



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
M O N D L A N E

ESCOLA SUPERIOR DE DESENVOLVIMENTO RURAL
DEPARTAMENTO DE PRODUÇÃO AGRÁRIA

Validação do índice de área foliar e teor de água na copa estimados através de imagens sentinel-2 na cultura do milho (*Zea mays* L): estudo de caso do distrito de Vilankulo.

Curso de Licenciatura em Produção Agrícola

Déyri Marlon Ibraimo

Vilankulo, Junho de 2023

DéyriI Marlon Ibraimo

Validação do índice de área foliar e teor de água na copa estimados através de imagens sentinel-2 na cultura do milho (*Zea mays* L): estudo de caso do distrito de Vilankulo.

Trabalho de Culminação de Curso a submeter no Departamento de Produção Agrária da Escola Superior de Desenvolvimento Rural - Universidade Eduardo Mondlane, para obtenção do grau de Licenciatura em Produção Agrícola

Sob supervisão de:

Prof. Doutor Sosdito Estêvão Mananze

UEM-ESUDER

Vilankulo

2023

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **DéyriI Marlon Ibraimo**, filho de Sheila Bibí M. A. M. Hussene, declaro por minha honra que este trabalho de culminação de curso é da minha plena autoria, sendo o seu conteúdo resultado de pesquisas por mim realizadas sob a orientação do supervisor. O conteúdo extraído de trabalhos de outros autores foi devidamente citado e as referências listadas de acordo com as normas vigentes na instituição. O trabalho nunca foi apresentado em qualquer instituição para a obtenção de qualquer grau acadêmico.

Vilankulo, aos _____ de Junho de 2023.

(DéyriI Marlon Ibraimo)

DEDICATÓRIA

À minha amada Mãe, Sheila Bibi M. A .M
Hussene e à minha Avó, Haissa Ibraimo
Figia, dedico este trabalho que representa o
fruto do seu esforço consistente para o meu
sucesso acadêmico...

AGRADECIMENTOS

Agradeço a *ALLAH* (Deus) pela saúde, força, fé e sua presença em todos os momentos da vida.

Incansavelmente, agradeço à minha Mãe, Sheila Bibi M. A. Hussene e a minha Avó Haïssa Ibrahimio Figia, que no meio de tantas dificuldades, não mensuraram esforços para que a minha formação se tornasse possível, pelo carinho, amor incondicional e pela confiança depositada em mim.

À minha prima, Halima Magide Mahammude, pelo apoio moral e financeiro durante a minha formação.

Ao meu supervisor, Sosdito Estêvão Mananze endereço a minha eterna gratidão pela oportunidade concedida, pelo acolhimento, pelos ensinamentos e conhecimento de que me dotou.

Aos meus irmãos, Cleide Chongo, Aclineto Chongo Júnior e Bruna Stella pelo carinho, que este trabalho sirva-lhes de inspiração.

Pelo encorajamento e apoio moral, agradeço ao Ibrahimio Valy Momedede e Aclineto A. Chongo.

Aos meus amados colegas, em especial Momad Duce, Emídio Marcelino, Dário Nhampule, Raul Machava, Marcelo Jessubo, Gersone Sabonete, Benilde Nhamposse, Paulo Macamo, Inacio Mapaco, Danifo Hassane, Lucerna Mussuei, Gerson Binguane, Nália Xavier, Leonilde Massirela, Eusébio Zandamela e Beatriz Zavale.

À Estela Eusébio Laquimane, pelo companheirismo e confidencialidade durante a partilha do campo experimental.

À todo corpo docente, em especial, Prof. Dr Joaquim Wate, Msc Teófilo Langa, Msc Godinho Zomane, Msc Paulo Goba, Msc Sacire Viagem, Prof. Dr Titki Tarasoum, Msc Lúcio Muchanga e dr. Adércio Munguambe pelos ensinamentos.

