

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANA CLAUDIA ROSA GUSTMAN

**CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA, MORFOLÓGICA E DETERMINAÇÃO DO
ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM LINHAGENS DE TRIGO**

PATO BRANCO

2022

ANA CLAUDIA ROSA GUSTMAN

**CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA, MORFOLÓGICA E DETERMINAÇÃO DO
ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM LINHAGENS DE TRIGO**

**Physiological, morphological characterization and determination of the leaf
area index in wheat lineages**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Fitotecnia da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Giovani Benin

PATO BRANCO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ANA CLAUDIA ROSA GUSTMAN

CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA, MORFOLÓGICA E DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM LINHAGENS DE TRIGO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Produção Vegetal.

Data de aprovação: 23 de Agosto de 2022

Dr. Giovani Benin, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Daniela Meira, Doutorado - Centro de Educação Superior Riograndense - Cesurg

Dr. Henrique Dos Santos Felipetto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Jose Abramo Marchese, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A meu esposo Samuel Pedro Bonatto Gustman e a
minha filha Ana Clara Rosa Gustman, com muito
amor, dedico.

AGRADECIMENTOS

Á Deus, pela vida e por me acompanhar em todos os momentos.

Ao meu esposo Samuel Pedro Bonatto Gustman, por todo incentivo e por acreditar em mim.

A minha filha Ana Clara Rosa Gustman, que somente com um olhar, me dá a força que preciso para continuar.

Aos meus pais Eloi Rosa e Adelaide Fontoura, minha irmã Ana Paula Rosa e meus sobrinhos Alanna Rosa Arendt e Lorenzo Rosa Arendt por todo apoio, amor e carinho a mim dedicado.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Giovani Benin, o qual me ensinou muito desde os meus primeiros dias de graduação.

Aos meus colegas do grupo de melhoramento genético da UTFPR que me auxiliaram na execução desse e de inúmeros trabalhos, sem a ajuda de todos, nada seria possível.

Agradecemos ao LabSolos pelo auxílio na construção do conhecimento e nas análises efetuadas para esse trabalho.

Aos professores da UTFPR pela oportunidade de aprendizado e pelo apoio para realização desta pesquisa.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O trigo (*triticum aestivum* L.) é uma das culturas mais importantes do mundo. Dessa forma, compreendendo a importância da cultura e a crescente demanda para acelerar o progresso de desenvolvimento de cultivares, estudos de parâmetros agrônômicos, morfológicos e fisiológicos tornaram-se fundamentais. O uso da radiação eletromagnética pelas plantas, depende da capacidade de interceptação do dossel, variando assim, de acordo com as características morfológicas. Dentre elas, a área foliar é uma variável crítica para a produtividade. A capacidade de interceptação da radiação solar pelas plantas é mensurada por meio do Índice De Área Foliar (IAF), definido como a relação entre a área foliar e a área de solo ocupada pelo cultivo. Atualmente, os métodos para avaliar IAF são trabalhosos e muitas vezes destrutivos. Diante do exposto, técnicas para determinação de IAF em larga escala são necessárias para satisfazer as demandas. Entre elas, o uso de sensoriamento remoto na estimativa de IAF é um método promissor. O objetivo do presente estudo é determinar o IAF em linhagens de trigo por métodos destrutivos e não destrutivos, e correlacionar com diferentes parâmetros agrônômicos e morfofisiológicos. O estudo foi realizado na safra agrícola 2020, nos locais de Campo Erê – SC, Renascença –PR e Pato Branco – PR. Foram avaliados doze genótipos de trigo desenvolvidos pelo Programa de Melhoramento Genético da UTFPR – Pato Branco. O delineamento foi de blocos ao acaso, com três repetições. Entre os parâmetros fisiológicos avaliou-se taxa fotossintética, transpiração e teor de nitrogênio foliar. O IAF foi determinado por método destrutivo e não destrutivo. Os parâmetros morfológicos avaliados foram: ângulo da folha bandeira, largura e comprimento da lâmina da folha bandeira, comprimento de bainha, comprimento de pedúnculo, altura de planta e massa seca. O rendimento de grãos, peso de mil sementes e peso do hectolitro foi determinado na colheita. Os dados foram submetidos a análise de variância conjunta, comparação de médias e análise de correlação. O IAF foi determinado pelo método destrutivo, variando de 2,13 a 4,86. Não foi possível estimar o IAF por método não destrutivo através de aprendizado de máquina. O IAF não apresentou correlação com os parâmetros morfofisiológicos. Portanto, não é viável a utilização desses métodos para estimativa desse parâmetro na cultura do trigo no estágio fenológico de enchimento de grãos. As linhagens UTFT170013, UTFT170500, UTFT170074, UTFT170242 e UTFT170588 apresentaram um bom desempenho para a maioria dos parâmetros avaliados e elevado rendimento, sendo promissoras para o desenvolvimento varietal.

Palavras-chave: Índice de área foliar; Sensoriamento Remoto; *Triticum aestivum*.

ABSTRACT

Wheat (*triticum aestivum* L.) is one of the most important crops in the world. Thus, understanding the importance of culture and the growing demand to accelerate the progress of cultivar development, studies of agronomic, morphological and physiological parameters have become fundamental. The use of electromagnetic radiation by plants depends on the interception capacity of the canopy, thus varying according to morphological characteristics. Among them, leaf area is a critical variable for productivity. The ability of plants to intercept solar radiation is measured using the Leaf Area Index (LAI), defined as the ratio between leaf area and soil area occupied by the crop. Currently, methods to assess IAF are laborious and often destructive. Given the above, techniques for large-scale LAI determination are necessary to satisfy the demands. Among them, the use of remote sensing to estimate LAI is a promising method. The objective of the present study is to determine the LAI in wheat lines by destructive and non-destructive methods, and to correlate it with different agronomic and morphophysiological parameters. The study was carried out in the 2020 agricultural season, in Campo Erê – SC, Renascença –PR and Pato Branco – PR. Twelve wheat genotypes developed by the Genetic Improvement Program of UTFPR – Pato Branco were evaluated. The design was randomized blocks, with three replications. Among the physiological parameters, photosynthetic rate, transpiration and leaf nitrogen content were evaluated. The LAI was determined by destructive and non-destructive methods. The morphological parameters evaluated were: flag leaf angle, width and length of the flag leaf blade, sheath length, peduncle length, plant height and dry mass. Grain yield, thousand seed weight and hectoliter weight were determined at harvest. Data were subjected to joint analysis of variance, comparison of means and correlation analysis. The LAI was determined by the destructive method, ranging from 2.13 to 4.86. It was not possible to estimate the LAI by non-destructive method through machine learning. The LAI showed no correlation with the morphophysiological parameters. Therefore, it is not feasible to use these methods to estimate this parameter in the wheat crop at the phenological stage of grain filling. The lines UTFT170013, UTFT170500, UTFT170074, UTFT170242 and UTFT170588 showed good performance for most of the evaluated parameters and high yield, being promising for varietal development.

Keywords: Leaf area index; Remote sensing, *Triticum aestivum*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escala de Zadoks de desenvolvimento da cultura de trigo.....	17
Figura 2 - Assinatura espectral de uma folha	23
Figura 3 - Processo de formação de imagens	Erro! Indicador não definido.
Figura 4 - Amostra em avaliação pelo Software ImageJ.....	30
Figura 5 – Correlação de Pearson entre os caracteres morfológicos: ângulo de folha bandeira (ANFB), índice de área foliar (IAF), massa seca (MS), altura de planta (AP), comprimento da bainha (COMB), comprimento do pedúnculo (COMP), largura da lâmina da folha bandeira (LARFB), e comprimento da lâmina da folha bandeira (COMPLFB); caracteres de rendimento: rendimento de grãos (RG), peso do hectolitro (PH) e peso de mil sementes (PMS); e, caracteres fisiológicos: eficiência do uso da água (WUE), taxa de fotossíntese (Pn), taxa de transpiração (E), e nitrogênio foliar (N%).	37
Figura 6 – Coeficientes de regressão linear entre índice de área foliar (IAF) determinado pelo método destrutivo x IAF determinado pelo método não destrutivo para os modelos de Linear Regression, Tree, Support vector machine (SVM) e Random Forest.....	39
Figura 7 - Rede de correlação entre os caracteres morfológicos: ângulo de folha bandeira (ANFB), índice de área foliar (IAF), massa seca (MS), altura de planta (AP), comprimento da bainha (COMB), comprimento do pedúnculo (COMP), largura da lâmina da folha bandeira (LARFB), e comprimento da lâmina da folha bandeira (COMPLFB); caracteres de rendimento: rendimento de grãos (RG), peso do hectolitro (PH) e peso de mil sementes (PMS); e, caracteres fisiológicos: eficiência do uso da água (WUE), taxa de fotossíntese (Pn), taxa de transpiração (E), e nitrogênio foliar (N%)	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise de variância conjunta (ANOVA) de 12 genótipos de trigo, para caracteres morfológicos: ângulo de folha bandeira (ANFB), índice de área foliar (IAF), massa seca (MS), altura de planta (AP), comprimento da bainha (COMB), comprimento do pedúnculo (COMP), largura da lâmina da folha bandeira (LARFB), e comprimento da lâmina da folha bandeira (COMPLFB); caracteres de rendimento: rendimento de grãos (RG), peso do hectolitro (PH) e peso de mil sementes (PMS); e, caracteres fisiológicos: eficiência do uso da água (WUE), taxa de fotossíntese (Pn), taxa de transpiração (E), e nitrogênio (N%).	34
Tabela 2 – Médias para índice de área foliar por método destrutivo de 12 genótipos (GEN) de trigo avaliados em três ambientes Campo Erê/SC (CAMP), Pato Branco/PR (PB) e Renascença/PR (REN).	36
Tabela 3 – Médias para 12 genótipos (GEN) de trigo avaliados em três localidades Campo Erê/SC (CAMP), Pato Branco/PR (PB) e Renascença/PR (REN), quanto aos parâmetros fisiológicos: taxa de fotossíntese (Pn, $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), transpiração (E, $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), nitrogênio foliar (N%). UTFPR, Pato Branco, 2022.	40
Tabela 4 – Médias para 12 genótipos (GEN) de trigo avaliados em três localidades Campo Erê/SC (CAMP), Pato Branco/PR (PB) e Renascença/PR (REN), quanto aos caracteres morfológicos: ângulo da folha bandeira (ANFB), altura de planta (ALT), largura da lâmina da folha bandeira (LARFB), comprimento da lâmina da folha bandeira (COMPLFB). UTFPR, Pato Branco, 2022.	42
Tabela 5 – Médias para 12 genótipos (GEN) de trigo avaliados em três localidades Campo Erê/SC (CAMP), Pato Branco/PR (PB) e Renascença/PR (REN), quanto aos caracteres comprimento de pedúnculo (COMP, cm) e massa seca (MS, g). UTFPR, Pato Branco, 2022.	45
Tabela 6 – Médias para 12 genótipos de trigo e três locais de cultivo (CAMP, PB e REN) para o caractere comprimento de bainha (COMPB). UTFPR, Pato Branco, 2022.	46
Tabela 7 – Médias para 12 genótipos (GEN) de trigo avaliados em três localidades Campo Erê/SC (CAMP), Pato Branco/PR (PB) e Renascença/PR (REN), quanto aos caracteres rendimento de grãos (RG, kg ha^{-1}), peso de hectolitro (PH, g hl^{-1}), peso de mil sementes (PMS, g). UTFPR, Pato Branco, 2022.	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	Área foliar
AP	Altura de planta
AS	Área de solo
ATP	Adenosina trifosfato
Cfa	Clima subtropical úmido
Chl a	Teor de clorofila a
Chl b	Teor de clorofila b
WUE	Eficiência de uso da água
IAF	Índice de área foliar
IRGA	Analisador infravermelho de gases
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
PR	Paraná
RGB	Red, Green, Blue
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SR	Sensoriamento remoto
UAVs	Unmanned Aerial Vehicles
UV	Radiação ultravioleta
VE	Vermelho extremo

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Kg ha ⁻¹	Quilogramas por hectare
mm/dia	Milimetro por dia
m ²	Metro quadrado
α	Alfa
m ⁻² s ⁻¹	Metro quadrado por segundo
ppm	Partes por milhão
λ	Comprimento de onda
μmol	Micromol
μm	Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	A cultura do trigo	16
2.2	Estádios de desenvolvimento e fatores que afetam a cultura	17
2.3	Índice de área foliar (IAF)	18
2.4	Radiação solar	19
2.5	Sensoriamento remoto na agricultura	22
2.6	SENSORIAMENTO REMOTO POR DRONES	24
2.7	APRENDIZADO DE MÁQUINAS	26
2.8	Aspectos fisiológicos	27
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	Linhagens e locais de condução dos ensaios	29
3.2	Índice De Área Foliar	29
3.2.1	Método destrutivo de determinação de área foliar.....	29
3.2.2	Método não destrutivo de determinação de índice de área foliar	30
3.3	Caracteres fisiológicos	32
3.4	Caracteres Morfológicos e de Rendimento	32
3.5	Análises de dados	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	Análise de variância conjunta	34
4.2	Caracterização de linhagens de trigo quanto ao índice de área foliar	35
(IAF)		
4.2.1	Índice de área foliar pelo método destrutivo	35
4.2.2	Índice de área foliar pelo método não destrutivo	37
4.3	Caracterização fisiológica de linhagens de trigo	39
4.4	Caracterização morfológica em linhagens de trigo	41
4.5	Rede de correlações	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

O trigo (*triticum aestivum* L.) é uma das culturas mais importantes do mundo. Cultivado mundialmente em uma área de mais de 220 milhões de hectares e, com um rendimento médio de grãos de 3,51 t ha⁻¹ (USDA, 2022). Desempenha um papel fundamental na segurança alimentar, fornecendo cerca de 20% das proteínas diárias e calorias alimentares consumidas globalmente (FAO, 2019).

Considerando a rápida taxa de aumento da população e mudanças na dieta, a demanda por trigo deve aumentar até 2050. Para suprir esta demanda, os ganhos genéticos para cultura teriam que apresentar uma taxa de 2,4% ao ano (RAY et al., 2013). No entanto, o ganho genético da cultura do trigo foi relatado como sendo 1,28% ano⁻¹ (WOYANN et al., 2018).

As metas de produção devem ser alcançadas melhorando a eficiência do uso de recursos, o potencial de rendimento e o desenvolvimento de práticas agronômicas sustentáveis (GERARD et al., 2020; ASSENG et al., 2019). Dessa forma, compreender quais características da planta possuem impacto sobre o rendimento, é uma etapa essencial para o desenvolvimento de novas estratégias em programas de melhoramento e devem ser explorados para que a produtividade do trigo acompanhe as demandas.

Dentre algumas características, a Área Foliar (AF) é uma variável crítica para a produtividade. Observa-se relação direta entre fatores abióticos (radiação solar e temperatura) e bióticos (pragas e doenças) com a AF (TAGLIAPIETRA et al., 2018). A arquitetura foliar, apresenta forma e tamanhos variados, o que resulta na modificação dos padrões de interceptação de luz, alterando a penetração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (FONTANA et al., 2012). Genótipos com arquitetura foliar ereta apresentam maior interceptação de radiação por unidade de área foliar, com conseqüente maior taxa de assimilação líquida, resultando em maior produtividade (ROMANO, 2005).

A capacidade de interceptação da radiação solar pelas plantas é mensurada por meio do Índice De Área Foliar (IAF), o qual é definido como a relação entre a área foliar de uma planta e a área de solo ocupada pela mesma (m²/m²) (HEIFFIG et al., 2006). Teoricamente, quanto maior o IAF, maior é a interceptação de radiação fotossinteticamente ativa interceptada e, assim, maior a capacidade de produzir fotoassimilados e melhorar sua translocação para órgãos de interesse. No entanto,

em um dado momento, a área foliar causa autossombreamento das partes inferiores das plantas. A melhoria da eficiência de uso de radiação solar é uma das estratégias apontadas para aumentar o rendimento de grãos em trigo (MOLERO *et al.*, 2019).

Durante o ciclo da cultura, o entendimento da evolução do IAF e seu efeito sobre a produtividade pode fundamentar práticas de manejo para que seja atingido IAF adequado para obtenção de altas produtividades (TAGLIAPIETRA *et al.*, 2018). Os métodos para determinar o IAF podem ser destrutivos ou não destrutivos. Os métodos que requerem a remoção das folhas são chamados de destrutivos, cujas desvantagens incluem a não aplicabilidade em estudos com grande número de amostras. Entre os métodos destrutivos, destacam-se o de discos com área conhecida e por equipamentos como Integrador de área foliar. Por outro lado, os métodos não destrutivos são realizados em plantas preservando sua integridade, e permitindo dessa forma, medições na mesma planta ao longo do seu desenvolvimento (BAKHSHANDEH *et al.*, 2011). De forma não destrutiva, pode-se determinar IAF por meio de sensoriamento remoto, por adoção de dispositivos como ceptômetro e analisadores de dossel de plantas (*Lincoln LAI 2200*) e por medições nas folhas (comprimento e largura) conforme o método descrito por Richter (2014).

Atualmente, os métodos para avaliar IAF permanecem trabalhosos, de alto custo, demandam tempo e muitas vezes são destrutivos. Diante do exposto, técnicas para determinação de IAF em larga escala são necessárias para satisfazer as demandas. Embora ainda em evolução, a aplicação de sensoriamento remoto na agricultura com o uso de pequenos VANTs (Veículos aéreos não tripulados) e sensores orbitais, trazem inúmeros benefícios, como avaliações rápidas, baixos custos operacionais, dados de alta resolução espacial, temporal e espectral e apresentam melhor acesso ao campo (ARAUS e CAIRNS, 2014).

As imagens fornecem informações úteis para melhoristas. Nos últimos anos houve um interesse crescente em plataformas de fenotipagem de alto rendimento (MOGHIMI *et al.*, 2020). A fenotipagem de campo baseada em imagens com plataformas de alto rendimento tem o potencial de impulsionar a descoberta de novos traços e facilitar a quantificação rotineira de características arquitetônicas, de desenvolvimento, fisiológicas e fenológicas das culturas (ARAUS e CAIRNS 2014).

Existe uma grande disponibilidade de instrumentos aéreos e orbitais que operam em resolução espacial para permitir estimativas de parâmetros de vegetação (PENG *et al.*, 2019). Uma variedade de sensores pode ser integrada às plataformas

UAV (sensor de fluorescência, câmera digital – RGB, câmera multiespectral, sensor térmico, entre outros). A característica da planta pode estar relacionada ao comprimento de onda da radiação espectral e à quantidade de energia luminosa emitida ou absorvida (SANKARAN *et al.*, 2015). Dessa forma, os sensores coletam informações através da radiação eletromagnética emitida pela planta.

