 28,2°C, umidade relativa média do ar de 69,5%, velocidade média do vento de 1,1 m $s^{-1}$, insolação diária de 4,7 h $dia^{-1}$, precipitação anual de 1.318 mm e evapotranspiração de referência média diária de 4,7 mm $dia^{-1}$ (BASTOS; ANDRADE JÚNIOR, 2019).

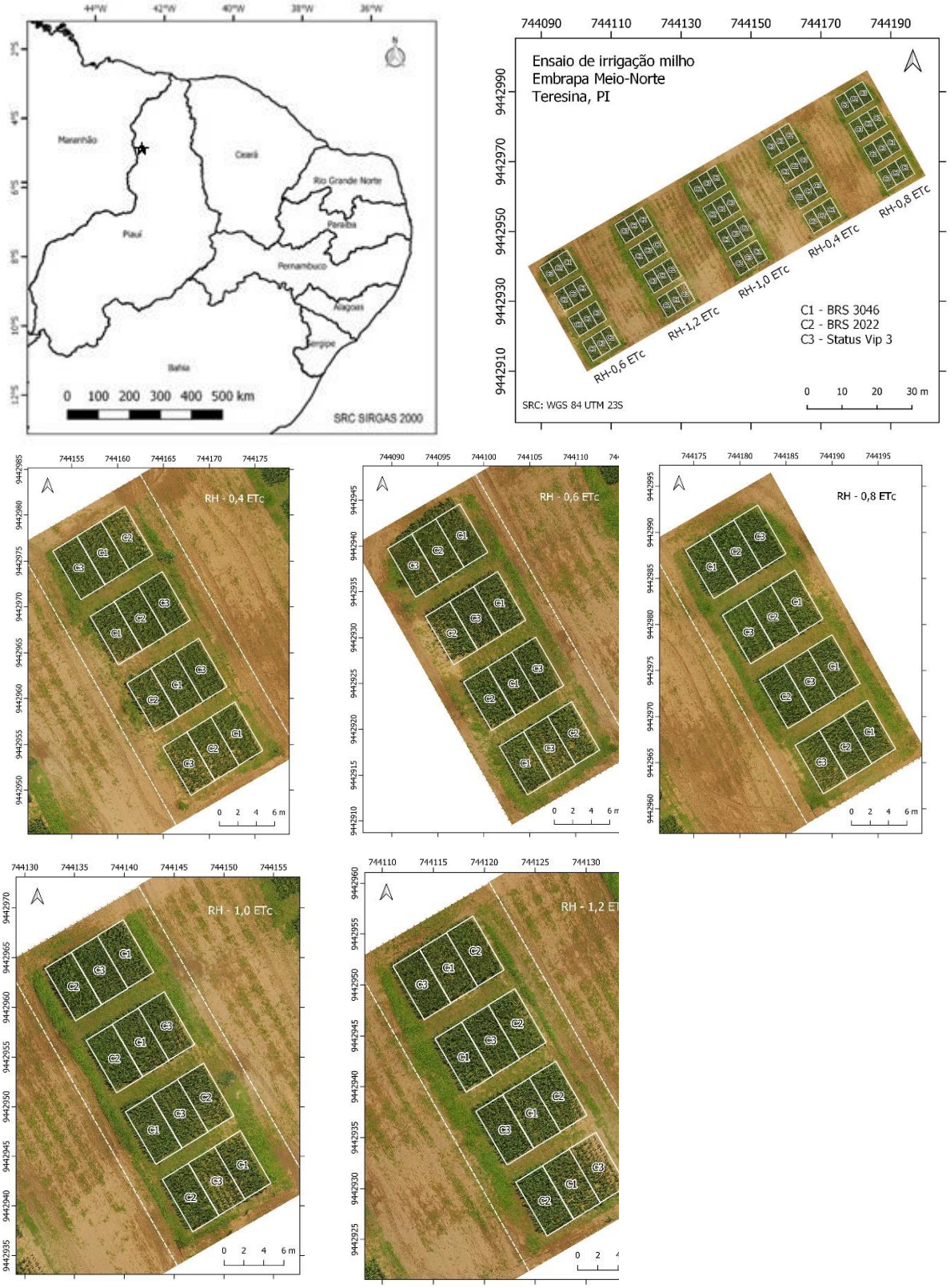



**Figura 1**. Localização do município de Teresina, PI (acima à esquerda), imagem aérea da área experimental (acima à direita) e parcelas/subparcelas experimentais (embaixo). Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI. C1 – BRS – 3046; C2- BRS 2022 e C3 – Status VIP3.

Os registros climáticos diários de precipitação e temperatura (máxima e mínima) desde a semeadura até a data de aquisição das imagens aéreas são mostrados na Figura 2. Os registros foram obtidos da estação meteorológica automática situada próxima à área experimental (INMET, 2021), sendo constatada temperatura média do ar de 28,2 °C, com média das máximas de 29,4 °C e média das mínimas de 27,3 °C; com precipitação de 5,2 mm para o período.

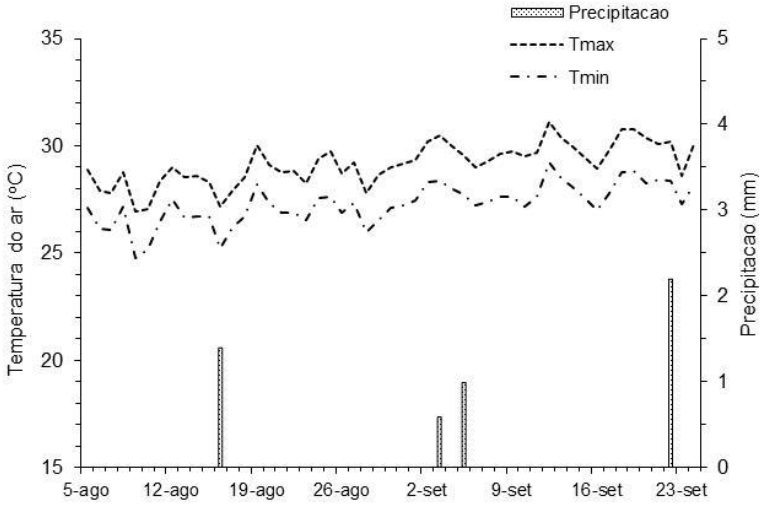



**Figura 2**. Precipitação, temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar diária desde a semeadura até a data da aquisição das imagens aéreas. Teresina, PI, 2019.

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (MELO et al., 2014), cujas características físico-hídricas determinadas pelo Laboratório de Solos da Embrapa Meio-Norte são apresentadas na Tabela 1. O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens. A adubação mineral de semeadura constou da aplicação de 75 kg $ha^{-1}$ de N, 80 kg $ha^{-1}$ de $P_2O_5$, 35 kg de $K_2O$ $ha^{-1}$ e 3 kg $ha^{-1}$ de Zn, seguindo as recomendações de Cardoso et al. (2012) para a cultura do milho. Por ocasião da 6ª folha completamente emergida foi efetuada a adubação de cobertura, com aplicação de 75 kg de N $ha^{-1}$ e 35 kg de $K_2O$ $ha^{-1}$. Nas adubações utilizou-se como fonte de N o sulfato de amônio, de $P_2O_5$ o superfosfato triplo, de $K_2O$ o cloreto de potássio e de Zn o sulfato de zinco.

**Tabela 1**– Caracterização físico-hídrica da área experimental

| Camada (m) | Densidade (g $cm^{-3}$) | Areia grossa | Areia fina | Silte | Argila | Θcc | Θpmp |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | g $kg^{-1}$ | | | | (%, volume) | |
| 0,0 – 0,2 | 1,70 | 532,0 | 344,5 | 37,5 | 86,0 | 21,7 | 5,3 |
| 0,2 – 0,4 | 1,65 | 453,0 | 358,5 | 52,5 | 136,0 | 20,8 | 6,0 |

Θcc: capacidade de campo; Θpmp: ponto de murcha permanente.

O experimento foi conduzido sob irrigação por aspersão convencional fixa, com aspersores espaçados em 12 x 12 m. O turno de irrigação foi fixo, com irrigações realizadas sempre as 2as, 4as e 6as feiras, repondo-se sempre a ETc do período anterior de acordo com os tratamentos de regime hídrico. Assim, avaliou-se a aplicação de cinco regimes hídricos (RH) com base na evapotranspiração da cultura (ETc) (40, 60, 80, 100 e 120% ETc) em três híbridos de milho: BRS 3046 (triplo convencional), BRS 2022 (duplo convencional) e Status VIP3 (simples transgênico). Os RH distintos foram aplicados utilizando-se tempos de irrigação distintos. Utilizou-se o método de Penman–Monteith para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) e valores de coeficientes de cultura (Kc) da FAO (ALLEN et al., 1998).

Para a aplicação dos RH adotou-se o seguinte manejo de irrigação: desde a semeadura até os 36 dias após a semeadura (DAS), a irrigação foi plena para todos os tratamentos (fase de desenvolvimento vegetativo); a partir dos 37 DAS até o final do ciclo da cultura, houve aplicação dos RH diferenciados por meio da reposição de 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 e 1,2 ETc. Na Tabela 2 são apresentadas as lâminas de irrigação aplicadas desde a semeadura até a data de aquisição das imagens aéreas e a irrigação total por RH.