“Khanimambo Swinene”

LISTA DE ABREVIATURS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de abreviaturas

AD	Área do disco
AF	Área foliar
AT	Área total
CC	Capacidade de campo
DR	Detecção Remota
IAF	Índice de Área Foliar
MSI	Instrumento Multi-Espectral (<i>Multi- Spectral Instrument</i>)
PBFs	Parâmetros Biofísicos
PF	Peso fresco
PMP	Ponto de Murcha Permanente
PS	Peso Seco
SL2P	Protótipo de processamento do Sentinel Nivel 2 (<i>Sentinel Level 2 Prototip Processor</i>)
TAC	Teor de Água na Copa
TAF	Teor de Água na Folha
VIB	Velocidade de Infiltração Básica

Lista de siglas

CENACARTA	Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção
ESA	Agência Espacial Europeia (<i>European Space Agency</i>)
ESUDER	Escola Superior de Desenvolvimento Rural
FAO	Organização das nações unidas para Alimentação e Agricultura (<i>Food and Agriculture Organization of the united nations</i>)

GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
INE	Instituto Nacional de Estatística
MAE	Ministério de Administração Estatal
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
RMSE	Raíz quadrada do erro médio (<i>Root Mean Square Error</i>)
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SNAP	Plataforma de Aplicação do Sentinel (<i>Sentinel Application Platform</i>)
SPSS	Pacote Estatístico para Ciências Sociais (<i>Statistical Package for Social Sciences</i>)
UEM	Universidade Eduardo Mondlane
UE	União Europeia

Lista de símbolos

g	grama
H ₀	Hipótese nula
H ₁	Hipótese alternativa
ha	Hectare
Kg	Quilograma
Km	Quilometro
L	Litro
m	Metro
mL	Mililitro
pH	Potencial de Hidrogénio
R	Coeficiente de correlação de Pearson
R ²	Coeficiente de determinação
Ton	Tonelada
ρ	Coeficiente de correlação de Spearman

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Lista de tabelas	Página
Tabela 1: Fases de desenvolvimento da cultura do milho.....	6
Tabela 2 : Bandas espectrais do Sentinel-2.....	14
Tabela 3: Pontos de amostragem.....	18
Tabela 4: Descrição de imagens	20
Tabela 5: Estatística descritiva de índice de área foliar	25
Tabela 6: Estatística descritiva de índice de área foliar	26
Tabela 7: Correlação de variáveis	28

Lista de figuras	Página
Figura 1: Milho no estágio V3.....	7
Figura 2: Milho no estágio V6.....	8
Figura 3: Área foliar do milho.....	10
Figura 4: Mapa de Localização da área de estudo.....	16
Figura 5: Mapa de solos de vilankulo.....	17
Figura 6: Lai-2200C canopy analyzer	19
Figura 7: Grafico de comparação de variação temporal de IAF.....	25
Figura 8: Gráfico de comparação de Variação temporal do TAC.....	26
Figura 9: Mapas de variação temporal de IAF	26
Figura 10: Mapas de variação temporal de TAC.....	26
Figura 11: Gráfico de Correlação de IAF (LAI 2200C x Sentinel 2).....	26
Figura 12: Gráfico de Correlação de IAF (LAI 2200C x M. alométricas).....	30
Figura 13: Gráfico de Correlação de IAF (M. alométricas x Sentinel 2).....	30
Figura 14: Gráfico de Correlação de TAC (M. gravimétrico x Sentinel 2).....	32

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1: Testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para índice de área foliar.

Apêndice 2: Teste de normalidade de Kolmogorov-smirnov para teor de água na copa.

GLOSSÁRIO

Algoritmo - Sequência finita de instruções utilizadas como especificações para a realização de cálculos e processamento de dados.

Copa - Total da parte aérea de uma planta individual, incluindo caules, folhas e estruturas reprodutivas.

Monoica – Planta portadora de órgãos masculinos e femininos no mesmo indivíduo.

Píxel – Mínima unidade de área em uma imagem de satélite.