O IAF pode ser estimado a partir de imagens aéreas, no entanto, é necessária uma ferramenta de processamento de dados para converter dados sensoriais em dados agrônômicos. Nesse sentido, o uso de UAV para determinação de IAF é uma aposta promissora, pois os dados de sensoriamento remoto possuem um potencial significativo para monitoramento da dinâmica da vegetação (KASAMPALIS *et al.*, 2018).

Inúmeros fatores podem influenciar o desenvolvimento de uma planta, entre eles, fatores fisiológicos são de grande importância. Em relação a trocas gasosas, sabe-se que o efluxo de CO₂ ocorre através dos estômatos no processo fotossintético, ocorrendo também o influxo da água, por meio da transpiração, sendo o movimento estomático o principal mecanismo de controle de trocas gasosas (SILVA *et al.*, 2015). Logo, alterações no fluxo hídrico, como período de seca, influenciará na condutância estomática, capacidade fotossintética e eficiência do uso da água, tendo como consequência a redução de desenvolvimento das folhas, o que leva a um menor IAF, resultando em menor ganho de biomassa (JALEEL *et al.*, 2009).

O conhecimento das características morfológicas e fisiológicas do trigo, bem como a influência do ambiente sobre elas, é muito importante para uma ampla gama de estudos agrícolas, como monitoramento do desenvolvimento e estimativa de rendimento. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo determinar o índice de área foliar por métodos convencionais e por sensoriamento remoto na cultura do trigo e correlacionar com diferentes parâmetros agrônômicos e morfofisiológicos, buscando estabelecer novos critérios de seleção de genótipos superiores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura do trigo

O trigo (*Triticum aestivum* L.) foi uma das primeiras espécies domesticadas pelo homem há cerca de 10.000 anos, no Oriente Médio (YADUN *et al.*, 2000). No Brasil, veio junto com os colonizadores europeus, contudo, somente a partir de 1950 adquiriu importância econômica (BRUM *et al.*, 2004).

A importância desse cereal, deve-se ao fato de apresentar múltiplos propósitos, sendo utilizado tanto na alimentação animal, na forma de pastagem e na composição de rações, quanto na alimentação humana, por ser fonte de nutrientes e fibras, tornando-se assim uma matéria-prima de diversos produtos na indústria alimentícia, como pães, biscoitos, bolos e massas, alimentos que fazem parte da base alimentar (SCHEUER *et al.*, 2011).

O trigo também apresenta um importante papel nas unidades de produção agropecuárias. Sua adoção na janela de inverno otimiza as possibilidades de rotação de culturas, garantindo um fluxo econômico e a sustentabilidade de muitas propriedades (GEWEHR, 2012). Além disso, melhora a dinâmica/controla de plantas daninhas, e incrementa a produtividade da cultura subsequente.

A China e a União Europeia caracterizam-se como os maiores produtores mundiais de trigo em grão, com produção de 134,25 e 126,69 milhões de toneladas, respectivamente (USDA, 2022). Atualmente, o Brasil produz em torno de 7 milhões de toneladas em uma área de cerca de 2 milhões de ha, com produtividade média de 2.803 kg ha⁻¹, ocupando a 15ª colocação na produção mundial. O cultivo do trigo concentra-se na região Sul do país, sendo o estado do Paraná o maior produtor nacional do cereal (3.401,8 milhões toneladas) (CONAB, 2022).

A demanda interna pelo grão, exige que todos os anos, o Brasil importe em média 60% do total consumido (na sua maioria vinda da Argentina), devido ao consumo interno ser maior do que a produção. No ano de 2021, o Brasil importou em torno de 6 milhões de toneladas, para suprir um consumo interno, que foi de aproximadamente 12 milhões de toneladas (CONAB, 2022).

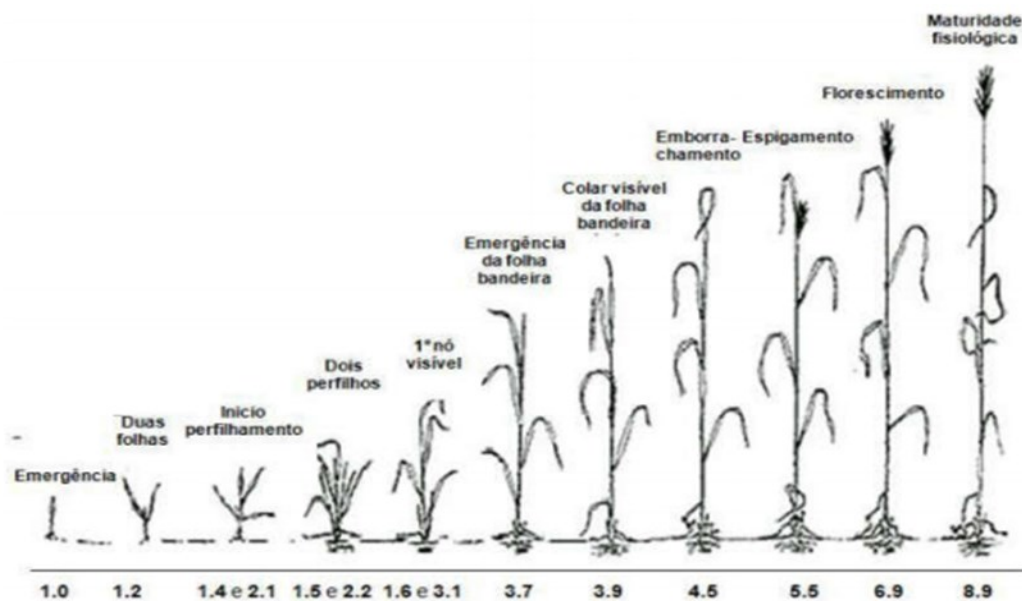
Para que o cultivo de trigo se estabeleça como uma atividade rentável, é necessário investir em um manejo que maximize a produtividade de forma sustentável (ARENHARDT, 2020). Levando em consideração a escolha da cultivar, insumos, técnicas de manejo e fatores ambientais, sendo necessário que se invista além de

qualidades agronômicas, nas qualidades industriais do produto final, ou seja, nos grãos entregues a moinhos, para que então, com maior qualidade, se tenha uma maior competitividade no mercado nacional (MAZZONCINI *et al.*, 2015).

2.2 Estádios de desenvolvimento e fatores que afetam a cultura

Pertencente à família Poaceae, do gênero *Triticum* e espécie *T. aestivum* L., o trigo é uma gramínea de ciclo anual que possui classificação botânica pertencente à classe Angiospermeae e subclasse Monocotiledonea. O desenvolvimento da cultura pode ser dividido em três principais fases: vegetativa, reprodutiva e enchimento de grãos, conforme escala de Zadoks (Figura 1).

Figura 1 - Escala de Zadoks de desenvolvimento da cultura de trigo



Fonte: FORNASIERI FILHO (2008)

O ciclo da cultura pode variar de 90 a 180 dias, dependendo do genótipo e das condições climáticas. As diferentes variedades se distinguem quanto a altura de planta, produtividade, proporção e qualidade de proteína, resistência a doenças e requerimentos climatológicos (SCHEUER *et al.*, 2011). No geral, para apresentar um bom perfilhamento, a temperatura média do ar ideal é abaixo de 25 °C durante o desenvolvimento inicial (EMBRAPA, 2014). A alta temperatura acelera o ciclo da cultura, diminuindo a quantidade de fotossíntese, conseqüentemente reduzindo o rendimento final (WANG *et al.*, 2015).

Durante a fase reprodutiva, a planta de trigo é mais suscetível aos danos por temperaturas extremas, causando esterilidade e reduzindo a formação de grãos (MOTA, 1989). Assim, deve-se respeitar o zoneamento agroclimático, a fim de evitar danos ocorridos por geadas, bem como o excesso de chuvas no período de colheita, que resultam em perda de produtividade e ainda perda na qualidade dos grãos.

Outro fator importante é a condição hídrica, apesar de a planta de trigo apresentar relativa tolerância ao déficit hídrico, devido sua maior eficiência no uso da água, alguns estádios fenológicos são mais sensíveis a essa condição, apresentando redução no rendimento quando ocorre falta de água nos estádios entre o florescimento e grão leitoso (BOSCHINI, 2010).

O déficit hídrico durante o estágio de enchimento de grãos acelera a senescência das folhas de trigo e reduz significativamente o rendimento de grãos (LIU *et al.*, 2016). O déficit hídrico pode ainda causar perda da área foliar, Richards (1983) observou que em casos de limitação de água a planta tende a reduzir sua área foliar, resultando em melhora na eficiência do uso da água e conseqüentemente, melhora no potencial de produtividade da planta.

2.3 Índice de área foliar (IAF)

O Índice De Área Foliar (IAF) representa a eficiência na interceptação e utilização da radiação solar pelas plantas, sendo uma importante propriedade estrutural do dossel das culturas por expressar a taxa de desenvolvimento vegetal, apresentando estreita relação com a produtividade (PAIVA, 2009). O IAF é definido como a relação entre a área foliar de uma planta e a área de solo ocupada pela mesma (HEIFFIG *et al.*, 2006).

O IAF interfere fortemente na capacidade da planta em interceptar a radiação solar incidente, bem como na evapotranspiração do dossel (FERREIRA, 2018). A evolução do IAF ao longo do ciclo é influenciada por diversos fatores como: arranjo e arquitetura de planta, época e densidade de semeadura, genótipo, fertilidade do solo, hábito de crescimento e manejo fitossanitário (ZANON, 2015).

O IAF varia de acordo com o desenvolvimento da cultura, apresentando menor valor durante a emergência e à medida que as plantas se desenvolvem atinge seu valor máximo. Na senescência, quando as plantas perdem as folhas verdes, esse valor diminui. Na cultura do trigo, o IAF em diferentes estádios fenológicos apresenta diferentes efeitos sobre a produtividade (ZHOU *et al.*, 2020). Tian *et al.* (2020)

mostraram que o IAF no estágio de enchimento de grãos apresenta maior correlação com rendimento.

Os métodos para estimar IAF podem ser categorizados como métodos não destrutivos/diretos e métodos destrutivos/indiretos. Os métodos destrutivos exigem a retirada das folhas, o que pode comprometer a parcela, além de ser trabalhosos e demandarem tempo. Já nos métodos não destrutivos não há necessidade de remoção de folhas, garantindo a integridade das plantas e possibilitando medições na mesma planta ao longo do ciclo de desenvolvimento (ADAMI *et al.*, 2008).

O IAF pode ser determinado de forma não destrutiva por sensoriamento remoto, por adoção de dispositivos como ceptômetro e analisadores de dossel de plantas (*Lincoln LAI 2200*) e por medições nas folhas (comprimento e largura), conforme o método descrito por Richter (2014). As medições de forma destrutiva podem ser feitas utilizando discos foliares com área conhecida (ADAMI *et al.*, 2008), ou ainda, utilizando equipamentos como Integrador de área foliar.

O entendimento da evolução do IAF durante o desenvolvimento da cultura pode auxiliar na compreensão da dinâmica do crescimento do trigo, em resposta a cultivares com diferentes formatos de folha e ângulo foliar, servindo também, como respostas positivas ou negativas as práticas de manejo adotadas.

2.4 Radiação solar

O desenvolvimento das plantas, bem como seu acúmulo de biomassa, sob condições livres de fatores ambientais, é dependente da quantidade de absorção de radiação solar e da eficiência da conversão da energia solar absorvida para conduzir processos fotossintéticos (WANG, 2001). Dessa forma, a disponibilidade de radiação solar é um dos fatores que mais limita o desenvolvimento das plantas, pois toda energia necessária para a realização da fotossíntese, processo que transforma o CO₂ atmosférico em energia metabólica, é proveniente da radiação solar (TAIZ e ZEIGER, 2017). Portanto, a disponibilidade de radiação solar está intimamente ligada a produtividade de trigo.

Somente uma parte da radiação solar penetra diretamente na superfície terrestre sem nenhuma interferência da atmosfera, o restante pode ser refletido de volta para o espaço, absorvido ou espalhado em volta até atingir a superfície da terra. A radiação solar atinge a superfície terrestre de duas formas: direta e difusa. O acúmulo desses dois componentes denomina-se radiação global, que é dependente

das condições meteorológicas locais e do estado atmosférico. A quantidade e a intensidade da radiação difusa dependem, basicamente, da latitude, altitude, declinação solar e da nebulosidade. Em plantas a absorção da radiação incidente é dependente de fatores como, índice de área foliar, tamanho de folha, estágio fenológico, arranjo de plantas, entre outros (ECHER e SOUZA, 2001).

Segundo Moreira (2005), a radiação que chega a superfície terrestre apresenta uma interação ao atingir as plantas o que resulta em três frações: a) absorção da radiação pelos pigmentos contidos nas folhas e participação na síntese de compostos (fotossíntese), bem como, alteração de estruturas moleculares (fotoconversão) e podendo causar destruição de estruturas moleculares; b) reflexão pelas folhas; e c) transmissão de camadas de folhas que compõem o dossel.

Do total de radiação solar que incide na superfície, as faixas espectrais mais importantes para as plantas situam-se no espectro visível (0,4 a 0,7 μ m), o que é também considerado como sendo a radiação fotossinteticamente ativa (PAR), pois os pigmentos vegetais absorvem radiação dentro destas faixas de comprimento de onda. Nestas, destacam-se as faixas entre 0,4 a 0,51 μ m (azul), que é fortemente absorvida pelos pigmentos verdes a amarelos das plantas, para fotossíntese, e a faixa entre 0,61 e 0,72 μ m (vermelho), que é fortemente absorvida pelas clorofilas, para fotossíntese, e pelos fitocromos responsáveis por processos de fotoperiodismo. Fora do espectro visível, também muito importante é a faixa de 0,72 a 1,0 μ m (infravermelho próximo), que também é necessária em processos de fotoperiodismo e alongamento de tecidos (BERGAMASCHI & BERGONCI, 2017).

O aproveitamento da radiação solar pela planta depende de sua capacidade de interceptar e utilizar a luz, ou seja, a capacidade fotossintética. Por sua vez, a taxa fotossintética de uma cultura depende da distribuição da radiação solar nas diferentes camadas de folhas e do total absorvido em cada camada. O total de radiação solar interceptado e, eventualmente absorvido por uma camada de folhas está diretamente relacionado ao ângulo foliar a declinação solar, a distribuição espectral da radiação e a estruturação das folhas no dossel (NOVELINI, 2018).

A luz solar além de servir como uma fonte de energia eletromagnética para fotossíntese, também serve como sinal que regula diversos processos do desenvolvimento de uma planta. Em uma situação de competição por radiação solar, por exemplo, a planta é induzida a mudanças morfológicas, como: redução da espessura foliar, emissão de perfilho e ramos, aumento do comprimento de entrenós

e redução na produção de matéria seca das raízes em relação a parte aérea (RAJCAN e SWANTON, 2001).

Por outro lado, em situações de excesso da radiação solar, devido a partição da radiação ultravioleta (UV) e infravermelho, que levam a danos celulares e a destruição da membrana, mediante síntese de compostos fenólicos simples e flavonoides que atuam como filtros solares e removem oxidantes nocivos e radicais livres que são induzidos pelos fótons de alta energia da luz UV (TAIZ E ZEIGER, 2017). Na presença de alta irradiância, as folhas tendem a ser mais espessas, com uma área de superfície interna maior, tendem a ter maior teor de clorofila e carboxilase (enzima catalisadora) por unidade de área (PEREIRA, 2002).

Todas as respostas (fotorepostas) fisiológicas e morfológicas à radiação solar dadas por plantas, envolvem receptores que captam diferentes comprimentos de onda. Pigmentos, como clorofila, são moléculas que absorvem a luz visível em comprimentos de onda específicos, e refletem ou transmitem os comprimentos de onda não absorvidos, que são percebidos como cores. Ao contrário dos pigmentos fotossintetizantes (como a clorofila), os receptores absorvem um fóton de determinado comprimento de onda e usam a energia desse fóton como um sinal para iniciar uma fotoreposta (TAIZ E ZEIGER, 2017).

As respostas da planta podem ser distinguidas pela qualidade da luz requerida: ocorre redução na relação entre os comprimentos de onda vermelho (V) e vermelho extremo (VE) em direção à base da planta. A radiação solar de baixa qualidade (baixa relação V/VE) é refletida horizontalmente pelas plantas e funciona como um sinal da presença de vizinhos, desencadeando um processo de adequação da planta à competição futura (BALLARÉ e CASAL, 2000).

Sob condições de baixa qualidade de radiação solar, há maior atividade da enzima sacarose fosfato sintase, responsável pela síntese de sacarose (YANOVSKY *et al.*, 1995), no transporte de carboidratos a longas distâncias. Desse modo, o padrão de distribuição de carboidratos é alterado antes de ocorrer redução da fotossíntese, devido à presença de estresse, como sombreamento (BALLARÉ e CASAL, 2000).

Os fotorreceptores fitocromos, cripto-cromos, fototropinas e o fotorreceptor UV-B UVR8 desempenham um papel central no controle da fisiologia e desenvolvimento de plantas (BALLARÉ *et al.*, 2000). Dentre os receptores, os fitocromos, possuem grande importância no desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura da soja, sendo essencial para o processo de fotoperiodismo. Os fitocromos

absorvem as luzes vermelha e vermelho distante mais fortemente (600-750 μm), mas também absorvem a luz azul (350-500 μm) e a radiação UV-A (320-400 μm) (TAIZ E ZEIGER, 2017).

A eficiência do uso de radiação solar permite avaliar a eficiência da cultura em converter a radiação solar em energia bioquímica (ATP) e posteriormente em compostos orgânicos (biomassa vegetal), e conseqüentemente, em produtividade (ZANON *et al.*, 2018). Monteith, (1977) considera que, em plantas saudáveis adequadamente supridas de água e nutrientes, a fotossíntese líquida e a produção de biomassa sejam proporcionais à quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel. Dessa forma, a radiação solar desempenha um papel crítico no desenvolvimento das plantas, a eficiência no uso da radiação solar é uma característica determinante para produtividade (CARON *et al.*, 2014).