**Tabela 2**. Lâminas de irrigação (mm) em resposta aos regimes hídricos aplicados desde a semeadura até a data da aquisição das imagens aéreas. Teresina, PI, 2019.

| Período | DAS | 0,4 ETc | 0,6 ETc | 0,8 ETc | 1,0 ETc | 1,2 ETc |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 05/08 a 09/09/2019 | S – 36 | 184,0 | 184,6 | 186,4 | 182,1 | 179,3 |
| 10/09 a 24/09/2019* | 37 – 50 | 37, 2 | 57,0 | 74,2 | 91,6 | 108,8 |
| 25/09 a 12/11/2019** | 51 -99 | 114,8 | 165,2 | 210,7 | 272,3 | 330,5 |
| Total | S – 99 | 336,0 | 406,8 | 471,3 | 546,0 | 618,6 |

* Houve precipitação de 5,2 mm no período;**Houve precipitação de 13,4 mm no período.

Para o monitoramento do conteúdo de água no solo (%, volume) foram instalados três tubos de acesso de PVC em cada RH, com 0,7 m de profundidade, dispostos entre as fileiras centrais. Utilizou-se uma sonda de capacitância (FDR)

modelo Diviner 2000® da Sentek Pty Ltda, Austrália. As leituras foram realizadas diariamente, sempre antes e aproximadamente 24 horas após as irrigações. O conteúdo de água no solo em cada camada (0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 m) dos regimes hídricos, foi calculado pela média dos valores de umidade medidos durante o ciclo do milho.

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, com os tratamentos arranjados em parcelas subdivididas (RH, nas parcelas, e híbridos, nas subparcelas), com quatro repetições. A semeadura foi efetuada em espaçamento de 0,5 m entre fileiras, com quatro plantas por metro (8 plantas $m^{-2}$). A parcela era composta por seis fileiras com as duas fileiras centrais (6 $m^2$) usadas para medida da produtividade de grãos. A semeadura ocorreu em 05/08/2019 e a colheita (grãos secos) em 12/11/2019.

## 2.2 Medidas do status hídrico das plantas

As medidas dos parâmetros fisiológicos (condutância estomática, déficit de pressão e conteúdo relativo de água na folha) foram realizadas no mesmo dia que foi realizado o voo para captura das imagens aéreas. Para as medidas dos parâmetros condutância estomática (gs) e déficit de pressão de vapor (DPV), utilizou-se um analisador portátil de gases na região do infravermelho do espectro eletromagnético, marca CIRAS-3 Portable Photosynthesis Systems, dotado de uma câmara de medição com sistema de iluminação artificial LI-COR Mod. 6400-02B. As medidas foram efetuadas em uma planta por subparcela, quando as plantas estavam em seu estágio de alongamento do colmo-prefloração. Os dados foram extraídos pelo software Open versão 6.3 foram: gs (mmol $m^{-2}$ $s^{-1}$) e DPV (kPa). As medições foram realizadas na folha totalmente expandida mais jovem.

As amostras para o conteúdo relativo de água na folha (CRA) foram retiradas da primeira folha totalmente expandida, a partir do ápice das plantas. O CRA foi realizado utilizando-se uma porção de aproximadamente 4,9 $cm^2$ do limbo foliar de uma planta por subparcela; esta porção foi imediatamente posta em frasco hermeticamente fechado e de peso previamente determinado evitando-se, assim, a perda de água por transpiração, sendo, portanto, pesado (matéria fresca); em

seguida, as amostras foram postas, individualmente em placas de Petri, devidamente preparadas com papel de filtro saturado em água destilada, permanecendo 24 h nessas condições; após este período, determinou-se o peso da matéria túrgida. O peso da matéria seca das amostras foi obtido após a secagem em estufa (65°C), até atingir peso constante. Para o cálculo do CRA aplicou-se a equação 1.

$$CRA(\%)=\frac{PF-PS}{(PT-PS)} \times 100\ (\%) \qquad eq.1$$

Onde: CRA – conteúdo relativo de água da folha; PF- peso da matéria fresca dos limbos foliares; PT – peso dos limbos foliares a plena turgência; e PS – peso da matéria seca.

## 2.3 Aquisição das imagens aéreas e pré-processamento

As imagens aéreas foram adquiridas utilizando uma aeronave remotamente pilotada (ARP), tipo hexacoptero, marca XFLY Brasil, modelo X800 (XFly Brasil, Bauru, SP). Realizou-se um voo no dia 24/09/2019, aos 50 dias após a semeadura do milho (DAS), no horário entre 11: 00 e 12h00min horas. O voo foi planejado com o software Pix4D Capture® (www.pix4d.com). O plano de voo foi criado garantindo que a captura das imagens fosse feita com uma sobreposição lateral e frontal de 80%, mantendo a linha de voo a 30 metros acima do nível do solo, com GSD (ground sample distance) de ≈ 1,5 cm pixel$^{-1}$. As condições meteorológicas locais, como temperatura do ar (máxima e mínima), velocidade do vento e radiação solar, horárias registradas quando as imagens foram capturadas (0:00 – 22:00 GMT – 3h) foram medidas por uma estação meteorológica automática (INMET, 2021) (Figura 3).

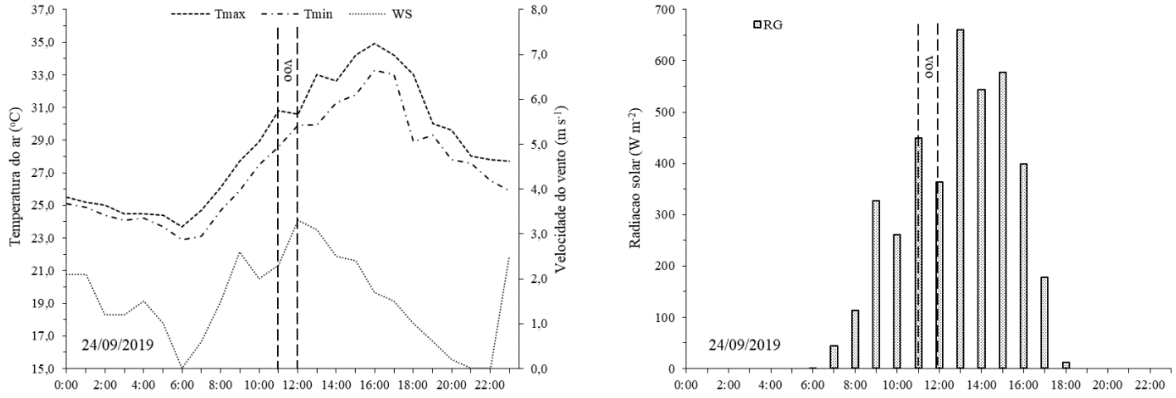



**Figura 3.** Temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar, velocidade do vento (WS) e radiação solar (RG) horaria no dia da aquisição das imagens aéreas (24/09/2019). Teresina, PI, 2019.

As imagens multiespectrais foram adquiridas por um sensor multiespectral marca Micasense modelo RedEdge. O sensor capta imagens em cinco bandas espectrais estreitas, denominadas Blue (intervalo: 465-485 nm; largura: 20 nm), Green (intervalo: 550-570 nm; largura: 20 nm), Red (intervalo: 663-673nm; largura: 10 nm), Red Edge (intervalo: 712-722nm; largura: 10nm), Near Infra Red (NIR) (intervalo: 820-860 nm; largura: 40 nm)), com pixel de 8 cm a 12 cm. Possui resolução de 1280 x 960 pixels para cada banda. As imagens foram gravadas em formato tiff de 16 bits (MICASENSE, 2020).

As imagens geradas foram georreferenciadas e corrigidas utilizando um sistema de posicionamento global (GPS) e sensor de radiação solar instalados na parte superior da aeronave. Um padrão de calibração radiométrico também foi utilizado na correção das imagens. O processamento para geração do ortomosaico das imagens aéreas foi realizado com o software OpenDroneMap (WebODM). A configuração do software possibilitou a geração do ortomosaico com resolução espacial de 4,6 cm pixel$^{-1}$.

O ortomosaico gerado passou por processo de classificação supervisionada (método da máxima verossimilhança), permitindo a rasterização do ortomosaico em duas classes (solo e folhas), que permitiu a remoção dos pixels classificados como solo do mosaico, assegurando que a estimativa dos índices de vegetação fosse efetuada apenas com os pixels classificados como folhas. Essa etapa do processamento foi efetuada usando o plugin SCP (Semi Automatic Classification) do QGIS v. 2018 (QGIS, 2016).

Avaliaram-se 29 índices de vegetação, os quais foram estimados a partir das bandas da imagem multiespectral (R, G, B, Red Edge e NIR). A Tabela 3 apresenta um resumo descritivo dos índices utilizados neste estudo, com informações básicas referentes aos seus respectivos nomes, siglas, equações e referências bibliográficas.