Reflectância – Unidade de medida da energia electromagnética reflectida por um alvo na superfície terrestre.

Resolução espacial – Área mínima homogênea coberta por um píxel.

Resolução Temporal – Frequência com a qual o satélite sobrepassa por um dado ponto da terra.

RESUMO

O conhecimento do estado das culturas no que diz respeito aos parâmetros biofísicos (PBFs), tais como o Índice de Área Foliar (IAF) e Teor de Água na Copa (TAC) é um aspecto fundamental para o alcance de uma óptima produtividade. A mensuração dos PBFs por métodos directos apresenta como desafio as limitações espaciais e temporais, para além de serem destrutivos. Portanto, Vários algoritmos para aplicações agrícolas têm sido desenvolvidos com base nas imagens Sentinel 2, incluindo modelos específicos Para a estimativa de Parâmetros biofísicos, dentre os quais, IAF e TAC. Contudo, a sua aplicação em contexto de sistemas agrícolas pouco intensivos requer uma prévia avaliação. Portanto, o presente estudo foi realizado com o objectivo de avaliar a aplicabilidade dos dados das imagens Sentinel-2 na estimativa de parâmetros biofísicos na culturas do milho. Para tal, foi conduzido um ensaio em uma área homogênea de 0,41 ha com o genótipo de milho *Topo (KC9089)* no Campus da Escola superior de Desenvolvimento Rural (ESUDER). Com frequência de 5 dias foram estimados o IAF e TAC com a resolução de 10 m e 20 m respectivamente em 4 parcelas de 20 m x 20m cada. Para a validação, foram implementados métodos directos, que consistiram em: medições alométricas e o uso do equipamento LAI 2200C para o IAF. Para TAC foi aplicado o método gravimétrico que consiste na obtenção da diferença entre os pesos fresco e seco. Os dados foram submetidos ao teste de correlação no pacote estatístico IBM SPSS e comparados através do coeficiente de determinação (R^2) e raiz quadrada do erro médio (RMSE). Para o IAF, correlação forte ($R^2= 0,67$) foi obtida entre as estimativas por imagens Sentinel 2 e os dados alométricos, pese embora com o $RMSE=1,4 \text{ m}^2/\text{m}^2$, evidenciando, desta forma, a precisão do Sentinel-2 na estimativa do IAF. Para o TAC Foi constatada uma correlação forte ($R^2 =0,72$), porem erros bastante elevados foram verificados ($RMSE=4,3 \text{ g}/\text{m}^2$), o que revelou uma grande subestimativa dos valores do TAC por imagens Sentinel 2.

Palavras-chave: Milho; Detecção remota; Sentinel-2; Índice de Área foliar; Teor de água na copa.

ABSTRACT

The knowledge of the crop status about its biophysical parameters, such as leaf area index (LAI) and canopy water content (CWC) is a fundamental aspect to reach good yields. The measurement of biophysical parameters by direct methods presents challenges such as spatial and temporal limitations besides of being destructive, So algorithms based on Sentinel-2 images has been developed for agricultural applications, including specific models for biophysical parameters estimations. However, its application in context of non intensive crop systems requires a previous evaluation. Therefore the present research was developed with the purpose of evaluating the applicability of Sentinel 2 imagery data for estimating biophysical parameters on Maize crop. The study took place at the campus of Rural Development School (ESUDER) in an area of 0,41 ha with the genotype of maize Topo (KC9089), with the frequency of 5 days LAI and CWC were estimated using 10 m and 20 m resolution respectively, with 4 plots of 20 x 20 meters each. For the validations were employed direct methods which consisted on the usage of allometric measurements and the usage of LAI 2200C equipment. For CWC was employed the gravimetric method which consisted on obtaining the difference between fresh and dry weight. Correlation tests were performed using IBM SPSS and were compared using determination coefficient (R^2) and the root mean square error (RMSE). For LAI, strong correlation ($R^2=0,67$) was obtained between allometric measurements data and Sentinel 2 estimations, which demonstrate the accuracy of Sentinel-2 data in the estimations of LAI, however, errors ($RMSE = 1,4 \text{ m}^2/\text{m}^2$) were obtained. For CWC the estimations by Sentinel 2 demonstrated a high correlation with the gravimetric method data ($R^2=0,72$), however high errors ($RMSE = 4,03 \text{ g}/\text{m}^2$) were obtained. Which showed a high underestimation of CWC estimated based on Sentinel-2 imagery data.