2.5 Sensoriamento remoto na agricultura

Os sistemas de Sensoriamento Remoto (SR) são conjuntos compostos de plataformas e sensores que tem como objetivo registrar imagens da superfície terrestre, através da detecção das interações da Radiação Eletromagnética (REM) com os diferentes materiais da superfície terrestre, e realizar a mensuração quantitativa destes (MENESES e ALMEIDA, 2012). O SR pode ser definido como a obtenção de dados a distância, por meio de sensores instalados em plataformas terrestres, aéreas e orbitais. Jensen *et al.* (2009) considera que o ato de processar, analisar e interpretar os dados coletados, também integra a definição do sensoriamento remoto.

Atualmente, diversos instrumentos são utilizados para obtenção de informações remotas, tais como, satélites, aviões e drones. A partir de imagens coletadas, vários índices podem ser abordados, como: aquisição de dados fenotípicos, avaliação de estresse hídrico, eficiência da luz, saúde vegetal e estimativas de produtividade e biomassa. Por meio da detecção, quantificação e análise da energia eletromagnética que pode ser refletida, absorvida, transmitida ou emitida pelos alvos, é possível correlacionar os dados radiométricos presentes nas imagens com parâmetros biofísicos da vegetação (XIE *et al.*, 2013).

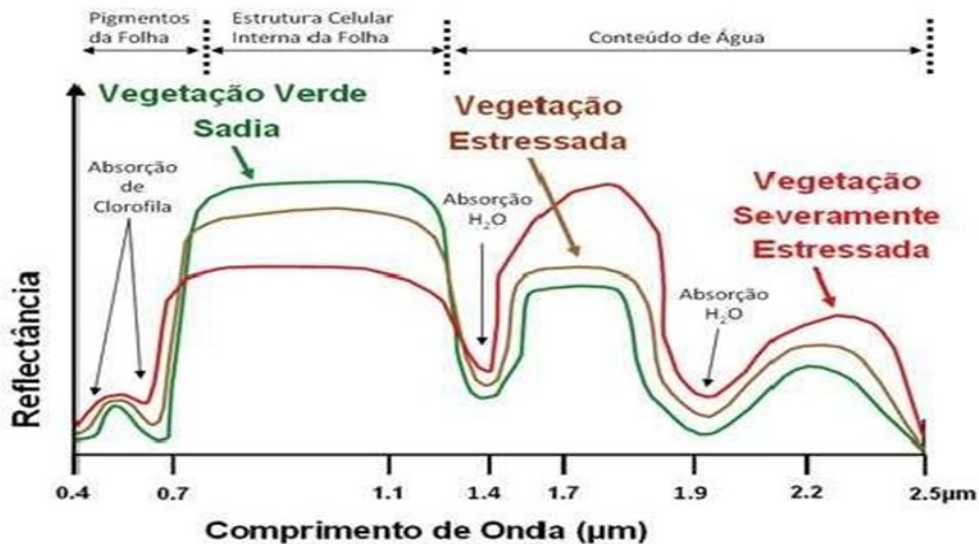
A radiometria espectral identifica a intensidade com que cada material reflete a radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda do espectro (BRANDÃO *et al.*, 2014). A resposta espectral na vegetação, é dependente da

interação entre a radiação eletromagnética e os fatores químicos (pigmentos fotossintetizantes e água) e estruturais (organização dos tecidos da folha) de uma folha. Conforme Ponzio e Shimabukuro (2010) existem três regiões do espectro que interagem com a vegetação: região do visível (0,4 μm – 0,72 μm), infravermelho próximo (0,72 μm – 1,1 μm) e o infravermelho médio (1,1 μm – 2,5 μm) conforme figura 2.

A região do visível (0,4 μm – 0,72 μm), está associada a presença de pigmentos dos cloroplastos, como clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%). Nessa faixa espectral, a energia eletromagnética interage com a folha por absorção e por espalhamento. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é transmitida em calor ou fluorescência. Nessa região está compreendida a radiação eletromagnética na faixa do azul e vermelho (SZEKIELDA, 1988). Os pigmentos predominantes absorvem radiação na região do azul (0,445 μm), nessa região ocorre um pico de absorção por todos os pigmentos, mas somente a clorofila absorve na região do vermelho, que corresponde a máxima absorção, (0,645 μm) devido à presença das clorofilas “a” e “b”.

Figura 2 - Assinatura espectral de uma folha

a



Fonte: FILHO et al. (2008)

Segundo Silva (2014), na região do infravermelho próximo (0,72 μm – 1,1 μm), ocorre alta reflectância, pequena absorção da radiação e uma alta quantidade de espalhamento interno da radiação na folha. A absorção de água é baixa nessa região,

enquanto a reflectância é quase constante, o que se deve ao resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. De maneira geral, quanto maior o número de lacunas na estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação, e conseqüentemente, maiores, serão os valores de reflectância. A região do infravermelho médio (1,1 μm – 2,5 μm) é altamente influenciada pela absorção de água. A água absorve a radiação incidente na região espectral compreendida entre 1,3 μm a 2,0 μm .

As diferenças nas respostas espectrais são registradas em imagem na forma de variações tonais, de cores ou de densidades (VIEIRA *et al.*, 2003). Estudos conduzidos por Walter-Shea *et al.* (1997), mostraram que a refletância das superfícies e os índices de vegetação variam de acordo com a geometria de iluminação e de visada e com o nível de cobertura do solo pelo dossel, o qual é função do estágio fenológico das culturas. Então, a reflectância dependerá: a) do material que reflete (vegetação, solo, água, etc.); b) dos comprimentos de onda da REM; e c) das geometrias de iluminação e de absorção.

Para IAF de maneira geral, é esperado que quanto maior o IAF, menor o valor de radiância espectral referente às regiões do visível (380 a 720 μm) e maior o do infravermelho médio (1300 a 3000 μm , devido à maior disponibilidade de pigmentos fotossintetizantes absorvendo a radiação eletromagnética incidente, e maior valor na região do infravermelho próximo, devido ao múltiplo espalhamento entre folhas (EMBRAPA, 2014).

2.6 SENSORIAMENTO REMOTO POR DRONES

Atualmente, um grande número de sensores está disponível no SR, como: sensores no espectro do visível – RGB, sensores multiespectrais, sensores hiperespectrais e os sensores térmicos. Cada um deles possui diferentes características espectrais e espaciais. Os sensores remotos são dispositivos capazes de detectar, em determinadas faixas do espectro eletromagnético, a energia eletromagnética proveniente de um objeto, transformá-la em um sinal elétrico e registrá-la, de tal forma que esse dado possa ser armazenado ou transmitido em tempo real, para posteriormente ser convertido em informações que descrevam o objeto (MORAES, 2002).

O uso de satélite é uma forma quantitativa de monitoramento. As imagens oriundas de satélites possuem intervalos (ou bandas) espectrais variando na faixa do

visível ao infravermelho termal. Esses intervalos espectrais podem ser caracterizados, segundo Meneses e Almeida (2012), como a divisão do espectro eletromagnético em intervalos de comprimentos de onda com base em mecanismos físicos de sua detecção.

Os sensores que trabalham no espectro do visível, também chamados de RGB (abreviação dos nomes red, green e blue) são sensores comumente usados, que são relativamente econômicos e leves (HUNT *et al.*, 2008), são usados para medir características morfológicas de plantas ou órgãos, biomassa e crescimento de plantas (YANG *et al.*, 2014), mas não podem fornecer informações fisiológicas. Trabalham em faixas do espectro eletromagnético que para o olho humano é possível de observar. Cameras fotográficas comuns mantêm estas faixas a disposição. Também são conhecidas essas faixas como sensores passivos, isto é, aqueles que utilizam apenas a luz do sol como fonte de captação da radiação eletromagnética (FIGUEIREDO, 2015). Imagens no espectro RGB foram utilizadas em estudos anteriores para estimar altura e biomassa de planta (SCHIRRMANN *et al.*, 2016), teor de clorofila nas folhas e concentração de N (LI *et al.*, 2015; SCHIRRMANN *et al.*, 2016) e cobertura de dossel (CHIANUCCI *et al.*, 2016).

Conforme explica Figueiredo (2015), as imagens captadas pelos sensores remotos são armazenadas em arquivos de formato digital, havendo, normalmente, dois arquivos para cada imagem: o primeiro deles, chamado de header da imagem, é destinado as informações como: instrumento de obtenção de imagens (satélite, drone ou avião), data e hora da aquisição, tamanho do pixel, entre outros. O outro arquivo contém os valores numéricos de radiância correspondentes aos pixels da imagem, equivalendo a imagem digital propriamente dita.

Para transformação de imagens de SR são usados os índices espectrais, que resultam da combinação de respostas espectrais em duas ou mais bandas espectrais do espectro eletromagnético (SCHEPERS *et al.*, 2014). O índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), proposto por Rouse *et al.* (1973), explora o contraste entre os valores de refletância dos canais do vermelho e do infravermelho próximo (NIR). Segundo Eduvirgem *et al.* (2018) o NDVI promove o acompanhamento evolutivo da vegetação através de estimação das diferentes densidades que a vegetação pode apresentar. Esse índice vem sendo muito utilizado para monitoramento agrícola, por apresentar forte correlação linear com o crescimento vegetal.

O índice de vegetação SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), proposto por Huete (1988), criado visando minimizar os efeitos de solo, após se verificar que as características do solo têm influência no espectro de radiação proveniente de dosséis vegetais e que a resposta espectral do solo em uma área com pouca cobertura vegetal poderia ser dominante sobre a resposta desta e quase nenhuma influência do solo para densidades altas de vegetação.

Existem variadas formas para decodificação das imagens, que através de programas de realce visual, equações matemáticas e emprego de software de processamento de imagens tornam possível a determinação de índices de vegetação. As novas tecnologias e a facilidade em adquirir máquinas fotográficas profissionais, sensores e drones para o monitoramento de ambientes específicos, abrem um novo espaço para as análises do SR como um todo.

2.7 APRENDIZADO DE MÁQUINAS

Para atender a crescente demanda por métodos rápidos e precisos, nos últimos anos tem crescido o uso de aprendizado de máquinas utilizando técnicas de mineração de dados. A mineração de dados e o aprendizado de máquina são dois ramos de interseção da inteligência artificial que usa o crescimento explosivo dos dados para analisar a associação entre causas e efeitos, prever problemas iminentes e fornecer soluções (GLADJU *et al.*, 2022).

A mineração de dados é o processo computacional de descobrir padrões e extrair informações úteis de grandes conjuntos de dados, já o aprendizado de máquina é a capacidade de um computador usar algoritmos complexos e aprender com conjuntos de dados minerados sem ser exclusivamente programado (LIAO *et al.*, 2012). O aprendizado de máquinas se divide em três estágios do processo: a aquisição de dados, a construção de modelos e a generalização (DURAI *et al.*, 2022), dessa forma, é possível analisar grandes volumes de dados, independentemente da complexidade e, combinando as técnicas de aprendizado de máquinas com os índices de vegetação se torna possível prever parâmetros agronômicos com rapidez e precisão (ZHOU *et al.*, 2021).

2.8 Aspectos fisiológicos

Diariamente, as plantas precisam abrir seus estômatos para capturar CO₂, ao mesmo tempo, é necessário que mantenham o equilíbrio entre a água perdida pela transpiração e a água absorvida pelas raízes (BRODRIBB *et al.*, 2010). Para maior eficiência nesse processo, características morfológicas e fisiológicas no nível das folhas são desejáveis, como: maior área foliar específica (FALCÃO *et al.*, 2015), baixa condutância a água (BARTLETT *et al.*, 2012), aumento do teor de cera (FIGUEIREDO *et al.*, 2015), e cutículas grossas das folhas (RISTIC e JENKS *et al.*, 2002). Giorio *et al.* (1999), também relataram que o controle estomático é o principal fator fisiológico na otimização do uso da água.

A baixa disponibilidade de água é um fator limitante no desenvolvimento e na produtividade das culturas, pois diminui a condutância estomática, devido à baixa disponibilidade de água no solo, levando a menores taxas de transpiração, o que, por sua vez, reduz a taxa de assimilação de carbono e, conseqüentemente, a fotossíntese (SANTOS *et al.*, 2014). Como a folha é o órgão mais responsivo às condições ambientais (CARRERA, 2008), sua estrutura reflete os efeitos do estresse hídrico mais claramente do que o caule e raízes. Sabe-se que alterações nas características morfológicas foliares alteram os componentes de difusão da condutância de CO₂ das cavidades subtomatais para os locais de carboxilação, o que contribui para manutenções de taxas fotossintéticas (EVANS e LORETO, 2000).

A taxa fotossintética (TXF) é uma atividade importante da planta, pois está diretamente ligada à taxa de crescimento e produtividade da cultura (KI *et al.*, 2020). Refere-se a intensidade de fotossíntese que a planta realiza, estando assim, diretamente relacionada com a produção de fotoassimilados e energia para as plantas (TODESCHINI, 2018). A taxa fotossintética é influenciada entre outras, pela luz disponível no ambiente, pela área foliar e arquitetura de planta.

A eficiência no uso da água (EUA) é definida como a eficiência das culturas em acumular fitomassa por unidade de água utilizada (MANAVALAN *et al.*, 2009) pela transpiração (TARDIEU, 2013). Taiz e Zeiger (2013) denomina EUA como sendo a capacidade da planta em moderar a perda de água e ao mesmo tempo absorver CO₂ suficiente. A EUA é desejada na produção agrícola em cultivos onde a disponibilidade hídrica pode ser limitada para elevar a tolerância ao déficit hídrico (SILVA, 2018).

Ademais, a EUA possibilita avaliar se a produtividade de uma cultura está sendo eficiente em relação a quantidade de água absorvida.

Outro parâmetro das trocas gasosas é a Taxa de Transpiração, definida como a perda de vapor de água pelas plantas para atmosfera (LOPES, 2017). Cerca de 95% de água absorvida pela planta é perdida pela transpiração e o restante é direcionado para o metabolismo e crescimento. À medida que a disponibilidade de água no solo diminuiu, a taxa de transpiração decresce, como resultado do fechamento estomático. A respiração excessiva sem reposição pode levar a um déficit hídrico nas folhas e causar redução de produtividade (KERBAUY, 2004).

A condutância estomática é um parâmetro fisiológico relacionado a absorção de carbono, abertura e fechamento estomático, entre outros e, portanto, ligado diretamente a fotossíntese (ADDINGTON *et al.*, 2004). Messinger (2006) define condutância estomática como o mecanismo fisiológico que as plantas terrestres vasculares possuem para o controle da transpiração. Diferentes estudos apontam correlação entre condutância estomática e indisponibilidade hídrica (OLIVEIRA *et al.*, 2005; OTTO *et al.*, 2013).

Por fim, um dos parâmetros ligados a eficiência fotossintética e desenvolvimento de plantas é a clorofila, presentes nos cloroplastos das folhas e em outros tecidos vegetais. A clorofila a (Chl a) está presente em todos os organismos que realizam fotossíntese oxigênica, é o pigmento utilizado na etapa fotoquímica (primeiro estágio do processo fotossintético). Os demais pigmentos, como a clorofila b (Chl b) auxiliam na absorção de luz e na transferência da energia radiante para os centros de reação (STREIT *et al.*, 2005). Segundo Netto *et al.*, (2005), a determinação do teor de clorofila em folhas pode ser usada como ferramenta para diagnosticar a integridade do aparato fotossintético, quando as plantas estão sujeitas a adversidades ambientais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Linhagens e locais de condução dos ensaios

Foram avaliadas onze linhagens de trigo desenvolvidas pelo Programa de Melhoramento Genético da UTFPR (UTFGEM) – *Campus* Pato Branco, são elas: UTFT170013, UTFT170242, UTFT170464, UTFT170490, UTFT170588, UTFT170615, UTFT15313, UTFT170500, UTFT162323, UTFT170074 e UTFT170220. Como testemunha utilizou-se cultivar UTF25. Os ensaios foram conduzidos na safra agrícola 2020, em 3 locais da região Sul: Campo Erê – SC (26,23° S e 53,5° W, a 929 m de altitude), Renascença – PR (26,09° S e 52,67° W, a 700 m de altitude) e Pato Branco – PR (26,22° S e 51,59° W, a 765 m de altitude). O clima de ambos os locais, conforme a classificação de Koppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido (ALVARES *et al.*, 2013).

Os ensaios foram conduzidos em delineamento experimental de blocos ao acaso, com três repetições. As unidades experimentais foram compostas por seis linhas de cinco metros de comprimento, com espaçamento de 0,20 m entre linhas. Foi considerado como área útil, as quatro linhas centrais de cada parcela, totalizando 5 m². A densidade de semeadura utilizada foi de 330 plantas m². Os tratos culturais foram realizados de acordo com recomendações técnicas para a cultura.

3.2 Índice De Área Foliar

3.2.1 Método destrutivo de determinação de área foliar

Foram coletadas cinco plantas de cada unidade experimental, no estágio fenológico de enchimento de grãos. As folhas foram destacadas e colocadas sobre uma superfície plana de cor branca, com um vidro transparente sob as folhas, com o objetivo de mantê-las sem dobras. Em seguida, foram fotografadas com auxílio de uma câmera digital com 24.1 megapixels de resolução. A câmera foi alocada sob um tripé na altura de 1,5 m do solo.

Para análise de estimativa de área foliar, as fotos foram manuseadas utilizando o Software ImageJ® (*Powerful Image Analysis*). Este software identifica a imagem de todas as folhas de uma planta através de procedimentos de contraste de cores (folha de cor escura e fundo contrastante claro), comparando a uma escala real presente (régua, por exemplo), calcula-se então a área foliar total real (Figura 4).

Posteriormente os dados de área foliar foram tabulados e utilizados para o cálculo de IAF através da área foliar (AF) dividida pela área do solo ocupada pela planta (AS), que foi conforme descrição abaixo:

Área do solo

$$\left(\frac{100cm}{70}\right) * 20cm = 28,57 cm^2$$

Onde:

100 cm é o presente em um metro de plantas;

70 é o número de plantas por metro linear;

20 é o espaçamento entre linhas

Área foliar de um planta

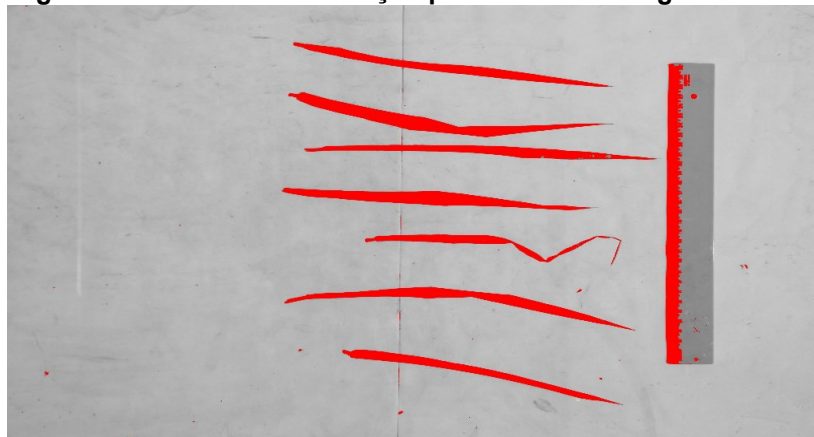
$$\frac{90 cm^2}{28,57 cm^2} = 3,15$$

Onde:

90 cm² é a media de área foliar de uma planta usada como exemplo;

28,57 é a área de solo que uma planta ocupou

Figura 3 - Amostra em avaliação pelo Software ImageJ



Fonte: Autoria própria (2022).