**Tabela 3**. Índices de vegetação multiespectrais avaliados no estudo.

| Índices – Sigla | Equação | Referência |
|---|---|---|
| Chlorophyll index red - CI-RED | $\frac{R_n}{R_r} - 1$ | Gitelson et al. (2005) |
| Chlorophyll vegetation index – CVI | $\frac{R_n R_r}{{R_g}^2}$ | Vincini et al. (2008) |
| Enhanced vegetation index – EVI | $\frac{2{,}5(R_n - R_r)}{R_n + 6R_r - 7{,}5R_b + 1}$ | Huete et al. (2002) |
| Two-band enhanced vegetation index – EVI2 | $\frac{2{,}5(R_n - R_r)}{R_n + 2{,}4R_r + 1}$ | Jiang et al. (2008) |
| Excess green red – EXGR | $\frac{3R_g - 2{,}4R_r - R_b}{R_r + R_g + R_b}$ | Meyer e C. Neto (2008) |
| Green chlorophyll index – GCI | $\frac{R_n}{R_g} - 1$ | Gitelson et al. (2005) |
| Green leaf index – GLI | $\frac{2R_g - R_r - R_b}{2R_g + R_r + R_b}$ | Hunt et al. (2013) |
| Green normalized difference vegetation – GNDVI | $\frac{R_n - R_g}{R_n + R_g}$ | Hunt e Daughtry (2018) |
| Green ratio vegetation index – GRVI | $\frac{R_n}{R_g}$ | Sripada et al. (2006) |
| Modified excess green – MEXG | $1{,}262R_g - 0{,}884R_r - 0{,}311R_b$ | Burgos-Artizzu et al. (2011) |
| Modified normalized green red difference - MNGRD | $\frac{R_g^2 - R_r^2}{R_g^2 + R_r^2}$ | Bendig et al. (2015) |
| Normalized difference Red-Edge – NDRE | $\frac{R_n - R_{RE}}{R_n + R_{RE}}$ | Wang et al. (2019) |
| Normalized difference Red-Edge index – NDREI | $\frac{R_{RE} - R_g}{R_{RE} + R_g}$ | Hassan et al. (2018) |
| Normalized Difference Vegetation Index – NDVI | $\frac{R_n - R_r}{R_n + R_r}$ | Gitelson et al. (2005) |
| Normalized green red difference – NGRD | $\frac{R_g - R_r}{R_g + R_r}$ | Hamuda et al. (2016) |
| Optimized Soil Adjusted Vegetation Index – OSAVI | $\frac{R_n - R_r}{R_n + R_r + 0{,}16}$ | Roundeaux et al. (1996) |
| Pigment-specific normalized difference index – PSND | $\frac{Rn - Rb}{Rn + Rb}$ | Blackburn (1998) |
| Renormalized Difference Vegetation Index – RDVI | $\frac{Rn - Rr}{(Rn + Rr)0{,}5}$ | Roujean; Breon (1995) |
| Red-Edge chlorophyll index – RECI | $\frac{R_n}{R_{RE}} - 1$ | Gitelson et al. (2005) |
| Red green difference – RGD | $R_r - R_g$ | Sanjerehei (2014) |
| Ratio vegetation index – RVI | $\frac{R_n}{R_r}$ | Tucker (1979) |
| Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI | $\frac{1{,}5(R_n - R_r)}{(R_n + R_r + 0{,}5)}$ | Zhong et al. (2019) |

| | | |
|---|---|---|
| Simplified canopy chlorophyll content index – SCCCI | $\frac{NDRE}{NDVI}$ | Raper; Varco (2015) |
| Transformed chlorophyll absorption in Nir index – TCARI | $3[(R_n - R_r) - 0{,}2(R_n - R_g)(R_n/R_r)]$ | Haboudane et al. (2002) |
| TCARI/OSAVI index – TCARI-OSAVI | $\frac{TCARI}{OSAVI}$ | Haboudane et al. (2002) |
| Transformed chlorophyll absorption in Red-edge index – TCARI-RE | $3\left[(R_{RE} - R_r) - 0{,}2(R_{RE} - R_g)\left(\frac{R_{RE}}{R_r}\right)\right]$ | Daughtry et al. (2000) |
| TCARI/OSAVI-RE index – TCARI-OSAVI-RE | $\frac{TCARI_{RE}}{OSAVI}$ | Daughtry et al. (2000) |
| Triangular greenness index – TGI | $R_g - (0{,}39R_r) - (0{,}61R_b)$ | Hunt et al. (2011) |
| Wide dynamic range vegetation index – WDRVI | $\frac{(0{,}12R_n) - R_r}{(0{,}12R_n) + R_r}$ | Gitelson (2004) |

Reflectância espectral - $R_n$: infravermelho próximo (840nm); $R_g$: verde (560 nm); $R_{RE}$: vermelho próximo (717 nm); $R_r$: vermelho (668 nm) e $R_b$: azul (475 nm); $R'_n$: infravermelho próximo (solo); $R'_r$: vermelho (solo).

A estimativa dos índices multiespectrais foi efetuada com a calculadora raster do QGIS (QGIS, 2016). A extração dos valores dos índices de vegetação de cada subparcela foi efetuada com o plugin estatística zonal do QGIS (QGIS, 2016). Para esse processo, utilizou-se a camada vetorial das subparcelas experimentais, constituído pelas quatro fileiras centrais (12 $m^2$), contendo apenas as áreas classificadas como folhas. O plugin estatística zonal gerou uma tabela de atributos (mínimo, máximo e desvio padrão) dos índices de vegetação em cada subparcela experimental.

## 2.4 Produtividade de grãos

A colheita foi realizada no dia 12 de novembro de 2019 (grãos secos) de forma manual aos 99 dias após a semeadura. Para a determinação da produtividade de grãos, colheram-se todas as espigas de uma área de 6m² em cada subparcela, nas linhas centrais das subparcelas. Em seguida, as espigas colhidas foram trilhadas em uma trilhadeira mecânica, para separação dos grãos. Em seguida, a massa de grãos de cada subparcela foi pesada e corrigida para a umidade de 130 g $kg^{-1}$, sendo o valor extrapolado para kg $ha^{-1}$.

## 2.5 Análise estatística

Para a análise estatística dos dados seguiu-se a seguinte estratégia: a) análise de variância para avaliação da resposta dos parâmetros fisiológicos (condutância estomática, déficit de pressão de vapor e conteúdo relativo de agua na folha) e a produtividade de grãos em função das fontes de variação regimes hídricos (RH), híbridos (H) e interação (RH x H); b) análise de correlação de Pearson entre os parâmetros fisiológicos, produtividade de grãos e os IVs, visando a pré-seleção dos IVs mais promissores na detecção do status hídrico; c) análise de regressão linear para geração de modelos de predição dos parâmetros fisiológicos, utilizando os IVs promissores na detecção do status hídrico.

Para análise de correlação de Pearson foi aplicado o teste t, enquanto para análise de variância dos fatores RH, H e interação foi utilizado o teste F. Admitiram-se como promissores os IVs com r ≥ 0,8 em relação aos parâmetros fisiológicos e a produtividade de grãos. A análise estatística foi realizada utilizando o pacote ExpDes.pt do software R (FERREIRA et al., 2014). Os modelos de regressão linear foram selecionados levando em consideração o coeficiente de determinação, $R^2$ (equação 2) e o erro padrão de estimativa da regressão, EPE (equação 3). Considerou-se como os melhores modelos de regressão os que apresentaram maior $R^2$ e menor EPE. Para tanto, utilizou-se o suplemento do Excel Real Statistics Resource Pack (versão 7.6) (ZAIONTZ, 2020).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\grave{Y}_i - \grave{Y}_m\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \overline{Y_i}\right)^2} \qquad Eq.2$$

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \grave{Y}_i\right)^2}{n-2}} \qquad Eq.3$$

Onde: n – número de observações; $\grave{Y}_i$ – parâmetros fisiológicos estimados pelos modelos de regressão; $\grave{Y}_m$ – média dos parâmetros fisiológicos estimados pelos modelos de regressão;$Y_i$ – parâmetros fisiológicos medidos em campo; $\overline{Y_i}$ – média dos parâmetros fisiológicos medidos em campo.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os regimes hídricos (RH) proporcionaram variação na disponibilidade de água no solo para as plantas. A disponibilidade de água no solo obedeceu à ordem de aplicação dos RH, ou seja, onde houve maior aplicação de água, a disponibilidade de água para as plantas foi maior. Essa variabilidade foi maior nas camadas de 0,1 m e 0,2 m (Figura 4). Em relação à profundidade total avaliada (0,0 – 0,4 m), os valores médios de umidade do solo oscilaram de 7,1% (RH=0,4ETc) a 15,4% (RH=1,2 ETc) (Figura 4a), resultando em uma variação média na disponibilidade de água no solo de 45,0% (RH=0,4 ETc) a 98,1% (RH=1,2 ETc) (Figura 4b).

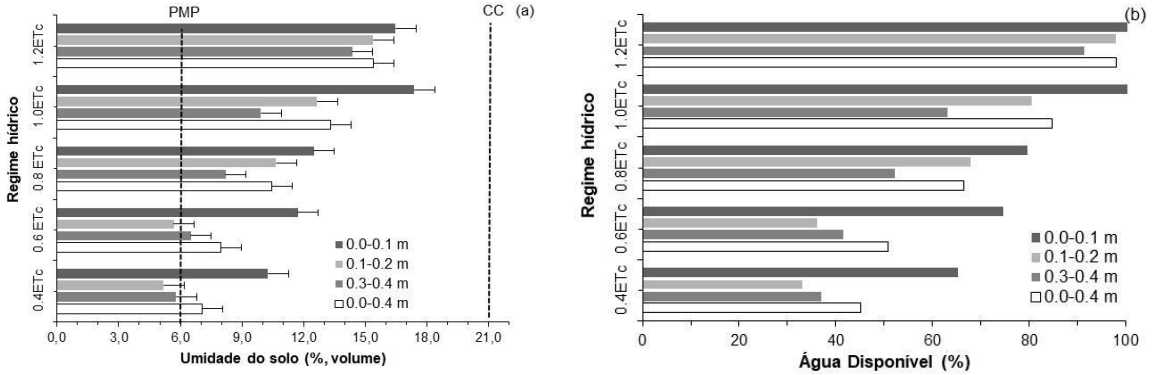



**Figura 4** Umidade média do solo (a) e água disponível (b) em resposta aos regimes hídricos aplicados desde a semeadura até a data da aquisição das imagens aéreas (24.09.2019).