Key-Words: Maize; Remote sensing; Sentinel-2; Leaf area index; Canopy water content.

ÍNDICE

I. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Problema de estudo	2
1.3. Justificativa de estudo	3
1.4. Objectivos	4
1.4.1. Geral.....	4
1.4.2. Específicos.....	4
1.5. Hipóteses.....	4
II. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. A cultura do milho	5
2.1.1. Origem e evolução	5
2.1.2. Taxonomia e morfologia	5
2.1.3. Estágios de desenvolvimento.....	6
2.1.4. Área foliar & Índice de área foliar	9
2.1.4.1. Métodos de medição	9
2.1.4.2. Medições alométricas	10
2.1.4.3. Detecção remota.....	11
2.1.5. Água na planta.....	12
2.2. O Sentinel-2	13
III. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1. Localização da área de estudo	16
3.2. Área experimental.	16
3.2.2. Instalação e tratos culturais.....	17
3.3. Colecta de dados	18
3.3.1. Índice de área foliar	18
3.3.1.1. Medição do IAF com base no equipamento LAI-2200C	18
3.3.1.2. Medição do IAF com base nos dados alométricos.....	19
3.3.1.3. Estimativa do IAF com base em imagens Sentinel-2.....	19
3.3.2. Teor de água na copa	21
3.3.2.1. Obtenção do TAC com base nos dados gravimétricos.....	21
3.3.2.2. Estimativa do TAC com base em imagens Sentinel-2.....	22

3.4. Análise de dados	22
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1. Estatística descritiva das variáveis.....	25
4.1.2. Índice de área foliar.....	25
4.1.3. Teor de água na copa.....	26
4.2. Mapeamento da evolução temporal das variáveis	26
4.2.2. Índice de área foliar.....	26
1.1.2. Teor de água na copa.....	27
4.3. Eficiência do algoritmo SL2P.....	28
4.3.1. Índice de área foliar	28
4.3.2. Teor de água na copa.....	32
V. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	34
5.1. Conclusão.....	34
5.2. Recomendações	34
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	35

I. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A detecção remota é a arte de obtenção de informação de um alvo da superfície terrestre sem entrar em contacto físico com o mesmo (Acharya *et al.*, 2018; Da Silva & Souza, 2021; Singh *et al.*, 2008). Segundo (Formagio & Sanches, 2017) a sua aplicação na agricultura tem sido estudada desde a década de 1970.

Os primeiros estudos envolvendo a detecção remota na agricultura basearam-se na avaliação da viabilidade e potencialidades do uso de sensores multiespectrais do primeiro Satélite (Landsat-1) na estimativa da área cultivada do trigo (*Triticum spp.*) globalmente. Em sequência foram levantados estudos com cereais de interesse global como o caso do milho (Formagio & Sanches, 2017).

A energia eletromagnética constitui a ligação entre as componentes da detecção remota (Da Silva & Souza, 2021; Piekarczyk *et al.*, 2016) e uma vez reflectida pela vegetação nos diversos comprimentos de onda é associada a características e estado das plantas. O desenvolvimento dos índices espectrais, criados com finalidades específicas, tornou possível a estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação como: Índice de área foliar (IAF) e teor de água na copa (TAC) das plantas (Pinter *et al.*, 2003).

O IAF, relação existente entre a área da folha e a área do solo ocupada pela cultura (Favarin, 2002) também considerada a razão total de todas as folhas por unidade de área ocupada pela vegetação (Campbell & Norman, 1998; Danelichen *et al.*, 2016) é segundo (Souza *et al.*, 2015) uma variável útil para a quantificação do crescimento nas plantas e fundamental para a produtividade.