3.2.2 Método não destrutivo de determinação de índice de área foliar

Para determinação do IAF através de método não destrutivo, foi utilizado um veículo aéreo não tripulado - VANT, modelo quadricóptero da DJI modelo Phantom 4 Professional de 1,38 kg (classe 3 ANAC, 2017). Este equipamento possui capacidade de voo de aproximadamente 30 minutos, resistência a velocidade do vento de 10 m s⁻¹

¹ (36 km h⁻¹) e utiliza para seu posicionamento satélite das constelações GPS e GLONASS.

A câmera utilizada foi acoplada a sua fuselagem do UAV, através de um sistema inercial de estabilização de 3 eixos (gimbal), o que permite sua inclinação de -90° a +30°, proporcionando a possibilidade de tomadas de imagens perpendicularmente ao solo. O sensor ótico é modelo 1" do tipo CMOS com a qualidade de 20 megapixels, atuando nas faixas espectrais do visível (RGB) – Vermelho (R) $\lambda = 0,632 - 0,673 \mu\text{m}$, Verde (G) $\lambda = 0,533 - 0,590 \mu\text{m}$, Azul (B) $\lambda = 0,452 - 0,512 \mu\text{m}$. As lentes do conjunto, permitem um ângulo de abertura (FOV) de 84° e distância focal de 8,8 mm / 24 mm (equivalente ao formato 35 mm) f/2,8 – f/11 no foco automático (DJI, 2019).

Após a coleta destes dados, foram utilizados softwares para processamento de dados. O software Agisoft Metashape versão 1.6.1 foi utilizado para o processamento digital das imagens aéreas. Com esse software se realizou o procedimento de alinhamento das fotografias, onde foi possível determinar as coordenadas do terreno em relação a um sistema de referência, resultando na geração de uma nuvem de pontos que resultou na formação de um ortomozaico. O software QGIS 3.10 foi então utilizado, para recorte das áreas de interesse e cálculo das bandas espectrais.

Após extrair as bandas espectrais (red, green e blue), procedeu-se a metodologia conforme descrito por Felipetto (2022). Com o uso de aprendizado de máquinas, utilizou-se o método de mineração de dados pelo programa computacional *Orange Data Mining*, que trabalha na linguagem de programação Python. O banco de informações incluiu valores médios das bandas na faixa do visível (variáveis preditoras) e valores de IAF estimado pelo método destrutivo (variável resposta).

Os dados foram divididos aleatoriamente em um conjunto de treinamento (70%) e um conjunto de teste (30%). A validação cruzada de dez vezes foi usada no conjunto de treinamento. Foram calculados o coeficiente de determinação (r^2), o erro quadrado médio (RMSE) e o erro absoluto médio (MAE). Os algoritmos de aprendizado de máquinas utilizados foram: Regressão linear, Random Forest, Support Vector Machine (SVM) e Tree. Por fim, para avaliar a eficiência do modelo foi realizada uma análise de regressão entre o IAF determinado pelo método destrutivo e o IAF modelo por aprendizagem de máquinas.

3.3 Caracteres fisiológicos

As avaliações de taxa fotossintética líquida ou taxa assimilatória líquida (P_n $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa de transpiração (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e eficiência no uso da água (WUE) foram realizadas em estágio fenológico de enchimento de grãos, sendo as leituras realizadas em folha bandeira. Utilizando o equipamento portátil, com analisador infravermelho de gases (IRGA), modelo LI-6400XT (LI-COR, Lincoln, Nebraska – USA) com injetor automático de CO_2 , e fonte artificial de luz vermelha e azul. Antes das avaliações se realizou as devidas calibrações do aparelho (taxa constante com $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de PAR (*Photosynthetic Active Radiation*), e 400 ppm de CO_2). As medidas das trocas gasosas foram realizadas entre as 9:00 e as 11:00 horas com UR entre 50 e 80%, no estágio de enchimento do grão.

3.4 Caracteres Morfológicos e de Rendimento

Para determinação de medidas de ângulo da folha bandeira (ANFB) (formados entre o eixo caulinar e o limbo foliar) as plantas foram fotografadas utilizando um fundo branco para posterior cálculo do ângulo de inserção das folhas utilizando o programa FOXIT 3.0.

No estágio de enchimento de grão, ocorreu a coleta de cinco plantas por unidade experimental, nas quais foram realizadas as seguintes avaliações: a) altura de planta (AP), mensurada em centímetros (cm), a partir da superfície do solo até o ápice da planta; b) largura da lâmina da folha bandeira (LARFB), mensurada em centímetros, obtido pela medida entre as extremidades laterais do centro da folha; c) comprimento da lâmina da folha bandeira (COMPLFB), mensurada em centímetros, obtido pela medida entre a ponta da folha e o ponto de inserção da folha expandida; d) comprimento do pedúnculo (COMPP), mensurado em centímetros, a partir do último nó até a base da espiga e, e) comprimento da bainha (COMPB), mensurado em centímetros, do último nó até a ligula da folha bandeira.

Foram coletadas cinco plantas por unidade experimental, e acondicionadas toda parte aérea (folhas, colmo e espiga) das mesmas em sacos de papel. Posteriormente, foram transferidas para estufa a $75 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingir peso constante, após a pesagem se determinou o teor de massa seca da parte aérea (MS).

O Rendimento de grãos (RG) foi obtido por meio da colheita da parcela, após trilha e pesagem, a umidade dos grãos foi corrigida para 13%, e convertido para kg

ha⁻¹. Para determinação do peso de mil sementes (PMS), procedeu-se escolha aleatória de oito repetições de 100 sementes de trigo, sendo determinada o peso de cada repetição em balança analítica, expressos em gramas (BRASIL, 2009). O peso hectolitro (PH) foi determinado através da massa de grãos em 250 ml, por pesagem em balança de precisão, e expressa em kg hL⁻¹.

3.5 Análises de dados

Os dados foram previamente analisados pelo teste de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk, e teste de homogeneidade das variâncias (Bartlett). Atendendo os pressupostos da análise de variância (ANOVA), as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Foi realizada análise de correlação de Pearson, a fim de observar quais caracteres morfológicos e fisiológicos estão relacionados com o índice de área foliar. Por fim, para associação entre os caracteres avaliados foi realizada análise de rede de correlação de Pearson. As análises e gráficos foram realizados no software R (R CORE DEVELOPMENT TEAM, 2020) utilizando os pacotes: Agricolae, ExpDes.pt e qqgraph (DE MENDIBURU, 2019; OLIVOTO; LÚCIO, 2020; EPSKAMP et al., 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de variância conjunta

Houve interação genótipo x ambiente (G x A) significativa ($p < 0,01$; $p < 0,05$) para todos os caracteres avaliados, exceto para a eficiência de uso da água (WUE) e comprimento de bainha (COMB). Os coeficientes de variação (CV%) foram de baixa magnitude (1,65 a 33,50%), indicando boa precisão experimental (Tabela 1).

Tabela 1 - Análise de variância conjunta (ANOVA) de 12 genótipos de trigo, para caracteres morfológicos: ângulo de folha bandeira (ANFB), índice de área foliar (IAF), massa seca (MS), altura de planta (AP), comprimento da bainha (COMB), comprimento do pedúnculo (COMP), largura da lâmina da folha bandeira (LARFB), e comprimento da lâmina da folha bandeira (COMPLFB); caracteres de rendimento: rendimento de grãos (RG), peso do hectolitro (PH) e peso de mil sementes (PMS); e, caracteres fisiológicos: eficiência do uso da água (WUE), taxa de fotossíntese (Pn) e taxa de transpiração (E).

		Fontes de variação					
		Bloco	Genótipo (G)	Ambiente (A)	GxL	Erro	CV(%)
GL		2	11	2	22	70	-
Caracteres		Quadrados médios					
Morfológicos	ANFB	0,18	200,56**	306,78**	84,88**	3,65	2,56
	IAF	0,05	2,23**	0,67*	1,62**	0,27	15,52
	MS	0,38	3,68**	101,94**	3,21**	0,16	6,39
	ALT	4,60	178,05**	559,60**	17,07**	1,78	1,65
	COMPB	0,67	9,95**	23,54**	1,06ns	2,22	5,50
	COMPP	2,02	110,99**	8,22ns	7,25**	3,32	6,33
	LARFB	0,02	0,08**	1,25**	0,04**	0,005	6,00
	COMPLFB	0,79	15,52**	19,45**	7,41**	0,55	3,49
Rendimento	RG	449500,00	2472885,00**	30430003,00**	541556,00*	293582,10	10,96
	PH	1,97	24,22**	66,80**	7,06**	1,48	1,68
	PMS	0,15	38,44**	11,95**	4,89**	0,88	3,36
Fisiológicos	WUE	0,01	0,01ns	0,50**	0,02ns	0,01	33,50
	Pn	0,26	11,56**	363,80**	10,53**	2,14	10,26
	E	0,29	1,83**	105,02**	0,71**	0,15	9,78

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; G: genótipo; A: ambiente; GxA: interação genótipo x ambiente; CV: Coeficiente de variação; ns: não significativo; *, **: significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro pelo teste F, respectivamente

Fonte: Autoria própria (2022)

4.2 Caracterização de linhagens de trigo quanto ao índice de área foliar (IAF)

4.2.1 Índice de área foliar pelo método destrutivo

O índice de área foliar (IAF), apresentou diferença significativa entre as onze linhagens analisadas, variando de 2,13 a 4,86 (Tabela 2). Resultados semelhantes foram encontrados por Oviedo *et al.* (2000) avaliando a cultura do trigo em estágio de enchimento de grãos, conforme o presente trabalho. A área foliar de uma planta é um parâmetro importante, pois melhora a eficiência da atividade fotossintética, que ao produzir mais fotoassimilados aumenta a produção de grãos (GONÇALVES CARVALHO, 2014). No entanto, poucos estudos se concentram na estimativa de IAF para trigo. Nesse sentido, há uma necessidade de mais estudos que determinem o IAF ótimo em cada estágio de desenvolvimento para a cultura do trigo, tendo em vista a importância dessa variável, desenvolvendo um papel crítico na indicação do estado de crescimento da cultura, refletindo as influências do ambiente de crescimento e manejos, e determinando a estimativa de biomassa e rendimento (HUANG *et al.*, 2016).

No ambiente de Campo Erê (CAMP) as linhagens UTFT170464, UTFT170013, UTFT170220 e UTFT170074 apresentaram os maiores IAF, com valores de 4,69, 3,91, 3,87 e 3,65 respectivamente. No ambiente de Pato Branco (PB) a linhagem UTFT170490 obteve maior IAF (4,86), seguida de UTFT15313 (4,32), UTFT170615 (4,03), UTFT170242 (3,91) e UTFT170220 (3,76). Já no ambiente de Renascença (REN) as linhagens UTFT15313 (4,67), UTFT170074 (4,65), UTFT170490 (4,34) e UTFT170588 (4,64) foram as de maior IAF (Tabela 2).

Os materiais que apresentaram os menores valores de IAF no ambiente de CAMP foram: a cultivar testemunha UTF 25 (2,68), seguida das linhagens UTFT170615 (2,45), UTFT162323 (2,62), UTFT170500 (2,78), UTFT170242 (2,92), UTFT170490 (2,96), UTFT170588 (2,97) e UTFT150313 (3,32). No ambiente de PB o menor valor de IAF foi encontrado novamente pela cultivar testemunha UTF25 (2,48), seguido pelas linhagens UTFT170013 (2,53), UTFT170074 (2,65), UTFT170500 (2,76), UTFT162323 (2,77), UTFT170464 (3,09) e UTFT170588 (3,24). Para o ambiente de REN a linhagem 170013 foi a de menor IAF, seguida da cultivar testemunha UTF 25: 2,13 e 2,52 respectivamente.

Todas as linhagens que se destacaram no parâmetro de rendimento de grãos foram também classificadas em menores IAF, exceto a linhagem UTFT170220 que apresentou elevada média produtiva e foi classificada com alto IAF.

Tabela 2 – Médias para índice de área foliar por método destrutivo de 12 genótipos (GEN) de trigo avaliados em três ambientes Campo Erê/SC (CAMP), Pato Branco/PR (PB) e Renascença/PR (REN).

Genótipo	CAMP	PB	REN
UTF25	2,68bA	2,48bA	2,52cA
UTFT150313	3,32bB	4,32aA	4,67aA
UTFT162323	2,62bA	2,77bA	2,96bA
UTFT170013	3,91aA	2,53bB	2,13cB
UTFT170074	3,65aB	2,65bC	4,65aA
UTFT170220	3,87aA	3,76aA	3,30bA
UTFT170242	2,92bB	3,91aA	2,93bB
UTFT170464	4,69aA	3,09bB	3,13bB
UTFT170490	2,96bB	4,86aA	4,34aA
UTFT170500	2,78bA	2,76bA	3,37bA
UTFT170588	2,97bB	3,24bB	4,64aA
UTFT170615	2,45bB	4,03aA	3,46bA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade de erro
Fonte: A autoria própria (2022)

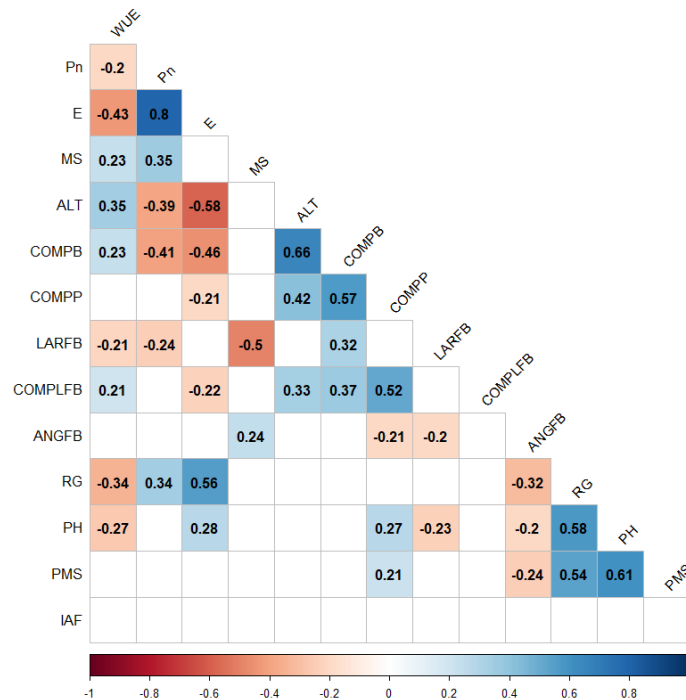
O IAF apresentou forte variação entre os ambientes analisados. Normalmente, essas variações são causadas pelas mudanças nas variáveis edafoclimáticas como: precipitação pluviométrica, umidade do solo, potencial de vapor d'água na atmosfera e fotoperíodo (BAMBI, 2007). Contudo, essas variações também podem ocorrer por ataques de pragas e doenças, por exemplo, que causam danos à área foliar e conseqüentemente reduzem o IAF.

A ausência de correlação entre IAF e os demais parâmetros avaliados (Figura 5), diverge do encontrado na literatura: Tian *et al.* (2020) mostraram que o IAF no estágio de enchimento de grãos tem a maior correlação com produtividade em trigo. Zhou *et al.* (2020) ao analisar IAF pelo método de infravermelho com intervalo de 4 dias, encontrou uma correlação com produtividade em trigo ($r^2 = 0,415$, $p < 0,001$); o mesmo foi encontrado em estudo anterior (WANF *et al.*, 2018). O IAF é um importante indicador agrônomo da produtividade da cultura, da capacidade fotossintética e do grau de estresse, e tem uma correlação estável com o rendimento (LIANG *et al.*, 2015).

A ausência de correlação entre o IAF e os demais parâmetros analisados no presente trabalho pode ser explicada pelo método empregado para avaliação de IAF nas linhagens de trigo. Com o apoio dos avanços da tecnologia, modelos de estimativa de IAF, bem como a sua precisão, melhorarão ainda mais (SCHWALBERT *et al.*,

2020). Pesquisas futuras, também devem determinar o IAF durante todo o desenvolvimento da cultura, de modo a entender qual o IAF ótimo para a cultura do trigo em cada estágio fenológico.

Figura 4 – Correlação de Pearson entre os caracteres morfológicos: ângulo de folha bandeira (ANFB), índice de área foliar por método destrutivo (IAF), massa seca (MS), altura de planta (AP), comprimento da bainha (COMB), comprimento do pedúnculo (COMP), largura da lâmina da folha bandeira (LARFB), e comprimento da lâmina da folha bandeira (COMPLFB); caracteres de rendimento: rendimento de grãos (RG), peso do hectolitro (PH) e peso de mil sementes (PMS); e, caracteres fisiológicos: eficiência do uso da água (WUE), taxa de fotossíntese (Pn), taxa de transpiração (E), e nitrogênio foliar (N%).



Nota: Apenas valores significativos ($p < 0,05$) são apresentados na figura, tanto para correlações positivas, quanto para negativas.

4.2.2 Índice de área foliar pelo método não destrutivo

Os algoritmos de aprendizado de máquinas testados, combinados com as bandas espectrais RGB, não apresentaram um bom desempenho (regressão linear, $r^2 = 0,0473$; Random Forest, $r^2 = 0,0089$; Support Vector Machine, $r^2 = 0,0028$ e Tree, $r^2 = 0,0115$) como mostra a Figura 6. Ou seja, ao comparar os dados da modelagem por método de aprendizado de máquinas com os dados de IAF por método destrutivo, não foi encontrada uma correlação, não se tornando viável, dessa forma, estimar o IAF para a cultura do trigo pelo método não destrutivo escolhido no presente trabalho.