Os resultados mostram que considerando a camada de 0,0 – 0,4 m, para os tratamentos sob RH (80% ETc=10,5%, 100% ETc=13,3% e 120% ETc=15,4%), a disponibilidade de água no solo foi mantida em níveis superiores à umidade crítica (10,8%, média da camada de 0,0-0,4 m) para permitir o desenvolvimento e produção adequados do milho. Por outro lado, nos tratamentos sob RH (40% ETc=7,1% e 60% ETc=8,0%), foram registrados valores abaixo da umidade crítica e acima do ponto de murcha permanente durante o período avaliado, o que é um fator limitante para o desenvolvimento e produtividade dos grãos de milho.

A análise de variância indicou que os parâmetros fisiológicos: condutância estomática (gs), déficit de pressão na folha (DPV) e conteúdo relativo de água na folha (CRA) e a produtividade de grãos (PG) sofreram alteração significativa em resposta à aplicação dos regimes hídricos (RH). Observa-se que o efeito de híbrido

(H) e a interação RH versus H foi significativa (p<0,001), apenas para a PG (Tabela 4).

**Tabela 4** – Análise de variância (QM) para condutância estomática (gs), déficit de pressão de vapor (DPV), conteúdo relativo de água na folha (CRA) e produtividade de grãos (PG) em resposta aos regimes hídricos e híbridos de milho avaliados. Teresina, PI, 2019.

| Fonte de Variação | GL | Gs | DPV | CRA | PG |
|---|---|---|---|---|---|
| Regime Hídrico (RH) | 4 | 14995* | 2,241*** | 490,940*** | 93362560*** |
| Bloco | 3 | 5371 | 0,175 | 80,110 | 3813255 |
| Erro a | 12 | 3309 | 0,199 | 40,720 | 495152 |
| Híbrido (H) | 2 | $2211^{ns}$ | $0,373^{ns}$ | $107,850^{ns}$ | 7644094*** |
| RH*H | 8 | $7003^{ns}$ | $0,352^{ns}$ | $28,410^{ns}$ | 6402201*** |
| Erro b | 30 | 4873 | 0,162 | 41,640 | 787322 |
| Total | 59 | | | | |
| CV RH (%) | | 22,97 | 12,09 | 8,50 | 15,23 |
| CV Cult (%) | | 27,87 | 10,91 | 8,60 | 19,21 |

Níveis de significância pelo teste F: ***: p<0,001; **: p<0,01; *: p<0,05; ns: não significativo.

O aumento na disponibilidade de água no solo em função da aplicação dos RH proporcionou acréscimo na gs (5A), observando notadamente entre os regimes extremos (40 e 120% ETc), os quais foram iguais a 204,2 mmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ (40%ETc) e 298,5 mmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ (120% ETc). Não houve diferença significava na gs entre os RH 60, 80 e 100% ETc. Redução na gs em milho sob déficit hídrico no solo também foi observado por Brito et al. (2013), Rossini et al. (2015), Zhang et al. (2021) e Andrade Júnior et al. (2021). Uma das primeiras respostas das plantas à deficiência hídrica é o fechamento estomático, como estratégia para evitar a perda de água para a atmosfera (ROSSINI et al., 2015).

A redução da disponibilidade de água no solo proporcionou aumento no DPV. De fato, sob elevada disponibilidade de água no solo, os DPV foram iguais a 3,3 kPa (120% ETc) e de 3,4 kPa (100% ETc), enquanto sob deficiência hídrica no solo, os DPV aumentaram para 4,3 kPa (40% ETc) e 3,9 kPa (60%ETc) (Figura 5B). Resultado similar foi obtido por Silva et al. (2017) trabalhando com milho verde, onde o maior aporte hídrico no solo promoveu reduções nos valores de DPV variando de 3,1 a 8,8 KPa.

Na ausência de um suprimento adequado de água ocorre o fechamento estomático, que por sua vez, reduz a transpiração, diminuindo assim, a capacidade de refrigeração da folha e aumenta a temperatura deste órgão, e uma vez que a folha continua recebendo luz, causa elevação no DPV o que leva à redução da

fotossíntese (ARAÚJO et al., 2010). Dessa forma, deve-se enfatizar que o menor valor de DPV (3,3 kPa) podem ter resultado em ampla abertura estomática e consequentemente resfriamento das folhas nos tratamentos com maior disponibilidade hídrica (120%ETc).

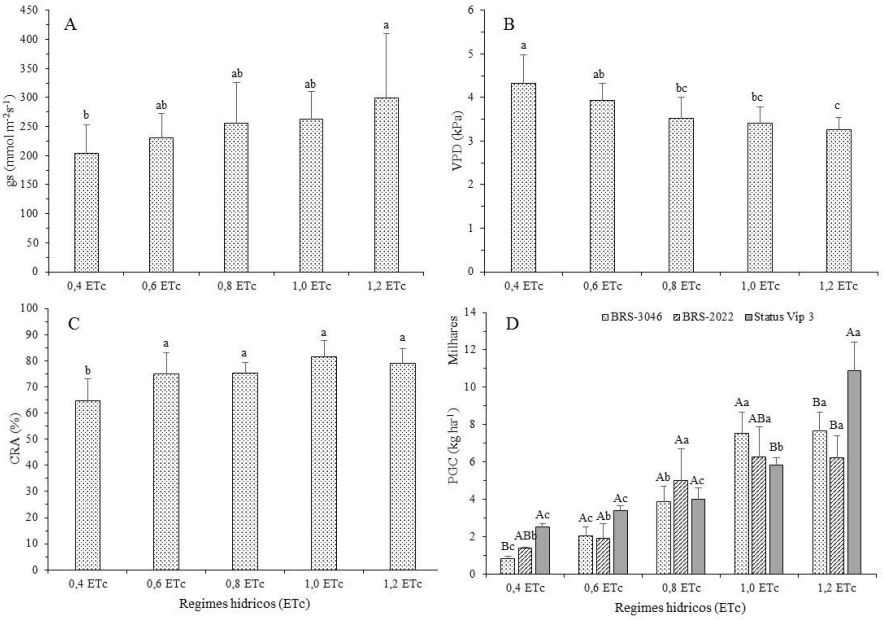



**Figura 5** – Condutância estomática (gs) (A), déficit de pressão de vapor (DPV) (B), conteúdo relativo de água (CRA) (C) e produtividade de grãos (PG) (D) em resposta a aplicação de cinco regimes hídricos (RH) em três híbridos de milho (BRS 3046, BRS 2022 e Status VIP3). Teresina, PI, 2019. Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas (RH) e maiúsculas (híbridos).

Quanto ao CRA, em condição de elevada disponibilidade de água no solo, os conteúdos relativos de água na folha variaram de 79,0% (120% ETc) a 81,5% (100%ETc), enquanto com a reposição de apenas 40% ETc para as plantas o CRA reduziu-se para 64,7% (Figura 5C). Porém, comparando-se as plantas submetidas aos tratamentos com reposição de 60, 80, 100 e 120% da ETc observou-se que não houve diferença estatística significativa entre os RH. Redução no CRA em milho sob condição de restrição hídrica no solo também foi observada por Rossini et al. (2015).

O CRA pode refletir diretamente o crescimento real e o estado de desenvolvimento de uma cultura e é o melhor índice para indicar o status de conservação da água nas folhas. Segundo Xingyang et al. (2020), mudança no CRA pode refletir o grau de estresse das plantas em certa medida, e é fácil de observar, uma vez que a folha é o órgão mais importante na assimilação e transpiração das plantas, portanto, o órgão mais sensível ao estresse hídrico.

Maiores médias de produtividade de grãos (PG) foram observadas em condição de elevada disponibilidade de água no solo (100 e 120% ETc) na comparação com os tratamentos com reposição das frações 40, 60 e 80 ETc, ou seja, a PG foi inferior em condições de deficiência hídrica no solo (Figura 5D). Com reposição de 120% ETc, o híbrido VIP3 apresentou a maior média de PG (10.898,3 kg $ha^{-1}$) diferindo dos demais híbridos. Os híbridos BRS 3046 e BRS 2022 mostraram menor PG com valores de 7.653,8 e 6.214,5 kg $ha^{-1}$, respectivamente e foram estatisticamente iguais. Em condição de déficit hídrico (0,4 e 0,6 ETc) o VIP3, também apresentou a maior média de PG diferindo estatisticamente dos demais híbridos.

O nível de disponibilidade de água do solo para a planta afeta diretamente a produtividade de grãos do milho. Elmetwalli e Tyler (2020) constataram que o estresse hídrico reduziu fortemente o rendimento de grãos. Segundo estes autores, as maiores produtividades de grãos (8,4 e 9,4 Mg $ha^{-1}$) foram obtidas com aplicação da lâmina correspondente a reposição de 1,25 ETc, nas safras de 2015 e 2016, respectivamente. Mansouri-Far et al. (2010) também observaram que a produtividade de grãos diminui com o aumento do nível de estresse hídrico sob irrigação deficitária, o que é corroborado pelos resultados obtidos nesse estudo. O RH com reposição de 120% da ETc foi de 618,6 mm (Tabela 2). Estudos indicam que, dependendo das condições do solo, clima, época de semeadura e híbrido, o milho requer uma lâmina de irrigação de 500 a 800 mm durante o ciclo vegetativo para atingir o máximo rendimento de grãos (DOORENBOS; KASSAN, 1994; ZANETTI et al., 2019; AVILEZ et al., 2020).