A esta variável biofísica estão relacionados processos fisiológicos da planta e que são essenciais para a produtividade, tais como fotossíntese (Daughtry *et al.* 2000), respiração e transpiração (Mondo *et al.*, 2009), assim como está associada a produtividade, pois a produção de biomassa é ditada pela quantidade de radiação solar absorvida e convertida pelas folhas (Taiz & Zeiger, 2009).

O aumento do índice da área foliar resulta em maior área de captação de luz e como consequência maior taxa de realização de fotossíntese (Sangoi *et al.*, 2001), Portanto, o IAF é conhecido por ser uma variável relacionada à produção de biomassa (Formagio & Sanches 2017) que fornece indicações preliminares da produtividade (Faravin *et al.*, 2002).

A eficiência de interceptação de radiação fotossinteticamente activa depende da área de captação de radiação na copa da planta e da arquitetura foliar, que varia com o ângulo e formato das folhas (Raven, 2014).

Tal como o IAF, o teor de água na copa (TAC) é uma variável chave para a previsão do rendimento, pois a água é um factor abiótico que mais fortemente limita o crescimento das plantas (Irmak *et al.*, 2000).

Segundo (Taiz e Zeiger, 2009) para a produção de cada grama de matéria orgânica aproximadamente 500 g de água são necessárias. Portanto, o teor de água nas folhas deve ser mantido em condições ideais, de modo a dinamizar o processo da fotossíntese. O baixo teor de água nas folhas culmina com a redução de absorção de CO₂ em virtude do fechamento dos estomas.

1.2. Problema de estudo

A agricultura é a principal actividade económica em Moçambique (Mabilana *et al.*, 2012) e, portanto, predomina uma necessidade constante pela busca de técnicas que impulsionem a produção e produtividade agrícolas de modo a responder a demanda pelos produtos agrícolas e desta forma garantir a segurança alimentar no seio das comunidades.

Ao longo do tempo, equipamentos e técnicas que auxiliam na estimativa de PBFs nas culturas de interesse agronómico foram desenvolvidos, facto que resulta da necessidade de acompanhamento destes parâmetros de modo a conduzir as culturas à produtividade desejada.

Segundo (Souza *et al.*, 2015) a estimativa dos PBFs (IAF e TAC) por métodos directos (que exigem um contacto directo com a planta) apresenta como desafio as limitações espaciais e temporais, para além de serem destrutivos (exigem a remoção das folhas), o que confere a estes métodos uma desvantagem enorme.

Desta forma, é de grande interesse o desenvolvimento e teste de técnicas indirectas não destrutivas para avaliação da estrutura da copa das plantas, estimativa de parâmetros agronómicos, monitorização do crescimento e desenvolvimento (Júnior *et al.*, 2015).

As imagens de Sentinel 2 têm sido largamente usadas para a monitorização da agricultura. Vários algoritmos para aplicações agrícolas têm sido desenvolvidos com base nas imagens Sentinel 2, incluindo modelos específicos para a estimativa de parâmetros biofísicos,

dentre os quais, o Índice de Área Foliar (IAF) e Teor de Água na Copa (TAC). Porém, os referidos modelos têm sido calibrados, sobretudo, em sistemas agrícolas intensivos. Sendo assim, a sua aplicação em contexto de sistemas agrícolas pouco intensivos requer uma prévia avaliação. Portanto, em virtude disso, levanta-se a seguinte questão:

Qual é a precisão dos indicadores biofísicos do sentinel-2 na estimativa de índice de área foliar e teor de água na copa da cultura do milho (*Zea mays L.*) para o distrito de Vilankulo?

1.3. Justificativa de estudo

Para países como Moçambique, a DR tem sido apontada como uma ferramenta com grande potencial, podendo aumentar a rapidez e melhorar a cobertura espacial das informações (Mabilana *et al.*, 2012).