Felipetto (2021), utilizou essa metodologia para estimar a produtividade de trigo com imagens RGB, os melhores resultados encontrados foram nos estádios

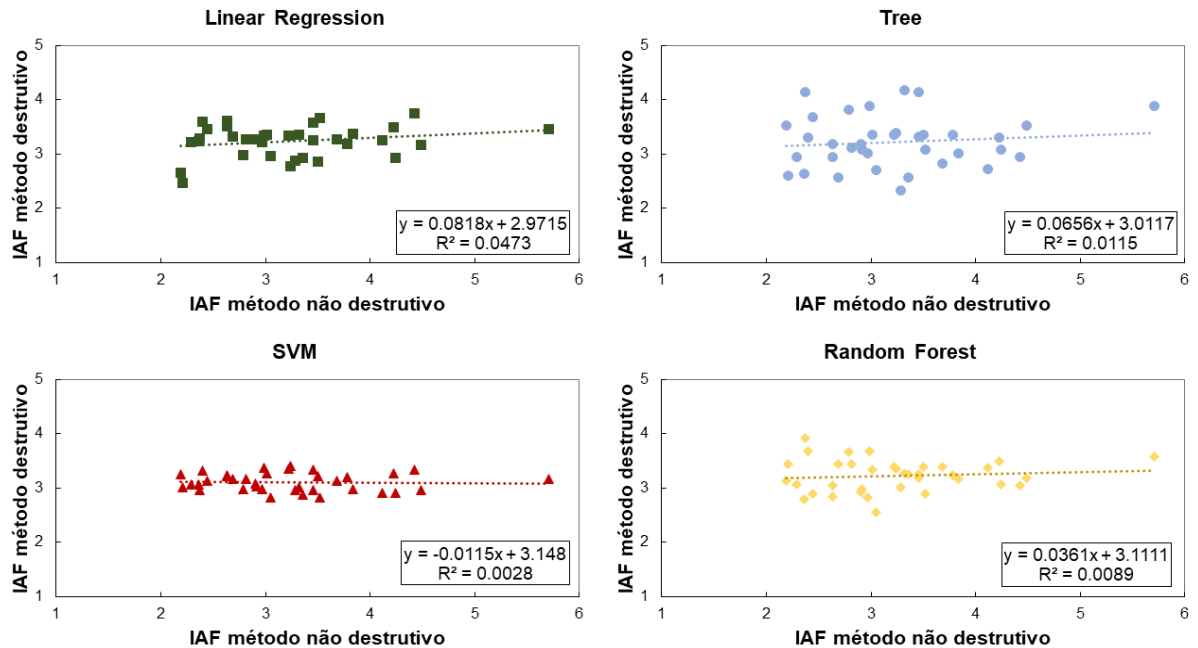
fenológicos de perfilhamento ($r^2= 0,61$, $RMSE=0,28$ e $MAE=0,23$) e maturação fisiológica ($r^2=0,58$, $RMSE= 0,20$ e $MAE= 0,23$), utilizando o algoritmo de regressão linear. Contudo, o autor concluiu que os resultados encontrados com o uso de imagens multiespectrais se destacam para os demais estádios fenológicos.

Li *et al.* (2021) estimou o IAF com base em redes neurais convolucionais. Com dados provindos de medidas de plantas (método destrutivo) e imagens digitais de uma câmera (método não destrutivo), o método foi capaz de estimar com precisão o IAF do trigo nos estágios iniciais ($R^2=0,82$, $RMSE=0,679$, $NRMSE=24,89\%$). O autor pode observar que em estádios fenológicos mais avançados, quando o IAF por método destrutivo atingiu um determinado valor, ou seja, a saturação, o modelo de estimação com base em redes neurais convolucionais apresentou uma certa subestimação. Pois, ainda segundo o estudo, com o desenvolvimento do dossel, a expansão foliar aumenta o IAF, assim como a sobreposição entre as folhas. Dessa forma, as informações apresentadas pelo dossel não podem ser totalmente capturadas em imagens digitais na faixa RGB, devido a grande sobreposição entre as folhas, resultando em subestimativas por modelos de estimativa usando imagens digitais.

O mesmo pode ter ocorrido no presente trabalho, pois em estágio fenológico de enchimento de grãos (o qual se realizou as avaliações), as folhas estão totalmente expandidas e a sobreposição entre as mesmas é alta. Além disso, o método destrutivo de avaliar IAF apresenta uma alta confiabilidade, visto que, a planta é coletada, projetada sobre uma superfície plana, onde suas folhas são totalmente estendidas e não há sobreposição. Comparar dados de IAF determinados por avaliações unitárias e destrutivas com dados de IAF por imagens digitais podem resultar em uma ausência de correlação, conforme visto. Em geral, os métodos diretos/destrutivos têm maior precisão do que os métodos indiretos/não destrutivos quando as amostras são suficientemente representativas (YAN *et al.*, 2019). adicionalmente, as condições de ambiente devem ser analisadas, pois fatores como iluminação, fundo desordenado e gerenciamento de campo podem afetar a precisão dos resultados da estimativa.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é a redundância e multicolinearidade dos dados (YUE *et al.*, 2018), pois são dois aspectos importantes que podem influenciar nos resultados. Ao utilizar dados de bandas espectrais, trabalha-se com um número elevado no banco de dados e valores muito parecidos. Nesse sentido, uma variável pode estar correlacionada a outra, resultando em um aumento nos coeficientes de variância.

Figura 5 – Coeficientes de regressão linear entre índice de área foliar (IAF) determinado pelo método destrutivo x IAF determinado pelo método não destrutivo para os modelos de Linear Regression, Tree, Support vector machine (SVM) e Random Forest.



Por isso, se faz necessário que trabalhos futuros façam uso de dados multiespectrais de sensores de campo aos modelos de estimativa de IAF, considerando que essa faixa espectral possui um número maior de bandas (como infravermelho próximo) e assim mais dados espectrais são observados na reflectância da planta, independente da sobreposição das folhas, permitindo uma melhor estimativa.

Por fim, levando em consideração que os métodos destrutivos avaliam a planta de forma unitária, e as imagens digitais trabalham com uma média da área de interesse desenhada dentro da unidade experimental, uma estratégia para tornar mais eficiente a avaliação, seria adicionar um marcador físico ao chão dentro da unidade experimental, e avaliar assim, as mesmas plantas, independente do método.

4.3 Caracterização fisiológica de linhagens de trigo

Houve diferença na taxa fotossintética (P_n) entre os genótipos de trigo nos ambientes de Campo Erê (CAMP) e Pato Branco (PB) (Tabela 3). No ambiente de CAMP a linhagem UTFT170013 se mostrou superior ($18,21 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), seguida de UTFT170242 ($18,19 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e UTFT170615 ($16,94 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). No ambiente de PB a linhagem UTFT170500 obteve maior P_n ($15,43$

$\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Em Renascença (REN), mesmo os genótipos não diferindo entre si, o ambiente apresentou os maiores valores de Pn.

Materiais com elevada Pn possuem maior capacidade de produzir fotoassimilados e melhorar a sua translocação para órgãos de interesse (JIN *et al.*, 2010), contribuindo para aumento de rendimento. Uma série de estudos (ZHANG *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2019; KAMRAN *et al.*, 2020) mostram que o aumento de rendimento está atrelado principalmente ao aumento das Pn. No presente estudo, e também no estudo conduzido por Jin *et al.* (2010), foi encontrado uma correlação positiva entre rendimento de grãos (RG) e Pn ($r = 0,34^{***}$) (Figura 5). Buttery *et al.* (1981) propuseram que cultivares com maior Pn podem ter melhores mecanismos de armazenamento e translocação.

Ao avaliar taxa de transpiração (E) (Tabela 3) no ambiente de CAMP, as linhagens UTFT170013 ($4,32 \text{ mmol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), UTFT170220 ($3,60 \text{ mmol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), UTFT170242 ($3,93 \text{ mmol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), UTFT170464 ($3,89 \text{ mmol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), UTFT170500 ($3,98 \text{ mmol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e UTFT170615 ($3,68 \text{ mmol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) apresentaram os maiores valores. Já no ambiente de PB apenas a linhagem UTFT170500 teve maior E com o valor de $4,25 \text{ mmol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$. No ambiente de REN as linhagens não diferiram significativamente, contudo, o ambiente REN foi o de maior E.

Tabela 3 – Médias para 12 genótipos (GEN) de trigo avaliados em três localidades Campo Erê/SC (CAMP), Pato Branco/PR (PB) e Renascença/PR (REN), quanto aos parâmetros fisiológicos: taxa de fotossíntese (Pn, $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e transpiração (E, $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$). UTFPR, Pato Branco, 2022.

GEN	TXF			TR		
	CAMP	PB	REN	CAMP	PB	REN
UTF25	13,83cB	9,71cC	16,29aA	3,05bB	2,35bC	5,62aA
150313	13,14cA	12,51bA	15,32aA	2,06cB	1,65cB	5,81aA
162323	11,26cB	11,34bB	18,28aA	2,58cB	2,71bB	5,68aA
170013	18,21aA	11,41bB	17,97aA	4,32aB	2,88bC	5,57aA
170074	12,83cB	9,85cC	16,47aA	2,78bB	2,67bB	5,87aA
170220	15,66bA	6,53dB	17,01aA	3,60aB	1,31cC	5,58aA
170242	18,19aA	11,82bB	18,20aA	3,93aB	3,09bC	6,13aA
170464	15,35bB	10,20cC	18,25aA	3,89aB	2,81bC	6,13aA
170490	13,85cB	10,66cC	17,29aA	3,22bB	2,93bB	6,15aA
170500	13,14cB	15,43aA	16,29aA	3,98aB	4,25aB	6,09aA
170588	15,57bA	8,42dB	15,48aA	3,05bB	1,84cC	5,80aA
170615	16,94aA	11,75bB	18,06aA	3,68aB	2,61bC	5,81aA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade de erro

Fonte: Autorial própria (2022)

As mesmas linhagens apresentaram maiores valores para Pn e E. Pode se inferir, ainda, que o ambiente de REN, apresentou um índice de radiação maior, pois

o aumento da radiação fotossinteticamente ativa promove um aumento da transpiração (ZHU *et al.*, 2022). Dessa forma, o aumento da radiação, pode ter provocado a elevação da Pn, o que resulta em maior abertura estomática e conseqüentemente, maior taxa de transpiração. A figura 5 comprova a correlação positiva de E com Pn ($r = 0,80^{**}$).

Uma correlação negativa entre Pn e eficiência do uso da água (WUE) foi encontrada ($r = -0,20^*$), o mesmo ocorreu entre E e WUE ($r = -0,43^{***}$), corroborando com outros autores (LI *et al.*, 2017; ZHAO *et al.*, 2020). Esse resultado já era esperado, pois quanto maior a Pn, maior a abertura estomática, afetando a E, e refletindo de forma negativa na WUE. As plantas aumentam sua WUE reduzindo a abertura estomática e, portanto, a E (LI *et al.*, 2017). Para WUE não houve interação genótipo x ambiente (G x A) significativa e nem diferença significativa entre as linhagens avaliadas, entretanto, ao analisar os ambientes, REN (ambiente com maiores Pn e E) também apresentou os menores valores de WUE.

4.4 Caracterização morfológica em linhagens de trigo

Muitas características afetam a estrutura da planta, entre elas, o ângulo da folha é uma característica chave em culturas de cereais e é um alvo primário para a criação de uma arquitetura de planta ideal para melhorar o rendimento de grãos (WATANABE *et al.*, 2005). A folha bandeira é a última folha a se desenvolver na planta do trigo, e representa cerca de 75% das reações de fotossíntese durante o período de enchimento dos grãos (ALVES, 2019), desempenhando grande capacidade fotossintética, com um papel importante na determinação da produtividade (DONG *et al.*, 2018).

Para o caractere ângulo da folha bandeira (ANFB), os menores valores aqui descritos, correspondem a plantas de arquitetura ereta (Tabela 4). No ambiente de CAMP a cultivar testemunha UTF 25 apresentou o menor ANFB ($71,88^\circ$), seguida de UTFT170588 ($72,49^\circ$) e UTFT170464 ($72,69^\circ$). No ambiente de PB novamente a cultivar UTF 25 foi a de menor ANFB ($58,30^\circ$). Já no ambiente de REN o menor ANFB foi encontrado na linhagem UTFT170500 ($57,84^\circ$). Os materiais citados acima se destacaram por apresentar uma arquitetura foliar mais ereta.

O ANFB ereto é uma característica desejável, pois permite uma maior interceptação de luz, e assim, aumenta a área fotossinteticamente ativa, aumentando a produção de fotoassimilados. Ademais, linhas de cultivo com folhas bandeira eretas

podem tolerar uma taxa de plantio mais densa (TIAN *et al.*, 2019). Atualmente, no melhoramento genético a arquitetura de planta considerada “moderna”, são plantas de porte baixo e folhas eretas, não apenas a folha bandeira, pois assim, de uma maneira geral, proporciona-se melhor aproveitamento da radiação solar incidente na copa da cultura, provocando redução da sobreposição das folhas e, evitando o autossombreamento o que resulta em um aumento da produtividade (LIMA, 2019). Além disso, foi relatado que plantas mais eretas melhoram o acúmulo de nitrogênio foliar para enchimento de grãos (DONG *et al.*, 2018).

Tabela 4 – Médias para 12 genótipos (GEN) de trigo avaliados em três localidades Campo Erê/SC (CAMP), Pato Branco/PR (PB) e Renascença/PR (REN), quanto aos caracteres morfológicos: ângulo da folha bandeira (ANFB), altura de planta (ALT), largura da lâmina da folha bandeira (LARFB), comprimento da lâmina da folha bandeira (COMPLFB). UTFPR, Pato Branco, 2022.

Genótipo	ANFB			ALT			LARFB			COMPLFB		
	CAMP	PB	REN	CAMP	PB	REN	CAMP	PB	REN	CAMP	PB	REN
UTF25	71.88dA	58.30dC	63.66eB	91.72aA	88.37bB	81.22aC	1.15bB	1.38bA	1.14bB	24.24aA	22.89bA	23.32aA
UTF150313	82.21bA	76.42aB	73.91cB	92.66aA	90.80aA	82.44aB	1.15bB	1.48aA	1.18bB	21.08cB	22.32bA	17.41dC
UTFT162323	82.82bA	76.59aB	84.09aA	83.69cB	87.83bA	82.23aB	0.86dB	1.43aA	1.33aA	20.43cA	19.16dB	20.63cA
UTFT170013	75.53cB	72.91bB	78.55bA	81.05dA	81.37dA	71.44dB	0.75dB	1.34bA	1.23bA	22.91bA	21.23cB	20.14cB
UTFT170074	78.09cA	73.65bB	67.45dC	87.08bA	86.40cA	80.15bB	1.14bB	1.28bA	1.41aA	23.64aA	20.62cB	22.65aA
UTFT170220	78.79cA	78.04aA	76.60bA	77.89eA	73.53eB	72.72dB	0.89dC	1.06cB	1.19bA	20.05cB	19.84dB	21.73bA
UTFT170242	76.38cB	71.35bC	84.34aA	79.00eB	87.31bA	78.41bB	1.25aB	1.60aA	1.33aB	21.11cA	21.61cA	21.59bA
UTFT170464	72.69dA	75.66aA	75.43cA	76.99eB	80.07dA	73.78dC	1.24aB	1.55aA	1.26bB	22.61bA	21.73cA	16.39eB
UTFT170490	87.27aA	76.40aB	76.86bB	77.99eB	80.70dA	71.11dC	1.00cC	1.55aA	1.33aB	23.37aA	21.57cB	20.62cB
UTFT170500	77.05cA	75.85aA	57.84gB	81.00dB	84.17cA	72.55dC	1.13bB	1.50aA	1.18bB	22.00bB	24.45aA	20.77cB
UTFT170588	72.49dA	68.20cB	74.26cA	85.17bA	85.67cA	76.00cB	1.06bB	1.47aA	1.35aA	23.75aA	22.64bA	23.25aA
UTFT170615	80.00bA	71.22bB	61.48fC	78.78eA	79.90dA	76.35cB	1.08bB	1.57aA	1.16bB	18.39dB	21.49cA	18.19dB

**Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade de erro
Fonte: Autoria própria (2022)**

O maior ANFB foi obtido pela linhagem UTFT170490 (87,27°) no ambiente de CAMP. Em PB as linhagens de maior ANFB foram UTFT170220, UTFT162323, UTFT150313, UTFT170490, UTFT170500 e UTFT170464 com 78,04°, 76,59°, 76,42°, 76,40°, 75,85° e 75,66° respectivamente. No ambiente de REN o maior NFB foi encontrado na linhagem UTFT170242 (84,34°) seguido da linhagem UTFT162323 (84,09°). Plantas de trigo com grande ANFB têm um hábito solto que inibe o crescimento de ervas daninhas e reduz a evaporação de água do solo durante o período de crescimento juvenil (MARONE *et al.*, 2020). No entanto, plantas com grande ANFB ocupam mais espaço, levando à diminuição da eficiência fotossintética foliar e ventilação entre plantas. Um ANFB apropriado melhorará a captura de luz e ventilação, reduzirá a competição entre plantas vizinhas e minimizará as ameaças de pragas e doenças para alcançar a produção ideal de grãos (LIU *et al.*, 2022).

O ANFB apresentou uma correlação positiva com acúmulo de massa seca (MS) ($r = 0,24^*$) (Figura 5), ou seja, no presente estudo, quanto maior o ANFB, maior foi a massa seca, esse resultado vai contra a literatura: Li *et al.* (2009) observaram

que o menor ângulo foliar em arroz contribuiu para maior acúmulo de biomassa e rendimento. Jiang *et al.* (2015) relataram que menores ângulos de folha bandeira, apresentam uma melhora nas características de permanência verde das folhas durante o enchimento de grãos, como maior fotossíntese foliar e valores SPAD, que contribuíram ao maior acúmulo de biomassa e produtividade. Ao observar RG, PH e PMS com ANFB se obtém uma correlação positiva (Figura 5). O ANFB também apresentou uma correlação negativa com comprimento de pedúnculo e largura da folha bandeira.

Ao avaliar altura de planta (ALT), as médias ficaram entre 92,66 cm e 71,11 cm (Tabela 4). A linhagem UTFT150313 apresentou a maior altura de planta (92,66 cm) no ambiente de CAMP, seguida da cultivar UTF 25 com 91,72 cm. Nesse mesmo ambiente, as linhagens com menor ALT foram: UTF170464, UTF170220, UTF170490, UTF170615 e UTF170242. No ambiente de PB a linhagem UTF150313 apresentou a maior ALT (90,80 cm), já a menor ALT foi obtido pela linhagem UTF170220 (73,53 cm). Por fim, no ambiente de REN, a linhagem UTF150313 obteve novamente a maior ALT (82,44 cm), seguida de UTF162323 (82,23 cm) e da cultivar UTF 25 (81,22 cm). As linhagens mais baixas nesse ambiente foram: UTF170490, UTF170013, UTF170500, UTF170220 e UTF170464. A linhagem UTF170490 apresentou a menor ALT entre todos os ambientes (71,11 cm).