Dentre os IVs avaliados, a exceção do RGD, todos os demais apresentaram efeito significativo ($0,05 \leq p \leq 0,001$) em resposta aos RH (Tabela 5). Esse resultado indica preliminarmente que os IVs com teste F significativo possuem potencial para detecção do status hídrico do milho. Entretanto, os IVs promissores selecionados foram aqueles que apresentaram os melhores níveis de correlação com as medidas de gs, DPV, CRA e PG efetuadas em campo.

Em relação aos híbridos verificou-se efeito significativo apenas para os IVs CI-RED, CVI, EXGR, GCI, GCI, GNDVI, GRVI, MEXG, MNGRD, NDRE, NGRD, TCARI, TCARI-OSAVI, TCARI-RE-OSAVI, TCARI-RE, TGI e WDRVI ($0,01 \leq p \leq$

0,001). Por outro lado, observou-se efeito de interação RH versus H apenas para os IVs CVI, MEXG e TGI ($p \leq 0,05$).

**Tabela 5** – Teste F para os índices de vegetação (IV) em resposta aos regimes hídricos (RH), híbridos (H) e interação RH versus H avaliados no estudo. Teresina, PI, 2019.

| IV | RH | H | RH*H | IV | RH | H | RH*H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CI-RED | *** | *** | ns | OSAVI | *** | ns | ns |
| CVI | *** | *** | * | PSND | *** | ns | ns |
| EVI | *** | ns | ns | RDVI | *** | ns | ns |
| EVI-2 | *** | ns | ns | RECI | *** | ns | ns |
| EXGR | * | *** | ns | RGD | ns | ns | ns |
| GCI | * | ** | ns | RVI | *** | ns | ns |
| GLI | * | *** | ns | SAVI | *** | ns | ns |
| GNDVI | *** | *** | ns | SCCCI | *** | ns | ns |
| GRVI | *** | *** | ns | TCARI | *** | *** | ns |
| MEXG | * | *** | * | TCARI-OSAVI | *** | *** | ns |
| MNGRD | * | ** | ns | TCARI-RE-OSAVI | ** | *** | ns |
| NDRE | *** | *** | ns | TCARI-RE | ** | *** | ns |
| NRDEI | * | ns | ns | TGI | *** | *** | * |
| NDVI | ** | ns | ns | WDRVI | *** | ** | ns |
| NGRD | * | *** | ns | | | | |

Níveis de significância pelo teste F: ***: p<0,001; **: p<0,01; *: p<0,05; ns: não significativo.

A gs apresentou correlação significativa com diversos IVs. Considerando-se como promissores os IVs com r≥0,8 (BALLESTER et al., 2019; ELMETWALLI; TYLER, 2020), destacam-se os cinco IVs mais promissores para detecção do status hídrico do milho: NDVI (r=0,946; p<0,01), PSND (r=0,908; p<0,01), TCARI-RE (r= -0,928; p<0,01), TCARI-OSAVI-RE (r= -0,919; p<0,01) e WDRVI (r=0,919; p<0,01). Por outro lado, para o DPV sete índices destacaram-se: GCI (r=0,936; p<0,01), MNGRD (r= -0,940; p<0,01), NDVI (r= -0,951; p<0,01), NGRD (r= -0,941; p<0,01), TCARI-RE (r=0,938; p<0,01), TCARI-RE-OSAVI (r= -0,928; p<0,01) e WDRVI (r= -0,905; p<0,01) (Tabela 6).

Estudos indicam que os IVs que utilizam bandas espectrais com comprimentos de onda na região NIR, são mais adequados para detectar o estado hídrico de culturas sob condições de estresse hídrico do solo (ELSAYED et al., 2015). No presente estudo, os IVs NDVI, PSND, TCARI-OSAVI-RE, WDRVI, GCI e TCARI-RE-OSAVI se enquadram na condição estabelecida por Elsayed et al.( 2015), além disso, os IVs que utilizam bandas espectrais na região do visível (RGB)

TCARI-RE, MNGRD e NGRD mostram-se também adequados para detectar o estado hídrico na cultura do milho.

**Tabela 6 –** Correlação de Pearson entre os índices de vegetação (IVs) avaliados e a condutância estomática (gs), déficit de pressão de vapor na folha (DPV), conteúdo relativo de água na folha (CRA) e a produtividade de grãos (PG). Teresina, PI, 2019.

| IVs | Gs | DPV | CRA | PG | IVs | gs | DPV | CRA | PG |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CI-RED | 0,88 ** | -0,84 ** | 0,740 Ns | 0,949 ** | OSAVI | 0,845 ** | -0,81 ** | 0,714 ns | 0,950 ** |
| CVI | 0,326 ns | -0,23 ns | 0,134 ns | 0,630 ns | PSND | 0,908 ** | -0,877 ** | 0,803 ns | 0,920 ** |
| EVI | 0,696 ns | -0,65 ns | 0,539 ns | 0,905 ** | RDVI | 0,722 ns | -0,67 ns | 0,563 ns | 0,911 ** |
| EVI-2 | 0,690 ns | -0,64 ns | 0,522 ns | 0,897 ** | RECI | 0,769 ns | -0,688 ns | 0,558 ns | 0,900 ** |
| EXGR | 0,811 ** | -0,88 ** | 0,882 ** | 0,520 ns | RGD | -0,026 ns | 0,168 ns | -0,254 ns | 0,288 ns |
| GLI | 0,765 ns | -0,83 ** | 0,861 ** | 0,447 ns | RVI | 0,882 ** | -0,846 ** | 0,740 ns | 0,949 ** |
| GCI | -0,86 ** | 0,936 ** | -0,92 ** | -0,62 ns | SAVI | 0,720 ns | -0,673 ns | 0,557 ns | 0,909 ** |
| GNDVI | 0,763 ns | -0,712 ns | 0,605 ns | 0,915 ** | SCCCI | 0,687 ns | -0,597 ns | 0,456 ns | 0,868 ** |
| GRVI | 0,736 ns | -0,676 ns | 0,573 ns | 0,894 ** | TCARI | -0,798 ns | 0,743 ns | -0,627 ns | -0,927 ** |
| MEXG | -0,479 ns | 0,365 ns | -0,214 ns | -0,737 ns | TCARI-OSAVI | -0,816 ** | 0,766 ns | -0,653 ns | -0,934 ** |
| MNGRD | 0,872 ** | -0,940 ** | 0,925 ** | 0,635 ns | TCARI-RE | -0,928 ** | 0,938 ** | -0,861 ** | -0,939 ** |
| NDRE | 0,796 ns | -0,730 ns | 0,603 ns | 0,923 ** | TCARI-RE-OSAVI | -0,919 ** | 0,928 ** | -0,851 ** | -0,943 ** |
| NDREI | 0,169 ns | -0,278 ns | 0,394 ns | 0,487 ns | TGI | -0,636 ns | 0,562 ns | -0,452 ns | -0,844 ** |
| NDVI | 0,946 ** | -0,951 ** | 0,875 ** | 0,928 ** | WDRVI | 0,919 ** | -0,905 ** | 0,813 ** | 0,948 ** |
| NGRD | 0,877 ns | -0,941 ** | 0,916 ** | 0,640 ns | | | | | |

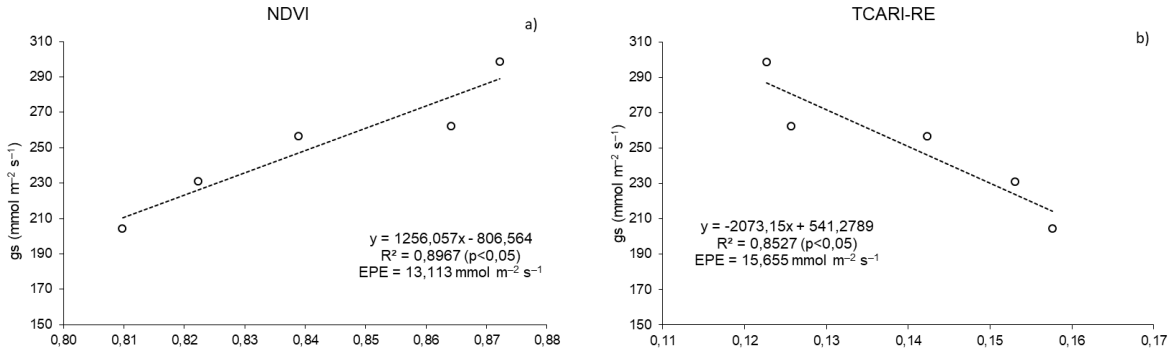
Níveis de significância pelo teste t: **: p<0,01; *: p<0,05; $^{ns}$: não significativo.

O CRA apresentou correlação significativa com vários IVs avaliados. Supondo que os IVs com r≥0,8 sejam promissores (BALLESTER et al., 2019; ELMETWALLI; TYLER, 2020), destacam-se três IVs mais promissores para detecção do CRA nas folhas: GCI (r = -0,920; p <0,01), MNGRD (r = 0,925; p <0,01) e NGRD (r = 0,916; p <0,01), com destaque para os índices MNGRD e NGRD que utilizam bandas

espectrais na região RGB. Correlações significativas foram encontradas para a maioria dos índices de vegetação e PG com coeficientes de correlação variando de 0,868 a 0,950 (Tabela 6). A definição da correlação entre os IVs de culturas e a produtividade é relevante, uma vez que, se houver correlação, é possível prever a produtividade de modo simples, rápido, barato e não destrutivo (HOYOSVILLEGAS; FRITSCHI, 2013).