No caso específico da agricultura, a introdução de técnicas de DR reduz o tempo de processamento da informação sobre a situação das culturas agrícolas no campo e constitui uma fonte mais eficiente de obtenção de informações (Mabilana *et al.*, 2012), Pois segundo (Mananze *et al.*, 2018b), dados de detecção remota obtidos por vários sensores e processados com abordagem em diversos modelos têm revelado um alto potencial para a estimativa de PBFs. A validação dos seus produtos torna-se essencial, pois permite avaliar e tirar constatações sobre a adaptabilidade dos modelos em questão.

O conhecimento do IAF e TAC exerce extrema importância para a monitorização de culturas agronómicas, assim como para a gestão de práticas agrícolas, os modelos e algoritmos aplicados para as estimativas dessas variáveis fornecem sustento para a prática de agricultura de maior precisão.

Portanto, a realização desta pesquisa justifica-se pela necessidade de se conhecer a precisão das ferramentas de processamento do Sentinel-2 na estimativa de índice de área foliar e teor de água na copa da cultura do milho (*Zea mays L.*) para o distrito de Vilankulos.

1.4. Objectivos

1.4.1. Geral

- Avaliar a aplicabilidade dos dados das imagens Sentinel-2 na estimativa de parâmetros biofísicos na cultura do milho.

1.4.2. Específicos

- Identificar variações do índice de área foliar e teor de água na copa com base em imagens Sentinel-2;
- Testar a eficiência do algoritmo SL2P da plataforma de aplicação do Sentinel na estimativa de índice de área foliar e teor de água na copa da cultura do milho.

1.5. Hipóteses

H₀: O uso de imagens Sentinel-2 não fornece resultados precisos na estimativa de parâmetros biofísicos na cultura do milho (*Zea mays* L.) para o distrito de Vilankulos.

H₁: O uso de imagens Sentinel-2 fornece resultados precisos na estimativa de, pelo menos, um dos parâmetros biofísicos na cultura do milho (*Zea mays* L.) para o distrito de Vilankulos.

II. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. A cultura do milho

2.1.1. Origem e evolução

O milho (*Zea mays* L), é uma cultura anual produzida actualmente em várias partes do mundo (Barros & Calado, 2014). Evidências indicam que o seu centro de origem seja a região central do continente americano, concretamente na região mesoamericana, actualmente conhecida como México (Fernandes,2007; Hossain *et al.*,2016) e a sua domesticação deu-se entre 10000 a 7000 anos (Ranum & Pe, 2014).

A produção do milho tem aumentado significativamente em partes do mundo onde esta era insignificante (Clay, 2003). Nas últimas duas décadas, a produção global deste cereal aumentou em cerca de 2% (FAO, 2021). Em Moçambique, o milho é a cultura mais produzida, a sua produção ocupa aproximadamente um terço da área cultivada no país e é feita maioritariamente no sector familiar (Carrilho *et al.*, 2021; Mudema *et al.*, 2012). Segundo a FAO (2021) a produção anual do milho em Moçambique é de aproximadamente 2085 mil toneladas.

2.1.2. Taxonomia e morfologia

O milho (*Zea mays* L.) é uma planta anual pertencente a divisão *Magnoliophyta*; classe *Liliopsida*; ordem *poales*; família *poaceae* (gramínea), género *Zea* e espécie *Zea mays* (Bukler & Stevens, 2005; Kumar *et al.*, 2012).

O milho tem uma raiz fasciculada, com grande desenvolvimento, em solos favoráveis, a raiz atinge até 60 cm de profundidade. Normalmente a planta de milho contém três tipos de raízes: a) raiz principal, b) raiz secundária e c) raiz adventícia (Kumar *et al.*, 2012). A raiz primária origina do embrião e aprofunda-se ao solo no sentido vertical, as raízes secundárias originam-se a partir da raiz primária, formando ramificações. As raízes adventícias surgem a partir dos primeiros nós e fixam-se ao solo servindo de base de suporte para a planta (Barros & Calado, 2014).