Plantas mais altas são mais propensas ao acamamento, principalmente quando cultivadas em ambientes favoráveis. No melhoramento genético de gramíneas, as características desejáveis são plantas eretas e de menor altura (LIMA, 2019). Plantas com essa arquitetura, permitem uma maior capacidade de interceptação de luz, investindo menos em parte vegetativa e mais em grãos. No presente trabalho, as linhagens de menor ANFB e ALT demonstraram também boas médias produtivas. A ALT apresentou uma correlação negativa com Pn e E ($r = -0,39^{***}$ e $-0,58^{***}$, respectivamente). Plantas mais altas tem como característica maior comprimento de colmo, sendo essa estrutura menos eficiente fotossinteticamente. Além disso, sendo propensas ao acamamento, suas folhas causam sobreposição, diminuindo sua capacidade de interceptação. Uma correlação positiva de ALT com WUE e N% ($r = 0,35^{***}$ e $0,25^{**}$, respectivamente) foi observada (Figura 5).

Para o caractere largura da lâmina da folha bandeira (LARFB) as médias ficaram entre 0,75 cm (UTFT170013) e 1,60 cm (UTFT170242) (Tabela 4). No ambiente de CAMP, as linhagens UTFT170242 e UTFT170464, apresentaram os

maiores valores: 1,25 cm e 1,24 cm respectivamente (Tabela 4). No ambiente de PB, as linhagens UTFT150313, UTFT162323, UTFT170242, UTFT170464, UTFT170490, UTFT170500, UTFT170588 e UTFT170615 foram as de maior LARFB. Em REN, as linhagens de maior LARFB foram UTFT162323, UTFT170074, UTFT170242, UTFT170490 e UTFT170588.

Quando avaliado o comprimento da lâmina da folha bandeira (COMPLFB), no ambiente de CAMP, a cultivar UTF25 se destacou (24,24 cm), junto das linhagens UTFT170588 (23,75 cm), UTFT170074 (23,64 cm) e UTFT174090 (23,37 cm). Já no ambiente de PB, o maior valor de COMPLFB foi obtido pela linhagem UTFT170500 (24,45 cm). Por fim, em REN, as linhagens UTFT170588 (23,25 cm), UTFT170074 (22,65 cm) e a cultivar UTF25 (23,32 cm) apresentaram maior COMPLFB (Tabela 4).

Ao observar as correlações, LARFB se correlacionou negativamente com WUE ($r = -0,21^*$). Geralmente, plantas com maiores áreas foliares tendem a consumir mais água durante seu crescimento, o que resulta em valores baixos de WUE. A LARFB apresentou ainda, uma correlação negativa com P_n ($r = -0,24^*$), podemos inferir que plantas com elevada LARFB tendem a causar sombreamento as demais folhas, resultado em uma menor P_n e, por fim, entre as correlações negativas, LARFB se correlacionou negativamente com MS ($r = -0,50^{***}$), mostrando que ao investir em maior área foliar verde a planta apresentou menos peso de colmo e espiga que compoem o peso de MS, por exemplo. LARFB apresentou ainda, uma correlação positiva com COMPB ($r = 0,32$). Para Wei et al. (2020), a maior área foliar através da largura da folha e menor ângulo de folha pode contribuir para a maior acúmulo de biomassa e rendimento.

O COMPLFB se correlacionou positivamente com WUE ($r = 0,21^*$), ALT ($r = 0,33^{***}$), COMPB ($r = 0,37^{***}$) e COMPP ($r = 0,52^{***}$) e negativa com P_n ($r = -0,22^*$) (Figura 5). Embora um aumento na largura e comprimento de folha seja uma forma eficaz de expandir a área foliar de uma planta, o comprimento excessivo resultaria em queda das folhas (YANG *et al.*, 2018), o que é desfavorável para utilização da luz e produção de assimilados (KUMAGAI *et al.* 2014).

Para o caractere massa seca (MS), entre todos os ambientes, a linhagem UTFT170490 foi a que apresentou o maior valor (10,10 g), o menor teor de massa seca foi encontrado nas linhagens UTFT170464 e UTFT170500 ambos com 3,33 g de MS. No ambiente de CAMP, as linhagens UTFT170490 (10,10 g) e UTFT170464 (9,68 g) tiveram o maior MS. Quando avaliado o ambiente de PB, a linhagem UTFT150313

se destacou (6,25 g) e, no ambiente de REN, as linhagens UTFT150313 e UTFT170074 foram as de maior MS, com 7,42 e 7,37 g, respectivamente (Tabela 5). A MS se correlacionou positivamente com o caractere fisiológico de Pn (0,35***). Rodrigues *et al.* (2007) cita que o incremento de biomassa total está normalmente relacionado à interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e a eficiência de sua conversão em biomassa. A MS esteve ainda correlacionada positivamente com WUE ($r = 0,23^*$).

Para comprimento do pedúnculo (COMP), a cultivar UTF25 obteve os maiores valores em ambos os locais (Tabela 5). Em CAMP, as linhagens de maior COMP foram UTFT170588 (33,94 cm), UTFT170013 (32,16 cm), UTFT150313 (31,88 cm), UTFT170074 (30,78 cm) e UTFT162323 (29,44 cm). Em PB, as linhagens UTFT170588 e UTFT170013 foram as de maior COMP com 34,65 e 33,81 cm, respectivamente. A linhagem UTFT170464 se destacou por apresentar um baixo COMP entre os ambientes analisados (18,57 cm). Esses resultados estão de acordo com o encontrado na literatura (MUHAMMAD *et al.*, 2020).

Tabela 5 – Médias para 12 genótipos (GEN) de trigo avaliados em três localidades Campo Erê/SC (CAMP), Pato Branco/PR (PB) e Renascença/PR (REN), quanto aos caracteres comprimento de pedúnculo (COMP, cm) e massa seca (MS, g). UTFPR, Pato Branco, 2022.

GEN	COMP			MS		
	CAMP	PB	REN	CAMP	PB	REN
UTF25	32,33aA	32,95aA	35,75aA	8,11bA	5,48bC	6,42bB
UTFT150313	31,88aA	30,63bA	26,90cB	7,15cA	6,25aB	7,42aA
UTFT162323	29,44aA	27,93cA	28,17cA	7,83bA	4,82cC	6,85bB
UTFT170013	32,16aA	33,81aA	32,53bA	8,24bA	3,42dC	5,40cB
UTFT170074	30,78aA	30,91bA	31,21bA	7,16cA	5,69bB	7,37aA
UTFT170220	28,05bA	27,51cA	28,51cA	5,47dA	4,10cB	4,97dA
UTFT170242	27,44bA	27,63cA	28,24cA	8,56bA	4,46cC	6,92bB
UTFT170464	25,28bA	25,07cA	18,57eB	9,68aA	3,33dC	5,76cB
UTFT170490	25,44bA	26,61cA	26,08cA	10,10aA	4,58cB	4,96dB
UTFT170500	25,89bA	27,47cA	27,17cA	8,03bA	3,33dC	4,69dB
UTFT170588	33,94aA	34,65aA	32,92bA	6,85cA	4,35cC	6,06cB
UTFT170615	25,11bA	25,34cA	23,43dA	7,36cA	4,34cB	6,79bA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade de erro

Fonte: Autoria própria (2022)

O COMP possui alta herdabilidade genética (REHMAN *et al.*, 2015), no entanto, os resultados encontrados no presente estudo demonstram que essa característica também pode ser fortemente influenciada por condições ambientais. Soares (2020) observou que genótipos sob condições de estresse hídrico, podem promover considerável redução no seu comprimento de pedúnculo.

O tecido foliar é o principal órgão fotossintético das plantas, no entanto, órgãos não foliares possuem capacidade fotossintética real ou potencial (GUIDO; HARDY, 2003). Estudos indicam que órgão não foliares em trigo mostraram capacidade de assimilar CO₂ pela via C4 da fotossíntese (SINGAL *et al.*, 1986). O COMP é uma característica importante, pois há uma contribuição das reservas dos pedúnculos de 10,2% na produtividade de trigo (BORRELL *et al.*, 1993).

Para comprimento de bainha (COMPB), não foi observada interação significativa genótipo x ambiente (Tabela 6). Desta forma, apenas o efeito simples entre os genótipos foram avaliados (Tabela 6). A linhagem UTFT150313 apresentou maior COMPB (18,82 cm), já as linhagens UTFT162323 (16,63 cm), UTFT170500 (16,50 cm), UTFT170464 (16,07 cm), UTFT170242 (15,88 cm), UTFT170490 (15,86 cm), UTFT170615 (15,86 cm) e UTFT170220 (15,51 cm) foram as de menor COMPB. Dentre os locais, PB apresentou as maiores médias de COMPB (17,68 cm), seguido por CAMP (16,69 cm) e REN (16,08 cm).

Tabela 6 – Médias para 12 genótipos de trigo e três locais de cultivo (CAMP, PB e REN) para o caractere comprimento de bainha (COMPB). UTFPR, Pato Branco, 2022.

GEN/LOC	COMPB
141457	17,88b
150313	18,82a
162323	16,63c
170013	17,33b
170074	17,60b
170220	15,51c
170242	15,88c
170464	16,07c
170490	15,86c
170500	16,50c
170588	17,83b
170615	15,86c
CAMP	16,69b
PB	17,68a
REN	16,08c

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autoria própria (2022)

O COMPB apresentou uma correlação positiva com WUE ($r = 0,23^*$ (Figura 5)). Resultados semelhantes foram encontrados por Araus *et al.*, (1993); Wang *et al.*, (2001); e Xu e Wang, (2001), onde em resposta à seca e alta temperatura, os órgãos não foliares do trigo como a bainha mostraram vantagens na resistência ao estresse e resultaram em maior WUE do que nas folhas. Uma correlação positiva também foi encontrada entre COMPB, N% e ALT ($r = 0,29^{**}$ e $r = 0,66$, respectivamente). COMPB se correlacionou negativamente com os parâmetros fisiológicos Pn ($r = -0,41^{***}$) e

COMPB x E ($r = -0,46^{***}$), esse resultado pode estar relacionado a baixa capacidade fotossintética que a bainha possui.

Os rendimentos de grãos (RG), variaram significativamente entre as linhagens avaliadas, variando entre 7021,33 a 3311,33 kg ha⁻¹ (Tabela 7). No ambiente de CAMP, a cultivar UTF25 apresentou o maior RG (5255,33 kg ha⁻¹), seguida das linhagens UTFT170220 (5004,00 kg ha⁻¹), UTFT170074 (4836,67 kg ha⁻¹), UTFT170588 (4584,00 kg ha⁻¹) e UTFT170013 (4575,33 kg ha⁻¹). No ambiente de PB, a cultivar UTF 25 apresentou o maior RG, seguida das linhagens: UTFT170220 (5054,67 kg ha⁻¹), UTFT170074 (5015,33 kg ha⁻¹), UTFT170013 (4976,67 kg ha⁻¹), UTFT170588 (4963,00 kg ha⁻¹), UTFT170242 (4849,67 kg ha⁻¹) e UTFT150313 (4545,00 kg ha⁻¹). Já no ambiente de REN, a linhagem UTFT170074 obteve o maior RG (7021,33 kg ha⁻¹), seguida da cultivar testemunha UTF 25 (6968,00 kg ha⁻¹), e das linhagens UTFT162323 (6700,00 kg ha⁻¹) e UTFT170464 (6360,00 kg ha⁻¹). Em ambos ambientes avaliados a cultivar UTF 25 e as linhagens UTFT170220, UTFT170074 e UTFT170013 apresentaram alto potencial produtivo.

As correlações de Pearson (Figura 5), mostraram que RG apresentou uma correlação positiva com Pn ($r = 0,34^{***}$), resultado semelhante foi encontrado por Beche et al. (2010), o qual estudando cultivares de trigo lançadas em diferentes décadas, concluiu que o melhoramento e a seleção para cultivares de maior rendimento estão associados à maior taxa fotossintética. Dessa forma, quanto maior a taxa fotossintética, maior acúmulo de fotoassimilados, resultado em maior potencial produtivo.

O RG também se correlacionou positivamente com E ($r = 0,56^{***}$). O mesmo foi encontrado por Zheng et al. (2011), que observaram uma correlação de $r = 0,63^*$ entre E e RG, indicando a importância das características fotossintéticas para a melhoria do rendimento de grãos. Uma correlação negativa foi encontrada entre RG e WUE ($r = -0,34^{***}$). Em contraste, Wang et al. (2010) analisaram um conjunto de cruzamentos de trigo e encontraram uma correlação positiva entre WUE e RG ($r = 0,99^*$). Os autores ainda propuseram que tanto a WUE como a Pn podem ser a base fisiológica para alcançar o alto rendimento nas culturas.

O peso de mil sementes (PMS) (Tabela 7), mostrou diferença significativa entre os genótipos e ambientes analisados. Dentre as linhagens, UTFT170220 foi a que demonstrou maior PMS (30,94 g). Entre todos os ambientes analisados, a cultivar testemunha UTF25 foi a de maior PMS (34,84 g). Apenas no ambiente REN, as

linhagens UTFT170074, UTFT162323, UTFT170242 e UTFT170490 apresentaram os maiores valores, de 30,28; 30,22; 29,28; 28,95 g, respectivamente. Uma correlação positiva foi encontrada entre PMS com COMP, RG e PH ($r = 0,21^*$, $0,54^{***}$ e $0,61^{***}$, respectivamente). PMS também se correlacionou negativamente com ANGFB ($r = -0,24^*$) e N% ($r = -0,27^{**}$). Daaloul Bouacha *et al.* (2014) relataram que o nitrogênio parece aumentar o teor de proteína e reduzir o PMS.

Tabela 7 – Médias para 12 genótipos (GEN) de trigo avaliados em três localidades Campo Erê/SC (CAMP), Pato Branco/PR (PB) e Renascença/PR (REN), quanto aos caracteres rendimento de grãos (RG, kg ha⁻¹), peso de hectolitro (PH, g hl⁻¹), peso de mil sementes (PMS, g). UTFPR, Pato Branco, 2022.

GEN	RG			PH			PMS		
	CAMP	PB	REN	CAMP	PB	REN	CAMP	PB	REN
UTF25	5255,33aB	5645,67aB	6968,00aA	75,75aA	75,75aA	74,55aA	34,33aA	34,84aA	30,33aB
150313	4154,67bB	4545,00aB	5982,67bA	73,05bB	70,49cC	75,75aA	26,33dA	26,75dA	27,85bA
162323	4040,00bB	4094,67bB	6700,00aA	71,71bB	71,57cB	74,85aA	28,17cB	28,58cB	30,22aA
170013	4575,33aA	4976,67aA	5099,33bA	72,00bB	72,67bB	74,70aA	26,48dA	26,48dA	27,08bA
170074	4836,67aB	5015,33aB	7021,33aA	72,30bB	70,58cB	74,40aA	28,52cA	28,85cA	30,28aA
170220	5004,00aA	5054,67aA	5514,67bA	75,60aA	75,79aA	73,40bB	30,32bA	30,94bA	28,13bB
170242	4246,00bB	4849,67aB	6038,67bA	70,20cB	71,07cB	72,75bA	27,15cB	28,15cB	29,28aA
170464	4168,00bB	4256,67bB	6360,00aA	73,50bA	69,78cB	72,45bA	25,95dB	26,60dB	28,53bA
170490	3724,67bB	3531,00bB	5345,33bA	70,95cB	70,37cB	74,55aA	26,20dB	26,41dB	28,95aA
170500	3311,33bB	3779,67bB	5510,67bA	68,40dB	68,55dB	72,30bA	25,15dB	24,64dB	27,17bA
170588	4584,00aB	4963,00aB	5681,33bA	72,90bA	73,60bA	75,15aA	27,02cA	26,26dA	27,72bA
170615	3816,00bB	3538,67bB	5744,00bA	68,40dB	68,70dB	74,85aA	24,57dB	25,63dB	28,08bA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade de erro
Fonte: Autoria própria (2022)

Para o caractere peso hectolitro (PH), nos ambientes de CAMP e PB, a cultivar UTF25 (75,75 e 75,60 kg hl⁻¹, respectivamente) e a linhagem UTFT170220 (75,75 e 75,79 kg hl⁻¹, respectivamente) obtiveram os maiores valores de PH. No ambiente de REN a linhagem UTFT150313 apresentou o maior PH (75,75 kg hl⁻¹), seguida de UTFT170588 (75,15 kg hl⁻¹), UTFT170615 (74,85 kg hl⁻¹), UTFT162323 (74,85 kg hl⁻¹), UTF25 (74,55 kg hl⁻¹), UTFT170013 (74,70 kg hl⁻¹), UTFT170490 (74,05 kg hl⁻¹) e UTFT170074 (74,40 kg hl⁻¹) (Tabela 7). O PH é um caractere importante a ser avaliado, pois está relacionado com parâmetros de qualidade do trigo, na prática, paga-se menos ao produtor quando a massa hectolétrica se apresenta abaixo de 78 kg hl⁻¹ (BRASIL, 2010). Por fim, o PH apresentou uma correlação positiva com RG ($r = 0,58^{***}$), COMP ($r = 0,27^{**}$) e TR ($r = 0,28^{**}$). O PH ainda, se correlacionou negativamente com o caractere fisiológico de WUE ($r = -0,27^{**}$) e, com os caracteres morfológicos: LARFB ($r = -0,23^{**}$) e ANFB ($r = -0,20^*$).