Apenas os indices CVI, MEXG, NDREI e RGD não foram correlacionados com nenhum dos parâmetros medidos em campo. Os coeficientes de correlação variaram de -0,134 a -0,951. Para fins de maior clareza, apenas as relações entre os IVs e os parâmetros fisiologicos e a produtividade de grãos de milho com os maiores valores de $R^2$ são mostradas nas Figuras 6 e 7.

Os IVs NDVI e TCARI-RE foram os que promoveram melhores estimativas da gs, com $R^2$ variando de 0,8527 ($p<0,05$) a 0,8967 ($p<0,05$) e EPE de 13,113 mmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ a 15,655 mmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ (Figura 6a e 6b). Este baixo erro mostra que o uso dos IVs NDVI e TCARI-RE são adequados para a detecção do estresse hídrico. Em estudo avaliando as respostas do milho ao estresse hídrico nas mudanças na estrutura do dossel (área foliar) e no conteúdo de clorofila com base em IVs de imagens multiespectrais obtidas por ARP, nos anos de 2018 e 2019, Zhang et al. (2021) relataram que o NDVI apresentou correlação altamente positiva com a gs com os valores de r de 0,61 e 0,64 ($p<0,001$), respectivamente. Diferente do presente estudo, nenhuma correlação foi verificada pelos autores entre o TCARI-RE e a gs.



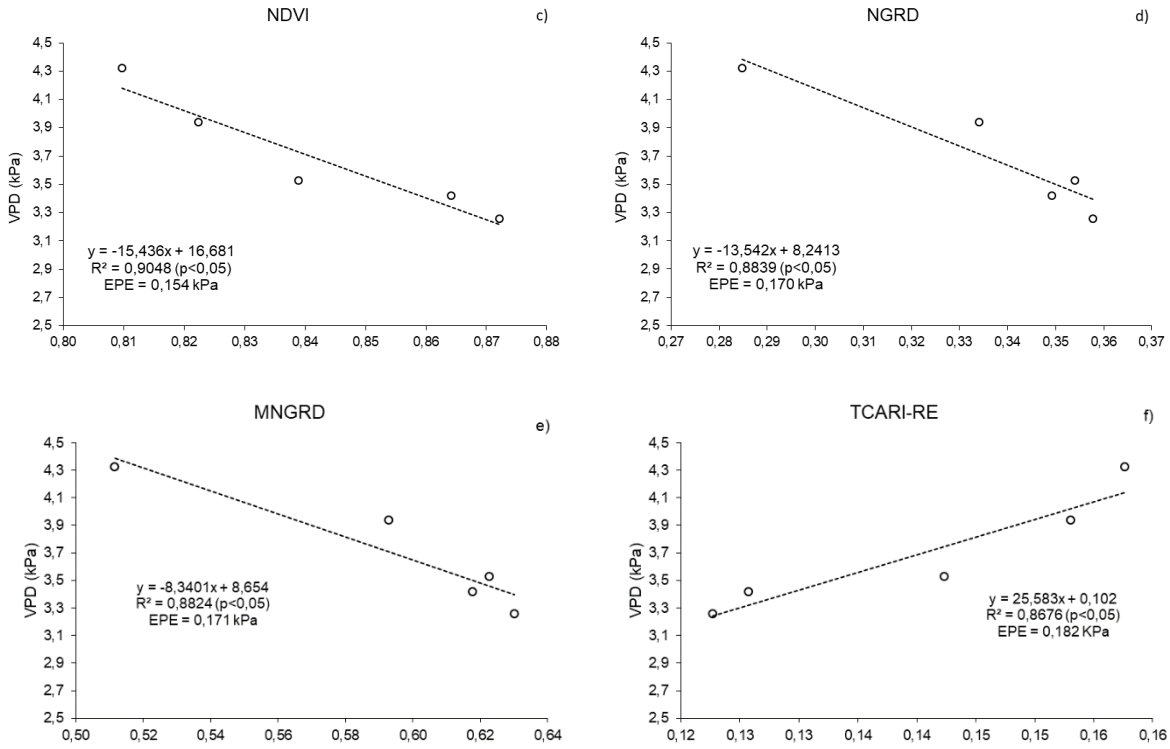



**Figura 6**. Modelos de regressão linear para os parâmetros fisiológicos de gs e DPV em função dos indices de vegetação promissores. Níveis de significância (teste t): ns: não significativo; *: p<0,05; **: p<0,01; ***: p<0,001.

Os índices NDVI, NGRD, MNGRD e TCARI-RE foram os que promoveram melhores estimativas do DPV, com $R^2$ variando de 0,8824 a 0,9048 (p<0,05) e EPE de 0,154 kPa a 0,170 kPa (Figuras 6c, 6d, 6e e 6f). Em termo de maior $R^2$ e menor SSE o NDVI demostrou ser sensível ao DPV, em relação aos índices (RGB) NGRD, MNGRD e TCARI-RE. Observa-se que o aumento da disponibilidade hídrica no solo causou redução do DPV e aumento nos valores de NDVI e NGRD nos tratamentos com aplicação dos RH 100 e 120% ETc. Portanto, o NDVI e NGRD apresentaram correlação com os RH e, consequentemente, com o DPV.

Os resultados apresentados na Figura 7a mostraram uma correlação positiva, com $R^2$ de 0,8559 entre as medições de CRA realizadas no nível de campo e estimativas do CRA pelo índice MNGRD. A relação encontrada através da regressão linear com MNGRD produziu um EPE de 2,894%. Por sua vez, uma correlação negativa, com $R^2$ de 0,8553 foi encontrada entre as medidas de campo do CRA e as estimadas pelo GCI, com EPE de 2,810% (Figura 7b). Já o índice NGRD, apresentou correlação positiva, com $R^2$ de 0,8411 entre as medições de CRA

obtidas no nível de campo e estimadas por tal índice, com EPE de 2,944% (Figura 7c)