Segundo os mesmos autores, o caule do milho é um colmo erecto de formato cilíndrico, apresenta-se em nós e entrenós não ramificados, esponjoso e relativamente ricos em açúcar, para além de suportar as folhar, o colmo tem a função de armazenar sacarose. É a espécie de maior porte dentre as gramíneas, segundo (Wondell-Fillho & Elias, 2010) a planta

pode atingir até 2,5 metros, dependendo da cultivar. Vale destacar que, a altura associa-se ao híbrido assim como às condições edáficas e climáticas.

As folhas encontram-se inseridas nos nós, são estreitas e dispostas alternativamente entre os lados do colmo com uma diferença muito destacada entre o comprimento e a largura (Paes, 2012).

O milho é uma planta monoica. A inflorescência masculina origina do topo da planta, da gema apical, e geralmente origina-se antes da inflorescência feminina. A inflorescência feminina é a espiga, que surge através de folhas modificadas que produzem pestilos que são os órgãos femininos (Barros & Calado, 2014).

A semente é formada por pericarpo, endosperma e embrião e tem, na sua composição, maior teor de amido, seguido por proteínas e ácidos graxos (Almeida *et al.*, 2016). A sua formação é oriunda do processo de fecundação cruzada, o que confere a cultura do milho a distinção de planta alógama (Barros & Calado, 2014).

2.1.3. Estágios de desenvolvimento

Segundo a classificação de (Ritchie, Hanway & Benson, 1993), a cultura do milho tem os seus estágios fenológicos classificados em duas categorias, a fase vegetativa (V) e reprodutiva (R). Na fase vegetativa, os estágios são distinguidos através do método do colar da folha, que é definido pelo número de colares das folhas na planta. Segundo (July & Bell, 2017) as folhas são contadas a partir da base do colmo à parte superior.

Tabela 1: Fases de desenvolvimento da cultura do milho

Fase vegetativa (V)	Fase reprodutiva (R)
VE- Emergência	R1- Florescimento e polinização
V1- Surgimento da primeira folha	R2- Grão em bolha
V2- Surgimento da segunda folha	R3- Grão leitoso
V3- Surgimento da terceira folha	R4- Grão pastoso
V4- Surgimento da quarta folha	R5- Grão dentado
VT- Pendoamento	R6- Maturação fisiológica

De acordo com (Kling & Edmeades, 1997), em condições de campo, nem sempre as plantas atingem um certo estágio em simultâneo. Contudo, considera-se alcançada uma determinada fase da cultura do milho quando, em pelo menos 50% das plantas, ocorrem os fenômenos que caracterizam a fase

Estágio VE

Neste estágio verifica-se o crescimento do sistema radicular seminal (Raízes oriundas directamente da semente), este estágio é caracterizado pela emergência das plantulas ao solo (Barros & Calado, 2014).

Estágio V3

Nesta fase, três folhas encontram-se totalmente desenvolvidas, este estágio ocorre aproximadamente duas semanas depois da sementeira, o ponto de crescimento encontra-se ainda por baixo do solo e o caule encontra-se ainda pouco desenvolvido (Magalhaes & Duraes, 2006).



FIGURA 1: Milho no estágio V6

Estágio V6

Para além de seis folhas totalmente desenvolvidas, neste estágio o ponto de crescimento encontra-se acima do nível do solo e as raízes fasciculadas encontram-se em crescimento e em pleno funcionamento (Magalhaes e Duraes, 2006).



FIGURA 2: Milho no estágio V6

Estágio V10

De acordo com (Barros & Calado, 2014) este estágio é caracterizado pela ocorrência de dez folhas totalmente desenvolvidas (com o colar visível), até esse estágio a taxa de desenvolvimento é de aproximadamente 2 a 3 dias por folha. As plantas iniciam um rápido aumento no acúmulo de nutrientes e matéria seca, que continuará durante o período reprodutivo. A demanda por água e nutrientes aumenta, na medida do aumento na taxa de crescimento

Estágio V12

Neste estágio o número de óvulos em cada espiga assim como o tamanho da espiga são determinados. Considerar que, nessa fase, inicia-se o período mais crítico para a produção, o qual estende-se até a polinização, neste estágio, a planta chega a atingir até cerca de 90% da área foliar (Barros & Calado, 2014).