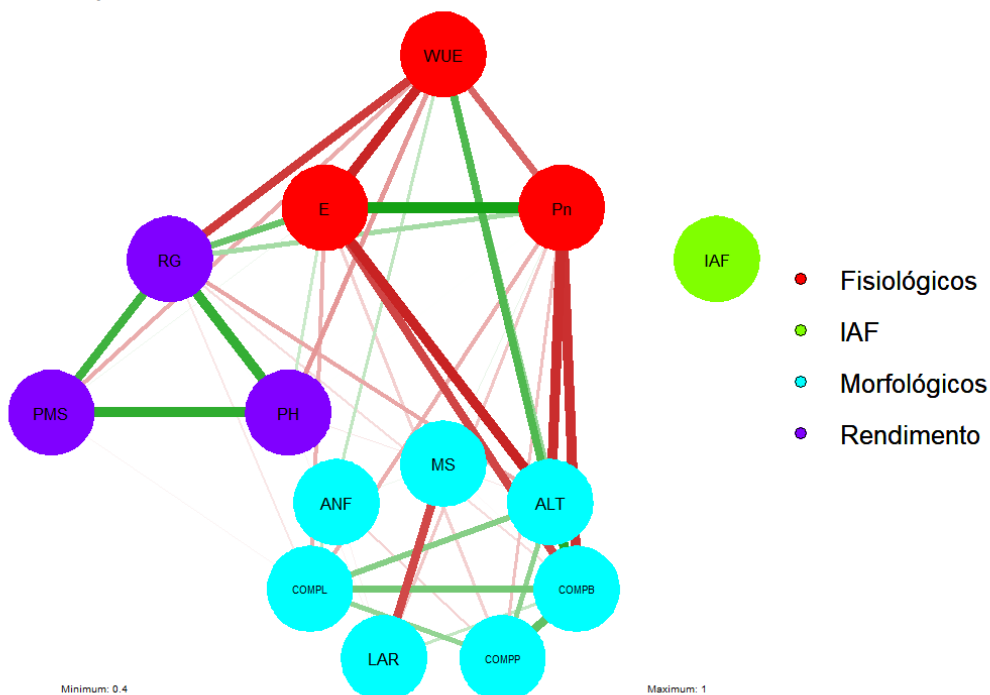
4.5 Rede de correlações

A análise gráfica da rede de correlações é uma estratégia eficaz para entender a associação entre os parâmetros, principalmente quando há um grande número de parâmetros analisados (CASAGRANDE *et al.*, 2022). Compreender as características de uma planta que possuem impacto no rendimento é essencial para o desenvolvimento de novas estratégias em programas de melhoramento.

Foi possível indentificar grupos de características que apresentam alto grau de associação linear (Figura 7). A análise visual da rede de correlações apresenta nós que correspondem as características avaliadas; linhas verdes correspondem a correlações positivas e linhas vermelhas a correlações negativas.

Figura 6 - Rede de correlação entre os caracteres morfológicos: ângulo de folha bandeira (ANFB), índice de área foliar (IAF), massa seca (MS), altura de planta (AP), comprimento da bainha (COMB), comprimento do pedúnculo (COMP), largura da lâmina da folha bandeira (LARFB), e comprimento da lâmina da folha bandeira (COMPLFB); caracteres de rendimento: rendimento de grãos (RG), peso do hectolitro (PH) e peso de mil sementes (PMS); e, caracteres fisiológicos: eficiência do uso da água (WUE), taxa de fotossíntese (Pn), taxa de transpiração (E), e nitrogênio foliar (N%)

Rede de correlações



Nota: Ponto de corte: 0,4; Linhas vermelhas indicam correlação negativa e verdes positivas, entre os caracteres

Fonte: Autoria própria (2022)

A espessura da linha está relacionada com a força da correlação, ou seja, quanto mais espessa a linha maior a força de correlação (mais próxima de 1) entre os caracteres. Além disso, apenas correlações acima de 0,4 são plotadas na Figura 7.

O IAF não apresentou correlação com os grupos de caracteres morfológicos e fisiológicos de trigo (Figura 7).

Houve correlação dentro do grupo de parâmetros fisiológicos. Exceto Pn, que se correlacionou positivamente com E, todos os demais parâmetros fisiológicos se correlacionaram negativamente (E, WUE, e Pn). O mesmo pode ser observado para os caracteres de rendimento, que apresentaram alta correlação entre si (PH, RG e PMS), podendo um deles ser escolhido para processo de seleção em programas de melhoramento.

Ao observar a correlação entre grupos, N% apresentou uma forte correlação negativa com RG e uma correlação positiva com LARGFB. E e Pn apresentaram uma forte correlação negativa com ALT. Pn se correlacionou negativamente com COMPB. Por fim, entre o grupo de parâmetros morfológicos, ALT se correlacionou positivamente com COMPB.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foram determinados os IAF para linhagens de trigo em estágio fenológico de enchimento de grãos pelo método destrutivo com o emprego de imagens de uma câmera digital no Software ImageJ. Não foi possível estimar o IAF pelo método não destrutivo de aprendizado de máquinas com o uso de imagens RGB, os algoritmos testados não apresentaram um bom desempenho (regressão linear, $r^2=0,0473$; Random Forest, $r^2=0,0089$; Support Vector Machine, $r^2=0,0028$ e Tree, $r^2=0,0115$), não sendo viável dessa forma a estimativa desse parâmetro. Estudos futuros com o emprego de imagens multiespectrais são necessários para estimar o IAF de forma confiável e em larga escala para a cultura do trigo. O IAF apresentou uma ausência de correlação com os parâmetros morfofisiológicos avaliados.

O trabalho de pesquisa realizado destaca a importância de características fisiológicas e morfológicas como Pn, E, ANGFB, LARFB e ALT. Linhagens de trigo de alto rendimento podem ser selecionadas concentrando-se nessas características. Dentre as linhagens de trigo testadas, UTFT170013 apresenta um bom desempenho para a maioria das características (Pn, E, IAF, COMP, RG, PMS e PH). A linhagem UTFT170500 apresenta melhor desempenho para Pn, E, IAF, ANGFB, LARFB, COMPLFB. O rendimento de UTFT170074 foi o maior entre as linhagens testadas, além disso, UTFT170074 se destacou para as características de IAF, LARFB, COMPFB, COMP, MS, PMS e PH. A linhagem UTFT170242 apresentou bons valores para Pn, E, IAF, LARFB, RG e PMS. Destacou-se ainda, a linhagem UTFT170588 por apresentar bom desempenho nas seguintes características avaliadas: IAF, LARFB, COMPFB, COMP, RG e PH. Portanto, essas linhagens são recomendadas no programa de melhoramento visando o desenvolvimento de materiais superiores.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, M. R. **Satellite monitoring of the earth (K.-H. Szekiolda)**. [S. l.]: Wiley Online Library, 1990.
- ACRECHE, M. M.; SLAFER, G. A. Grain weight, radiation interception and use efficiency as affected by sink-strength in Mediterranean wheats released from 1940 to 2005. **Field Crops Research**, v. 110, n. 2, p. 98–105, 10 fev. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.006>.
- ADAMI, M.; *et al.* Estimativa de área de folíolos de soja usando imagens digitais e dimensões foliares. **Bragantia**, v. 67, p. 1053–1058, dez. 2008. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000400030>.
- ADDINGTON, R. N.; *et al.* Stomatal sensitivity to vapor pressure deficit and its relationship to hydraulic conductance in *Pinus palustris*. **Tree Physiology**, v. 24, n. 5, p. 561–569, 1 maio 2004. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.5.561>.
- ALVES, M. da S. **Produtividade e qualidade de cultivares de trigo em resposta a épocas de semeadura e manejo do solo em região de clima tropical de altitude**. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Paulista, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/193371>. Acesso em: 5 ago. 2022.
- ANDO, K.; *et al.* Improvement of photosynthetic rate evaluation by plant bioelectric potential using illuminating information and a neural network. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, p. 105808, 1 dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105808>.
- ARAUS, J. L.; CAIRNS, J. E. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. **Trends in Plant Science**, v. 19, n. 1, p. 52–61, 1 jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.09.008>.
- ARENHARDT, L. G. Eficiência de aproveitamento de adubação nitrogenada por cultivares de trigo em sistema nabo/trigo. 12 mar. 2020. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/6603>. Acesso em: 5 ago. 2022.
- ASCHAN, G.; PFANZ, H. Non-foliar photosynthesis – a strategy of additional carbon acquisition. **Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 198, n. 2, p. 81–97, 1 jan. 2003. <https://doi.org/10.1078/0367-2530-00080>.
- ASSENG, S.; *et al.* Model-Driven Multidisciplinary Global Research to Meet Future Needs: The Case for “Improving Radiation Use Efficiency to Increase Yield”. **Crop Science**, v. 59, n. 3, p. 843–849, 2019. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.09.0562>.
- BAKSHANDEH, E.; KAMKAR, B.; TSIALTAS, J. T. Application of linear models for estimation of leaf area in soybean [*Glycine max* (L.) Merr]. **Photosynthetica**, v. 49, n. 3, p. 405, 17 set. 2011. <https://doi.org/10.1007/s11099-011-0048-5>.

BALLARÉ, C. L.; CASAL, J. J. Light signals perceived by crop and weed plants. **Field Crops Research**, v. 67, n. 2, p. 149–160, 1 jul. 2000.

[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00090-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00090-3).

BAMBI, P. **Variação sazonal do índice da área foliar e sua contribuição na composição da serapilheira e ciclagem de nutrientes na floresta de transição no norte do Mato Grosso. 2007.** 2007. PhD Thesis – Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente)–Instituto de Ciências Exatas ..., 2007.

BARTLETT, M. K.; SCOFFONI, C.; SACK, L. The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: a global meta-analysis. **Ecology Letters**, v. 15, n. 5, p. 393–405, 2012.

<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01751.x>.

BECHE, Eduardo et al. Genetic gain in yield and changes associated with physiological traits in Brazilian wheat during the 20th century. **European Journal of Agronomy**, v. 61, p. 49-59, 2014.

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. As plantas e o clima: princípios e aplicações. **Agrolivros, Guaíba. 351p**, 2017.

BLUM, A.; BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential— are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 56, n. 11, p. 1159–1168, 30 nov. 2005.

<https://doi.org/10.1071/AR05069>.

BORRELL, A. K.; INCOLL, L. D.; DALLING, M. J. The Influence of the Rht1 and Rht2 Alleles on the Deposition and Use of Stem Reserves in Wheat. **Annals of Botany**, v. 71, n. 4, p. 317–326, 1 abr. 1993. <https://doi.org/10.1006/anbo.1993.1041>.

BOSCHINI, A. P. M. Produtividade e qualidade de grãos de trigos influenciados por nitrogênio e lâminas de água no Distrito Federal. 8 abr. 2010. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/8060>. Acesso em: 5 ago. 2022.

BRANDÃO, Z. N.; *et al.* Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. **O agronegócio do algodão no Brasil. Brasília: Embrapa Informacao Tecnológica, cap**, v. 20, p. 1309, 2008.

BRASIL. **Instrução normativa N° 38 de 30 de novembro de 2010.** [S. l.]: Ministério da agricultura pecuária e abastecimento, 2010.

BRASIL. **Regras para análise de sementes (RAS).** [S. l.]: Ministério da agricultura pecuária e abastecimento, 2009.

BRODRIBB, T. J.; *et al.* Xylem function and growth rate interact to determine recovery rates after exposure to extreme water deficit. **New Phytologist**, v. 188, n. 2, p. 533–542, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03393.x>.

BRUM, A. L.; HECK, C. R. As Políticas Brasileiras de Fomento à Cultura do Trigo. n. 3, p. 24, 2004.

BUTTERY, B. R.; BUZZELL, R. I.; FINDLAY, W. I. Relationships among photosynthetic rate, bean yield and other characters in field-grown cultivars of

soybean. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 61, n. 2, p. 190–197, abr. 1981. <https://doi.org/10.4141/cjps81-029>.

CARON, B. O.; *et al.* Eficiência do uso da radiação solar por plantas *Ilex paraguariensis* a. st. hil. cultivadas sob sombreamento e a pleno sol. **Ciência Florestal**, v. 24, p. 257–265, jun. 2014. <https://doi.org/10.5902/1980509814563>.

CARVALHO, J. M. G. **Desenvolvimento, produção e nutrição de trigo adubado com nitrogênio e potássio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Mato Grosso, Rondonópolis, 2014. Disponível em: <http://ri.ufmt.br/handle/1/1094>. Acesso em: 5 ago. 2022.

CASAGRANDE, C. R.; *et al.* Association between unmanned aerial vehicle high-throughput canopy phenotyping and soybean yield. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 3, p. 1581–1598, 2022. <https://doi.org/10.1002/ajq2.21047>.

CAZETTA, D. A.; FILHO, D. F.; ARF, O. Resposta de cultivares de trigo e triticale ao nitrogênio no sistema de plantio direto. **Científica**, v. 35, n. 2, p. 155–165, 2007. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2007v35n2p155>.

CHIANUCCI, F.; *et al.* Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 47, p. 60–68, 1 maio 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jaq.2015.12.005>.

CONAB. **Acompanhamento da safra de grãos 2020/21 - 3º edição**. [S. l.]: Companhia nacional de abastecimento, 2020.

CONAB. **Boletim da safra de grãos - 10º levantamento safra 2021/22**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 4 jun. 2022.

CRAIN, J.; *et al.* Combining High-Throughput Phenotyping and Genomic Information to Increase Prediction and Selection Accuracy in Wheat Breeding. **The Plant Genome**, v. 11, n. 1, p. 170043, 2018. <https://doi.org/10.3835/plantgenome2017.05.0043>.

CUI, B.; *et al.* Leaf chlorophyll content retrieval of wheat by simulated RapidEye, Sentinel-2 and EnMAP data. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 6, p. 1230–1245, 1 jun. 2019. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62093-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62093-3).

DA SILVEIRA CARRERA, U. Variação intra-específica na anatomia da folha e do lenhófilo de *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC. (Bignoniaceae) em ambientes distintos. [s. d.].

DE SOUZA FILHO, C. R.; *et al.* Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG). **Brazilian Journal of Geology**, v. 38, n. 2, p. 228–243, 2008.

DONG, H.; *et al.* Genome-wide association studies reveal that members of bHLH subfamily 16 share a conserved function in regulating flag leaf angle in rice (*Oryza sativa*). **PLOS Genetics**, v. 14, n. 4, p. e1007323, 4 abr. 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1007323>.

DURAI, S. K. S.; SHAMILI, M. D. Smart farming using Machine Learning and Deep Learning techniques. **Decision Analytics Journal**, v. 3, p. 100041, 1 jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100041>.

ECHER, E.; SOUZA, M. P.; SCHUCH, N. J. A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, p. 276–283, set. 2001. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172001000300004>.

EDUVIRGEM, R. V.; PERIÇATO, A. J.; SOARES, C. R. Análise do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada do córrego Lombo em Maringá, Paraná. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 14, n. 2, 17 dez. 2018. DOI [10.17271/1980082714220181924](https://doi.org/10.17271/1980082714220181924). Disponível em: https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/1924. Acesso em: 5 ago. 2022.

EMBRAPA. Cultura do trigo. 2014. Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemas_deproducaolf6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaold=3704&p_r_p_-996514994_topicold=3047. Acesso em: 20 dez. 2020.

EVANS, J. R.; LORETO, F. Acquisition and Diffusion of CO₂ in Higher Plant Leaves. In: LEEGOOD, R. C.; SHARKEY, T. D.; VON CAEMMERER, S. (orgs.). **Photosynthesis: Physiology and Metabolism**. Advances in Photosynthesis and Respiration. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000. p. 321–351. DOI [10.1007/0-306-48137-5_14](https://doi.org/10.1007/0-306-48137-5_14). Disponível em: https://doi.org/10.1007/0-306-48137-5_14. Acesso em: 5 ago. 2022.

FALCÃO, H. M.; *et al.* Phenotypic plasticity and ecophysiological strategies in a tropical dry forest chronosequence: A study case with Poincianella pyramidalis. **Forest Ecology and Management**, v. 340, p. 62–69, 15 mar. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.12.029>.

FAO. **Leveraging food systems for inclusive rural transformation**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017(The state of food and agriculture, 2017).

FAOSTAT. 2018. **Crop production statistics**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QI>. Acesso em: 11 jan. 2021.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **Package ‘ExpDes. pt’**. [S. l.: s. n.], 2021.

FERREIRA JUNIOR, J. A.; *et al.* Avaliação de genótipos de soja em diferentes épocas de plantio e densidade de semeadura no município de Uberaba–MG. **FAZU em Revista**, v. 1, n. 7, p. 13–21, 2010.

FELIPETTO, Henrique dos Santos *et al.* Imagens multiespectrais a partir de um VANT (Veículo aéreo não tripulado) na estimativa da produtividade do trigo. 2022.

FIGUEIREDO, K. V.; *et al.* Changes in leaf epicuticular wax, gas exchange and biochemistry metabolism between *Jatropha mollissima* and *Jatropha curcas* under

semi-arid conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 37, n. 6, p. 108, 14 maio 2015. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1855-2>.

FIOREZE, S. L. **Comportamento produtivo do trigo em função da densidade de semeadura e da aplicação de reguladores vegetais**. 2011. Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2011.

FONTANA, D. C.; *et al.* Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura da soja através de dados do sensor Modis. **Bragantia**, v. 71, p. 563–571, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052012000400015>.

FORNASIERI FILHO, D. Manual da cultura do trigo. **Jaboticabal: Funep**, v. 338, 2008.

GERARD, G. S.; *et al.* Grain yield genetic gains and changes in physiological related traits for CIMMYT's High Rainfall Wheat Screening Nursery tested across international environments. **Field Crops Research**, v. 249, p. 107742, 1 abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107742>.

GEWEHR, E. Eficiência técnica e econômica de produção em trigo e os parâmetros de adaptabilidade e estabilidade na interação doses de nitrogênio e sistemas de cultivo. 28 ago. 2012. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/1066>. Acesso em: 5 ago. 2022.

GIORIO, P.; SORRENTINO, G.; D'ANDRIA, R. Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthetic response in field-grown olive trees under water deficit. **Environmental and Experimental Botany**, v. 42, n. 2, p. 95–104, 1 out. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(99\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(99)00023-4).

GIUNTA, F.; *et al.* Durum wheat cultivars grown in Mediterranean environments can combine high grain nitrogen content with high grain yield. **European Journal of Agronomy**, v. 136, p. 126512, 1 maio 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126512>.

GLADJU, J.; KAMALAM, B. S.; KANAGARAJ, A. Applications of data mining and machine learning framework in aquaculture and fisheries: A review. **Smart Agricultural Technology**, v. 2, p. 100061, 1 dez. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100061>.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Digital image processing (preview). 2002. .

HEIFFIG, L. S.; *et al.* Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia**, v. 65, p. 285–295, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052006000200010>.

HUANG, J.; *et al.* Assimilating a synthetic Kalman filter leaf area index series into the WOFOST model to improve regional winter wheat yield estimation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 216, p. 188–202, 15 jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.013>.

HUANG, J.; *et al.* Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model. **Agricultural**

and **Forest Meteorology**, v. 204, p. 106–121, 15 maio 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.001>.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295–309, 1 ago. 1988. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).