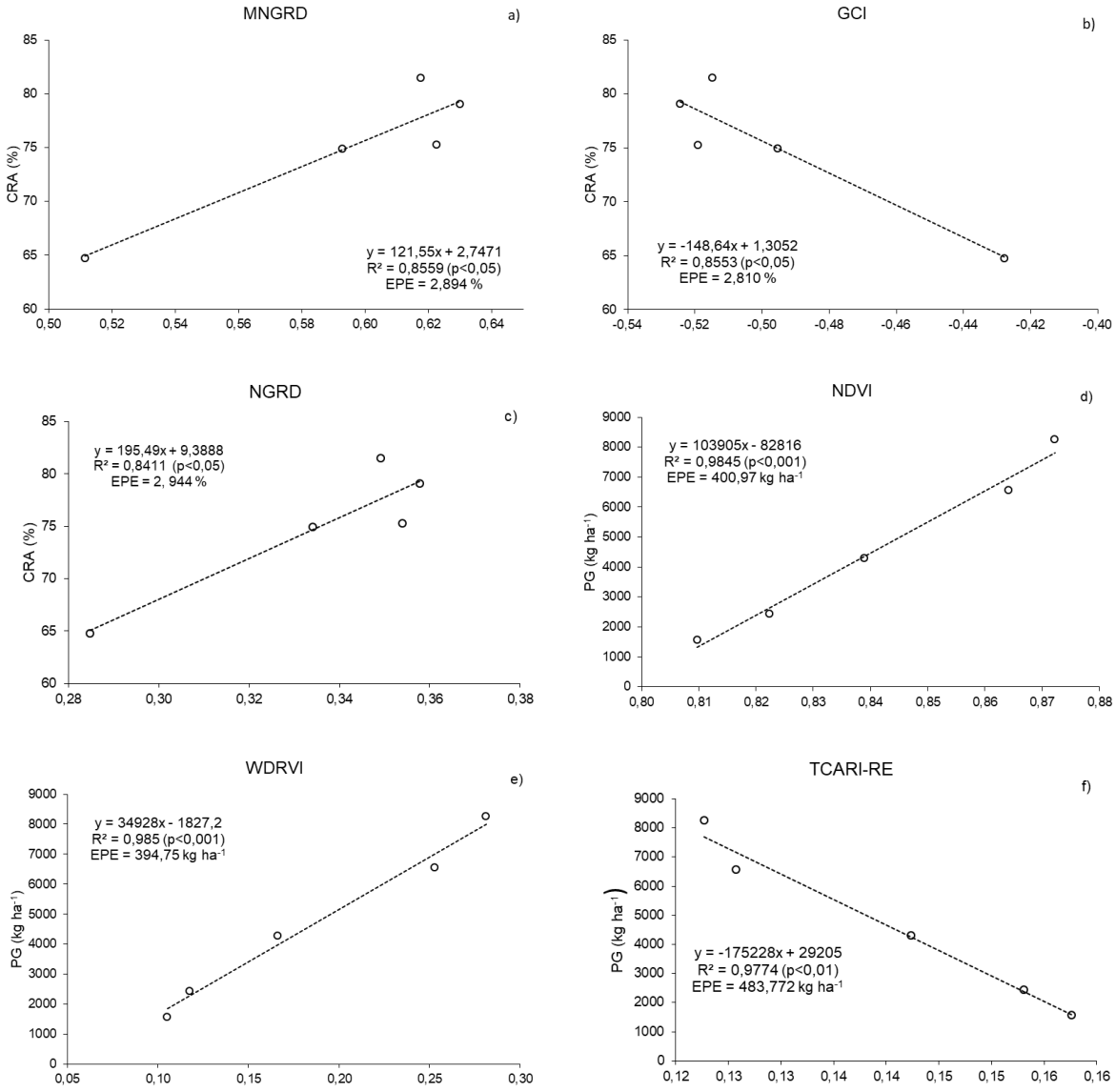


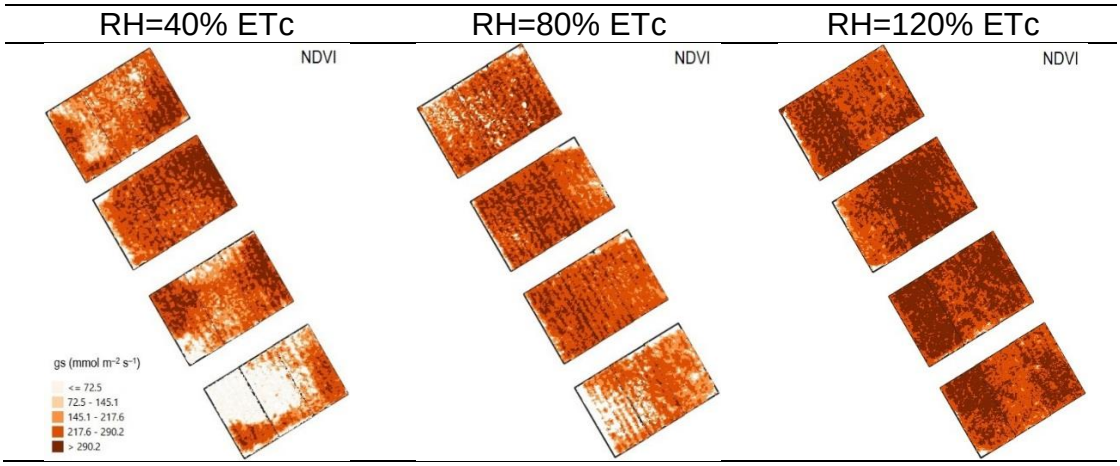

**Figura 7**. Modelos de regressão linear para o conteúdo relativo de água e a produtividade de grãos função dos indices de vegetação promissores. Níveis de significância (teste t): ns: não significativo; *: p<0,05; **: p<0,01; ***: p<0,001.

Para a produtividade de grãos, os IVs NDVI, WDRVI e TCARI-RE promoveram melhores estimativas, com $R^2$ de 0,98 (p<0,001) e EPE de 394,75 kg $ha^{-1}$ a 483,77 kg $ha^{-1}$ (Figuras 7 d, 7e e 7f). Observou-se aumento linear positivo da produtividade com o incremento do NDVI e do WDRVI, já para TCARI-RE observa-se correlação linear negativa. Percebe-se claramente que a disponibilidade hídrica no solo foi determinante para o aumento da produtividade de grãos do milho,

demonstrando que as plantas cultivadas sob melhores condições hídricas (100 e 120% ETc) houve adequada disponibilidade de água à cultura.

Como os índices NDVI, MNGRD e WDRVI apresentaram melhor correlação com as medidas dos parâmetros fisiológicos (gs, DPV e CRA) e PG de milho realizadas no nível de campo, os mapas de variabilidade espacial de gs, DPV, CRA e PG foram elaborados apenas para tais IVs. A Figura 8 mostra a variabilidade espacial da gs, DPV, CRA e PG, gerado com os índices com melhor desempenho na estimativa de tais parâmetros em resposta aos RH avaliados (RH=40, RH=80 e RH=120% ETc).

Os mapas de gs em RH=40% ETc e RH=80% ETc mostram áreas com maior predominância de zonas com gs abaixo de 145,1-217,6 mmol $m^{-2}s^{-1}$, enquanto sob RH=120%ETc, as áreas com maior predominância de gs estão acima de 217,6 - 290,2 mmol $m^{-2}s^{-1}$ (Figura 8), ou seja, nota-se menor variabilidade espacial dos valores de gs. Os mapas de DPV em RH=80% ETc e RH=120%ETc mostram áreas com maior predominância de DPV ≤ 4,2 kPa, enquanto sob RH=40%ETc, mesmo apresentando uma ampla faixa com DPV ≤ 4,2 kPa apresenta também uma zona considerável com valores acima de 7,9 - 9,8 kPa.



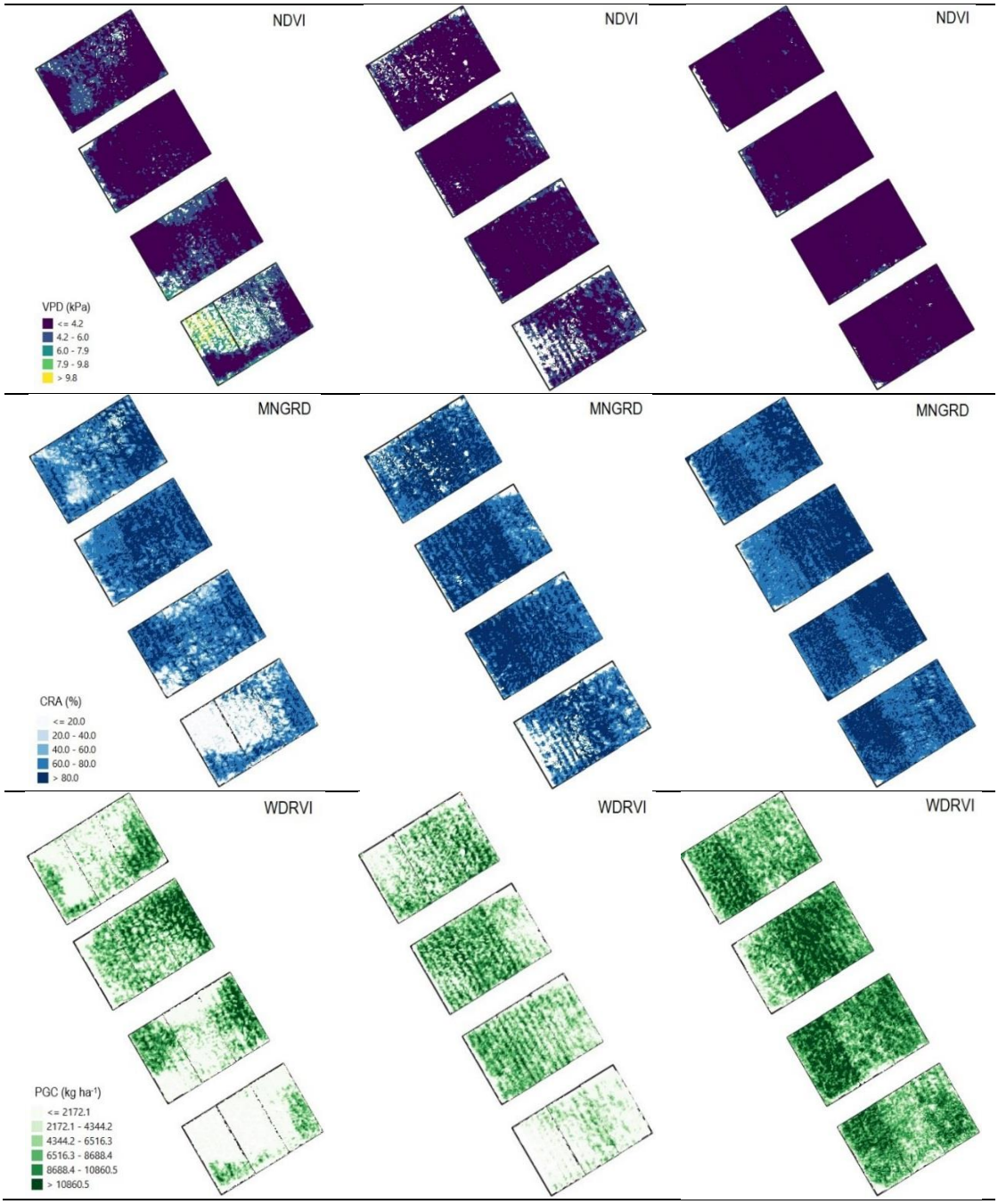



**Figura 8**. Mapas de condutância estomática (gs), déficit de pressão de vapor (DPV), conteúdo relativo de água na folha (CRA) e produtividade de grãos (PG) com base nos índices de vegetação de melhor desempenho estatístico.

Analisando os mapas de CRA observa-se que em RH=40%ETc os valores de CRA concentraram-se principalmente na faixa de 40 – 60%, enquanto sob RH=80%ETc e RH=120% ETc, as áreas com maior predominância de valores mais alto de CRA estão acima de 60 – 80% o que induz a afirmação de que quase não houve estresse hídrico nesses tratamentos. O CRA é o melhor índice para indicar o status de conservação de água nas folhas.

A mudança no CRA pode refletir o grau de deficiência hídrica da planta em certa medida, e é fácil de observar. Assim sendo, o CRA desempenha papel insubstituível na detecção de estresse hídrico nas culturas, sobretudo no sensoriamento remoto do monitoramento de estresse hídrico (ULLAH et al., 2012; ZHAO et al., 2016). A redução do CRA pode levar a um aumento na temperatura das folhas, o que pode provocar o fechamento de estômatos e uma redução na taxa de fotossintética líquida (XINGYANG et al., 2020).

Em relação à variabilidade espacial da PG, verifica-se que nas parcelas sob RH=0,4ETc os valores de PG distribuíram-se principalmente na faixa de 2.171,1 - 4.344,2 kg $ha^{-1}$, enquanto sob RH=80%ETc destacam áreas com maior predominância de rendimento na faixa 4.344,2 - 6.516,3 kg $ha^{-1}$. Por outro lado, com a imposição do RH=120%ETc observa-se que os valores de produtividade se concentram, sobretudo, na faixa de 8.688,4 - 10.860,5 kg $ha^{-1}$.

## 4. CONCLUSÕES

O aumento na disponibilidade de água no solo induz incremento na condutância estomática, conteúdo relativo de água na folha e produtividade de grãos e reduz o déficit de pressão de vapor na folha.

Os índices de vegetação NDVI, TCARI-RE, NGRD, MNGRD e GCI são promissores para a detecção do estado hídrico, enquanto os IVs NDVI, TCARI-RE e WDRVI são promissores para a estimativa da produtividade de grãos do milho.

Os índices RGB (TCARI-RE, NGRD e MNGRD) são promissores para a detecção do estado hídrico, e o TCARI-RE é promissor para estimativa da produtividade de grãos do milho.

Os mapas dos IVs NDVI, MNGRD e WDRVI mostram elevada correlação espacial nos parâmetros de gs, VDP, CRA e PG na cultura do milho em resposta aos regimes hídricos aplicados, indicando potencial de aplicação das imagens aéreas adquiridas por ARPs para detecção do status hídrico em milho em condições de campo.

## 5. REFERÊNCIAS


ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 300p. 1998. Drainage and Irrigation Paper, 56.

AVILEZ, A. M. A. et al. Necessidade hídrica e de irrigação do milho em função da data de semeadura no município de Irecê-Bahia. **In:** XXIX CONGRSSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM e IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SALINIDADE, INOVAGRE Meeting Virtual, 2020.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. et al. Water status evaluation of maize cultivars using aerial images. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 2, p. 432 – 442, 2021.

ARAÚJO, S.A.C.A. et al. Características fotossintéticas de genótipos de capim-elefante anão (Pennisetum purpureum Schum.) em estresse hídrico. **Acta Scientiarum Animal Sciences**, Maringá, v.32, n.1, p.1-7, 2010.

BALLESTER, C. et. al. Monitoring the effects of water stress in cotton using the green red vegetation index and red edge ratio. **Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 873, 2019.

BALUJA, J. et al. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). **Irrigation Science**, v. 30, n. 6, p. 511-522, 2012.

BASTOS, E. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. **Boletim Agrometeorológico de 2018 para o Município de Teresina, Piauí.** Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2019. 34 p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 266).

BENDIG, J. et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. **International Journal of Applied Earth Observations**, v. 39, p. 79–87, 2015.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p.

BLACKBURN, G.A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, p. 273–285, 1998.

BRITO, M. E. B. et al. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, 2013.

BURGOS-ARTIZZU, X.P. et al. Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 75, p. 337–346, 2011.

CARDOSO, M. J. et al. **Rendimento de grãos, componentes de rendimento e eficiência de uso da água de híbridos de milho em condições climáticas contrastantes**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2012. 23p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 103).

DAUGHTRY, C.S.T. et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 2, p. 229-239, 2000.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

ELMETWALLI, A. H.; TYLER, A. N. Estimation of maize properties and differentiating moisture and nitrogen deficiency stress via ground–Based remotely sensed data. **Agricultural Water Management**, v. 242, p. 106413, 2020.

Elsayed, S. et al. Comparing the performance of active and passive reflectance sensors to assess the normalized relative canopy temperature and grain yield of drought stressed barley cultivars. **Field Crops Research,** n.177, p.148-160, 2015

FERREIRA, E. et al. ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. 682 Applied Mathematics 2014, 5, 2952-2958.

GITELSON, A. A. et al. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, L08403, p. 1-4, 2005.

GITELSON, A.A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, v. 161, p. 165-173, 2004.

HABOUDANE, D. et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 416-426, 2002.

HAMUDA, E. et al. A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 125, p. 184–199, 2016.

HASSAN, M.A. et al. Time-Series Multispectral Indices from Unmanned Aerial Vehicle Imagery Reveal Senescence Rate in Bread Wheat. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 809-818, 2018.

HOYOS-VILLEGAS, V.; FRITSCHI, F. B. Relationships among vegetation indices derived from aerial photographs and soybean growth and yield. **Crop Science**, v. 53, n. 6, p. 2631-2642, 2013.

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.

HUNT, E.R.; DAUGHTRY, C.S.T. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, p. 5345–5376, 2018.

HUNT, E.R.J. et al. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. **Agronomy Journal**, v. 103, p. 1090–1099, 2011.

HUNT, E.R.J. et al. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. **International Journal of Applied Earth Observations**, v. 21, p. 103–112, 2013.

IHUOMA, S.O.; MADRAMOOTOO, C.A. Recent advances in crop water stress detection. **Computers and Electronics in Agriculture,** n.141, p. 267–275, 2017.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Dados históricos: 2019. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acessado em: 30 novembro, 2021.

JIANG, Z. et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3833-3845, 2008.

LI, L. et al. Evaluating the Crop Water Stress Index and its correlation with latent heat and $CO_2$ fluxes over winter wheat and maize in the North China plain. **Agric. Water Manag**., v. 97, p.1146–1155, 2010.

MANSOURI-FAR, C. et al. Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 1, p. 12-22, 2010.

MELO, F.B. et al. **Levantamento, zoneamento e mapeamento pedológico detalhado da área experimental da Embrapa Meio-Norte em Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2014. 47 p. (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-866X; 231).

MEYER, G.E.; CAMARGO NETO, J. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 63, n. 2, p. 282–293, 2008.

MICASENSE. How to Process MicaSense Sensor Data in Pix4D. 2020. Disponível em: How to Process MicaSense Sensor Data in Pix4D – MicaSense Knowledge Base

PANIGADA, C. et al. Fluorescence, PRI and canopy temperature for water stress detection in cereal crops. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,** n. 30, p. 267-278, 2014.

QGIS Development Team. QGIS User Guide, Release 2.18: QGIS Project, 2016.

RAPER, T.B.; VARCO, J.J. Canopy-scale wavelength and vegetative index sensitivities to cotton growth parameters and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v. 16, p. 62-76, 2015.

RONDEAUX, G. et al. Optimization of soil adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, p. 95–107, 1996.

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

ROSSINI, M. et al. Discriminating Irrigated and Rainfed Maize with Diurnal Fluorescence and Canopy Temperature Airborne Maps. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, n. 4, v.2, p. 626-646, 2015.

SANJEREHEI, M.M. Assessment of spectral vegetation indices for estimating vegetation cover in arid and semiarid shrublands. **Range Management Agroforest**, v. 35, p. 91–100, 2014.

SILVA, C. B. et al. (2017) Trocas gasosas do milho verde submetido a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. In: IV INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING. XXVII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem (CONIRD). III Simpósio Latino-Americano de Salinidade (SBS). 8 p. doi: 10.7127/iv-inovagri-meeting-2017-res3790594.

SOUZA, E.J.et al. Características da espiga do milho doce produzido sob diferentes lâminas de irrigação e doses nitrogenadas. **Revista Engenharia na agricultura** – REVENG, v.24, n.1, p.50-62, 2016.

SRIPADA, R.P. et al. Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 968–977, 2006.

TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, p. 127-150, 1979.

ULLAH, S. et al. An accurate retrieval of leaf water content from mid to thermal infrared spectra using continuous wavelet analysis. **Science of the total environment**, v. 437, p. 145-152, 2012.

VINCINI, M.; FRAZZI, E.; D´ALESSIO, P. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. **Precision Agriculture**, v. 9, p. 303–319, 2008.

XINGYANG, S. et al. Stomatal limitations to photosynthesis and their critical Water conditions in different growth stages of maize under water stress. **Agricultural Water Management**, v. 241, p. 106330, 2020.

WANG, S.; AZZARI, G.; LOBELL, D.B. Crop type mapping without field-level labels: Random forest transfer and unsupervised clustering techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 222, p. 303–317, 2019.

ZAIONTZ, C. Real Statistics Using Excel. Disponível em <www.real-statistics.com>. Acesso em: 05 de mar. 2020.

ZANETTI, W. A. L.; COSMO, B. M. N.; GALERIANI, T. M. Irrigação na cultura do milho: qual sistema usar? In: **VIII JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica**, 2019.

ZHANG, L. et al. Evaluating the sensitivity of water stressed maize chlorophyll and structure based on UAV derived vegetation indices. **Computers and Electronics in Agriculture,** v.1, p. 1-9, 2021.

ZHANG, L. et al. Mapping Maize Water Stress Based on UAV Multispectral Remote Sensing. **Remote Sensing**, v.11, n. 6, p. 605-629, 2019.

ZHAO, S. et al. Estimating and validating wheat leaf water content with three MODIS spectral indexes: A case study in Ningxia Plain, China. **Journal of Agricultural Science and Technology**, n.18, v. 2, p. 387-398, 2016.

ZHONG, L. et al. Deep learning based multi-temporal crop classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 221, p. 430–443, 2019.