JALEEL, C. A.; *et al.* Drought Stress in Plants: A Review on Morphological Characteristics and Pigments Composition. **Int. J. Agric. Biol.**, v. 11, n. 1, p. 7, 2009.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. [S. l.]: Parêntese editora, 2009.

KAMRAN, M.; *et al.* Paclobutrazol Application Favors Yield Improvement of Maize Under Semiarid Regions by Delaying Leaf Senescence and Regulating Photosynthetic Capacity and Antioxidant System During Grain-Filling Stage. **Agronomy**, v. 10, n. 2, p. 187, fev. 2020.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10020187>.

KASAMPALIS, D. A.; *et al.* Contribution of Remote Sensing on Crop Models: A Review. **Journal of Imaging**, v. 4, n. 4, p. 52, abr. 2018.
<https://doi.org/10.3390/jimaging4040052>.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro, p. 452, 2004. .

LAIDIG, F.; *et al.* Breeding progress, environmental variation and correlation of winter wheat yield and quality traits in German official variety trials and on-farm during 1983–2014. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 130, n. 1, p. 223–245, 1 jan. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00122-016-2810-3>.

LEV-YADUN, S.; GOPHER, A.; ABBO, S. The Cradle of Agriculture. **Science**, v. 288, n. 5471, p. 1602–1603, 2 jun. 2000. <https://doi.org/10.1126/science.288.5471.1602>.

LI, Y.; *et al.* Estimation of leaf area index for winter wheat at early stages based on convolutional neural networks. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 190, p. 106480, 1 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106480>.

LI, Y.; *et al.* Improving water-use efficiency by decreasing stomatal conductance and transpiration rate to maintain higher ear photosynthetic rate in drought-resistant wheat. **The Crop Journal**, v. 5, n. 3, p. 231–239, 1 jun. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.01.001>.

LIANG, L.; *et al.* Estimation of crop LAI using hyperspectral vegetation indices and a hybrid inversion method. **Remote Sensing of Environment**, v. 165, p. 123–134, 1 ago. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.032>.

LIAO, S.-H.; CHU, P.H.; HSIAO, P.Y. Data mining techniques and applications – A decade review from 2000 to 2011. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 12, p. 11303–11311, 15 set. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.063>.

LIMA, R. H. P. Interação genótipo x ambiente em ensaios de valor de cultivo e uso em cultivares de arroz vermelho. 21 mar. 2019. Disponível em:
<https://tede.ufrrj.br/handle/jspui/5376>. Acesso em: 5 ago. 2022.

LINHARES, A.; NEDEL, J.; MOTA, F. **Agrometeorologia do trigo no Brasil**. [S. l.: s. n.], 1989.

LIU, J.; *et al.* A major vernalization-independent QTL for tiller angle on chromosome arm 2BL in bread wheat. **The Crop Journal**, v. 10, n. 1, p. 185–193, 1 fev. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.02.013>.

LIU, J.; *et al.* Nondestructive detection of rape leaf chlorophyll level based on Vis-NIR spectroscopy. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 222, p. 117202, 5 nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117202>.

LIU, Y.; *et al.* Effect of polyamines on the grain filling of wheat under drought stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 100, p. 113–129, 1 mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.01.003>.

LOPES, E. C. S. **Condutividade hidráulica, eficiência fotoquímica e trocas gasosas em genótipos de soja (*Glycine max* L.) com diferentes capacidades de nodulação**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2017.

MANAVALAN, L. P.; *et al.* Physiological and Molecular Approaches to Improve Drought Resistance in Soybean. **Plant and Cell Physiology**, v. 50, n. 7, p. 1260–1276, 1 jul. 2009. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp082>.

MARONE, D.; *et al.* Genome-Wide Association Mapping of Prostrate/Erect Growth Habit in Winter Durum Wheat. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 2, p. 394, jan. 2020. <https://doi.org/10.3390/ijms21020394>.

MAZZONCINI, M.; *et al.* Organically vs conventionally grown winter wheat: Effects on grain yield, technological quality, and on phenolic composition and antioxidant properties of bran and refined flour. **Food Chemistry**, v. 175, p. 445–451, 15 maio 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.138>.

MENDIBORU, F. **Package ‘agricolae’**. R Package version, v. 1, n. 3. [S. l.]: R package, 2019.

MENESES, P. R. Princípios de sensoriamento remoto. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UnB/CNPq, , p. 1–33, 2012. .

MESSINGER, S. M.; BUCKLEY, T. N.; MOTT, K. A. Evidence for Involvement of Photosynthetic Processes in the Stomatal Response to CO₂. **Plant Physiology**, v. 140, n. 2, p. 771–778, 1 fev. 2006. <https://doi.org/10.1104/pp.105.073676>.

MOGHIMI, A.; YANG, C.; ANDERSON, J. A. Aerial hyperspectral imagery and deep neural networks for high-throughput yield phenotyping in wheat. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 172, p. 105299, 1 maio 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105299>.

MOLERO, G.; *et al.* Elucidating the genetic basis of biomass accumulation and radiation use efficiency in spring wheat and its role in yield potential. **Plant Biotechnology Journal**, v. 17, n. 7, p. 1276–1288, 2019. <https://doi.org/10.1111/pbi.13052>.

MONTEITH, J. L.; *et al.* Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences**, v. 281, n. 980, p. 277–294, 25 nov. 1977. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>.

MORAES, E. C. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. [S. l.]: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCTI), 2002. Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/vcsr/files/capitulo_1.pdf. Acesso em: 9 jul. 2020.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. [S. l.]: UFV, 2005.

MUHAMMAD, I.; *et al.* Identification of biotic stress tolerant wheat germplasm using morphological and molecular approaches. **Gene Reports**, v. 21, p. 100928, 1 dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2020.100928>.

MUNIER-JOLAIN, N. G.; SALON, C. Are the carbon costs of seed production related to the quantitative and qualitative performance? An appraisal for legumes and other crops. **Plant, Cell & Environment**, v. 28, n. 11, p. 1388–1395, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01371.x>.

NETTO, A. T.; *et al.* Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v. 104, n. 2, p. 199–209, 30 mar. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.08.013>.

NOVELINI, L. Disponibilidade da radiação solar e eficiência de cultivos consorciados de milho safrinha e feijão. 20 jul. 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufpel.edu.br:8080/handle/prefix/4208>. Acesso em: 5 ago. 2022.

OLIVEIRA, A. D. de; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. de J. D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 86–95, abr. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000100010>.

OTTO, M. S. G.; *et al.* Fotossíntese, condutância estomática e produtividade de clones de Eucalyptus sob diferentes condições edafoclimáticas. **Revista Árvore**, v. 37, p. 431–439, jun. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300006>.

OU, L. J.; *et al.* Effects of low temperature and low irradiance on the physiological characteristics and related gene expression of different pepper species. **Photosynthetica**, v. 53, n. 1, p. 85–94, 1 mar. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0084-7>.

OVIDO, A. F. P.; RUDORFF, B. F. T. Índice de área foliar e resposta espectral da cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) submetida ao estresse hídrico. **Revista Biociências**, v. 6, n. 2, 2000. Disponível em: <http://periodicos.unitau.br/ojs/index.php/biociencias/article/view/39>. Acesso em: 5 ago. 2022.

PAIVA, Y. G. Estimativa do índice de área foliar por métodos óticos e sensoriamento remoto para calibrar modelo ecofisiológico em plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado. 24 jul. 2009. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/5282>. Acesso em: 5 ago. 2022.

- PENG, Y.; *et al.* Gross Primary Production Estimation in Crops Using Solely Remotely Sensed Data. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2981–2990, 2019. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.05.0332>.
- PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. 2010. ed. São José dos Campos: **Parêntese**. 128 p. 2010.
- POPMA, J.; BONGERS, F. Acclimation of seedlings of three Mexican tropical rain forest tree species to a change in light availability. **Journal of Tropical Ecology**, v. 7, n. 1, p. 85–97, fev. 1991. <https://doi.org/10.1017/S0266467400005137>.
- RAJCAN, I.; SWANTON, C. J. Understanding maize–weed competition: resource competition, light quality and the whole plant. **Field Crops Research**, v. 71, n. 2, p. 139–150, 28 jun. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00159-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00159-9).
- RAY, D. K.; *et al.* Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. **PLOS ONE**, v. 8, n. 6, p. e66428, 19 jun. 2013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>.
- RHARRABTI, Y.; *et al.* Environmental and genetic determination of protein content and grain yield in durum wheat under Mediterranean conditions. **Plant Breeding**, v. 120, n. 5, p. 381–388, 2001. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0523.2001.00628.x>.
- RICHARDS, R. A. Manipulation of leaf area and its effect on grain yield in droughted wheat. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 34, n. 1, p. 23–31, 1983. <https://doi.org/10.1071/ar9830023>.
- RICHTER, G. L.; *et al.* Estimating leaf area of modern soybean cultivars by a non-destructive method. **Bragantia**, v. 73, p. 416–425, dez. 2014. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0179>.
- RISTIC, Z.; JENKS, M. A. Leaf cuticle and water loss in maize lines differing in dehydration avoidance. **Journal of Plant Physiology**, v. 159, n. 6, p. 645–651, 1 jan. 2002. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-0743>.
- RODRIGUES, Osmar *et al.* Fifty years of wheat breeding in Southern Brazil: yield improvement and associated changes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 817–825, 2007.
- ROMANO, M. R. **Desempenho fisiológico da cultura de milho com plantas de arquitetura contrastante: parâmetros para modelos de crescimento**. 2005. text – Universidade de São Paulo, 2005. DOI [10.11606/T.11.2005.tde-08062005-161952](https://doi.org/10.11606/T.11.2005.tde-08062005-161952). Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-08062005-161952/>. Acesso em: 5 ago. 2022.
- ROUSE JR, J. W.; *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. 351., 1973. **Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: The Proceedings of a Symposium Held by Goddard Space Flight Center at Washington, DC on [...]**. [S. l.: s. n.], 1973. v. 351, p. 309.
- SANKARAN, S.; *et al.* Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. **European Journal of Agronomy**, v. 70, p. 112–123, 1 out. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.07.004>.

SANTOS, M. G.; *et al.* Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, n. 1, p. 83–99, 1 mar. 2014. <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0008-0>.

SCHEPERS, L.; *et al.* Burned Area Detection and Burn Severity Assessment of a Heathland Fire in Belgium Using Airborne Imaging Spectroscopy (APEX). **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1803–1826, mar. 2014. <https://doi.org/10.3390/rs6031803>.

SCHEUER, P. M.; *et al.* Trigo: características e utilização na panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, n. 2, p. 211–222, 30 jun. 2011. <https://doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v13n2p211-222>.

SCHIRRMANN, M.; *et al.* Monitoring Agronomic Parameters of Winter Wheat Crops with Low-Cost UAV Imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 9, p. 706, set. 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8090706>.

SCHMIDT, D. A. M.; *et al.* Variabilidade genética em trigos brasileiros a partir de caracteres componentes da qualidade industrial e produção de grãos. **Bragantia**, v. 68, p. 43–52, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000100006>.

SCHWALBERT, R. A.; *et al.* Satellite-based soybean yield forecast: Integrating machine learning and weather data for improving crop yield prediction in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 284, p. 107886, 15 abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107886>.

SILVA, F. G. da; *et al.* Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 946–952, out. 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p946-952>.

SILVA, S. C. P. da. **Modelagem espectral para determinação da concentração e fluxo de co2 em paisagens naturais e antrópicas na região amazônica**. 2014. Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/17971>. Acesso em: 5 ago. 2022.

SILVA, J. A. D. **Respostas fisiológicas da soja submetida ao estresse hídrico e compactação do solo**. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

SINGAL, H. B.; SHEORAN, I. S.; SINGH, R. In vitro enzyme activities and products of ¹⁴CO₂ assimilation in flag leaf and ear parts of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Photosynthesis Research**, v. 8, n. 2, p. 113–122, 1 jan. 1986. <https://doi.org/10.1007/BF00035242>.

SINGHAL, G.; *et al.* Chlorophyll estimation using multi-spectral unmanned aerial system based on machine learning techniques. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 15, p. 100235, 1 ago. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100235>.

SOARES, G. F. **Fenotipagem para tolerância à seca e validação de sensores hiperespectrais e de fluorescência em genótipos de trigo**. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/39763>. Acesso em: 5 ago. 2022.

STREIT, N. M.; *et al.* As clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, p. 748–755, jun. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000300043>.

TAGLIAPIETRA, E. L.; *et al.* Optimum Leaf Area Index to Reach Soybean Yield Potential in Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 3, p. 932–938, 2018. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.09.0523>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal 5ªed. **Porto Alegre: Editora Artmed**, 2013.

TAIZ, L.; *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal - 6ed.** [S. l.]: Artmed Editora, 2017.

TEDESCO, M. J.; *et al.* **Análises de solo, plantas e outros materiais.** [S. l.]: Ufrgs Porto Alegre, 1995. v. 5.

TIAN, H.; *et al.* An IPSO-BP neural network for estimating wheat yield using two remotely sensed variables in the Guanzhong Plain, PR China. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 169, p. 105180, 1 fev. 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105180>.

TIAN, H.; *et al.* An IPSO-BP neural network for estimating wheat yield using two remotely sensed variables in the Guanzhong Plain, PR China. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 169, p. 105180, 1 fev. 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105180>.

TIAN, J.; *et al.* Teosinte ligule allele narrows plant architecture and enhances high-density maize yields. **Science**, v. 365, n. 6454, p. 658–664, 16 ago. 2019. <https://doi.org/10.1126/science.aax5482>.

TRIBOI, E.; *et al.* Unravelling environmental and genetic relationships between grain yield and nitrogen concentration for wheat. **European Journal of Agronomy**, Modelling Quality Traits and Their Genetic Variability for Wheat. v. 25, n. 2, p. 108–118, 1 ago. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.004>.

USDA. **World agricultural production.** [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2022.

VIEIRA, T. G. C.; ALVES, H. M. R.; LACERDA, M. P. C. Parâmetros culturais para avaliação do comportamento espectral da cultura do café (*Coffea arabica*) em Minas Gerais. p. 9, 2003.

WALTER-SHEA, E. A.; *et al.* Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in Alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 1, p. 162–177, 1 jul. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00250-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00250-7).

WANG, B.; *et al.* Impact of climate change on wheat flowering time in eastern Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 209–210, p. 11–21, 15 set. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.028>.

WANG, L.; *et al.* Developing an integrated indicator for monitoring maize growth condition using remotely sensed vegetation temperature condition index and leaf area index. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 152, p. 340–349, 1 set. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.026>.

- WANG, Y.; *et al.* Investigation of product accuracy as a function of input and model uncertainties: Case study with SeaWiFS and MODIS LAI/FPAR algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 78, n. 3, p. 299–313, 1 dez. 2001.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00225-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00225-5).
- WATANABE, T.; *et al.* Rice Morphogenesis and Plant Architecture: Measurement, Specification and the Reconstruction of Structural Development by 3D Architectural Modelling. **Annals of Botany**, v. 95, n. 7, p. 1131–1143, 1 jun. 2005.
<https://doi.org/10.1093/aob/mci136>.
- WEI, H.; *et al.* Higher leaf area through leaf width and lower leaf angle were the primary morphological traits for yield advantage of japonica/indica hybrids. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 19, n. 2, p. 483–494, 1 fev. 2020.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62628-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62628-6).
- WOOD, C. W.; *et al.* Determination of cotton nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. **Journal of Plant Nutrition**, v. 15, n. 9, p. 1435–1448, 1 set. 1992.
<https://doi.org/10.1080/01904169209364409>.
- WOYANN, Leomar Guilherme *et al.* Ganho genético e seleção em gerações iniciais e em linhagens de trigo por meio de modelos mistos. 2018.
- XIE, W.; *et al.* Data Fusion Technology of Multi-Platform Earth Observation on Agriculture. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL7, p. 189–192, 1 ago. 2013.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W1-189-2013>.
- YAN, G.; *et al.* Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 265, p. 390–411, 15 fev. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.033>.
- YAN, W.; HUNT, L. a. Interpretation of Genotype × Environment Interaction for Winter Wheat Yield in Ontario. **Crop Science**, v. 41, n. 1, p. 19–25, 2001.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2001.41119x>.
- YANG, Y.; *et al.* Improved photosynthetic capacity during the mid- and late reproductive stages contributed to increased cotton yield across four breeding eras in Xinjiang, China. **Field Crops Research**, v. 240, p. 177–184, 1 jul. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.003>.
- YANOVSKY, M. J.; *et al.* Are phytochrome-mediated effects on leaf growth, carbon partitioning and extractable sucrose-phosphatesynthase activity the mere consequence of stem-growthresponses in light-grown mustard? **Journal of Experimental Botany**, v. 46, n. 7, p. 753–757, 1 jul. 1995.
<https://doi.org/10.1093/jxb/46.7.753>.
- ZANON, A. J.; *et al.* Ecofisiologia da soja visando altas produtividades. **Santa Maria: Palloti**, 2018.
- ZANON, A. J.; *et al.* Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, v. 74, p. 279–290, 21 jul. 2015.
<https://doi.org/10.1590/1678-4499.0463>.

ZHENG, T. C. et al. Genetic gains in grain yield, net photosynthesis and stomatal conductance achieved in Henan Province of China between 1981 and 2008. **Field Crops Research**, v. 122, n. 3, p. 225-233, 2011.

ZHANG, G.; *et al.* A nitrogen fertilizer strategy for simultaneously increasing wheat grain yield and protein content: Mixed application of controlled-release urea and normal urea. **Field Crops Research**, v. 277, p. 108405, 1 mar. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108405>.

ZHANG, W.; *et al.* The role of phosphorus supply in maximizing the leaf area, photosynthetic rate, coordinated to grain yield of summer maize. **Field Crops Research**, v. 219, p. 113–119, 15 abr. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.031>.

ZHAO, H.; *et al.* Monitoring of Nitrogen and Grain Protein Content in Winter Wheat Based on Sentinel-2A Data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 14, p. 1724, jan. 2019.
<https://doi.org/10.3390/rs11141724>.

ZHAO, H.; *et al.* Canopy morphological changes and water use efficiency in winter wheat under different irrigation treatments. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 19, n. 4, p. 1105–1116, 1 abr. 2020. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62750-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62750-4).

ZHOU, X.; *et al.* Reconstruction of time series leaf area index for improving wheat yield estimates at field scales by fusion of Sentinel-2, -3 and MODIS imagery. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 177, p. 105692, 1 out. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105692>.

ZHU, Y.; *et al.* Influencing factors for transpiration rate: A numerical simulation of an individual leaf system. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 27, p. 101110, 1 jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101110>.