Estágio R1

De acordo com (Magalhaes & Duraes, 2006), é neste estágio em que o número de ovulos a serem fertilizados é determinado. O estágio é marcado pela visualização dos estilos-estigmas fora das espigas.

Estágio R5

Este estágio é caracterizado pelo aparecimento de uma concavidade na parte superior do grão assim como é igualmente visível o início da senescência das folhas. Esta fase inicia aproximadamente 36 dias depois da polinização (Magalhaes & Duraes, 2006).

2.1.4. Área foliar & Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) é a razão existente entre a área foliar (AF) das plantas e a área total do solo por elas ocupada, considerando apenas um lado da folha (Myneni, 2012). O aumento da área foliar ocasiona um incremento no índice de área foliar.

O IAF tem sido largamente estudado, pois Segundo (Colaizzi *et al.*, 2017) existe uma correlação linear entre esta variável e a produção de matéria seca. O aumento da AF implica o aumento da área dos estomas e conseqüentemente aumenta o fluxo de trocas gasosas entre a planta e o meio externo (Patanè, 2011).

A importância da determinação da AF das culturas agrícolas é explicada pela estreita correlação entre esta variável e as taxas fotossintéticas bem como a transpiração das plantas, visto que reflete a capacidade da planta em interceptar as radiações e efetuar trocas gasosas (Daniel & Lagoas, 2002).

Para a cultura do milho, a redução da AF, quer seja por razões bióticas quanto abióticas, resulta na redução do crescimento e tanto quanto da produção (Sangoi *et al.* 2001 e 2002).

Contudo, (Vieira *et al.*, 2010) explicam que para o processo de transpiração, diante de grandes densidades de plantas, a redução da área foliar em algumas folhas não resulta na diminuição proporcional da densidade do fluxo de transpiração, sugerindo que isso ocorra para melhor exposição das folhas remanescentes á radiação solar.

Segundo (Pimentel & Rossiello, 1995) a actividade fotossintetica por área foliar aumenta com a expansão da folha, fenômeno que se verifica até ao alcance da expansão máxima da folha, seguindo-se de um decrescimo até a senescência.

2.1.4.1. Métodos de medição

Métodos de mensuração do IAF na cultura do milho (*Zea mays* L.) têm sido desenvolvidos e avaliados de forma constante, estes que vão desde medições alométricas (Colaizzi *et al.*, 2017; Mananze *et al.*, 2018a) que consiste em tirar medições directamente na folha, equipamentos medidores de IAF exclusivamente (LAI 2200C e LAI 2000), métodos gravimétricos, que consistem na pesagem das folhas (Aschonitis *et al.*, 2014), bem como com

sistemas de observação de terra , tais como a DR (Kganyago *et al.*, 2020, Mananze *et al.*, 2018b).

2.1.4.2. Medições alométricas

Desenvolvida e proposta por Montgomery (1911) e aplicada em uma vasta gama de estudos como (Mananze *et al.*, 2018a; Mokhtarpour *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2022) a equação clássica é a mais usada e, considerada padrão para o cálculo da AF para a cultura do milho quando aplicadas medições alométricas.

$$AF = 0,75 \times LF \times CF \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

AF: Área foliar (m²);

LF: Largura da folha (m);

CF: Comprimento da folha (m).

A equação é baseada na área do rectângulo, contudo, pela necessidade de corresponder a geometria das folhas da cultura do milho (*Zea mays* L.), foi proposto o factor de correção, cujo valor é 0,75 (Carvalho & Christoffoleti, 2007; Tanko & Hassan, 2016).

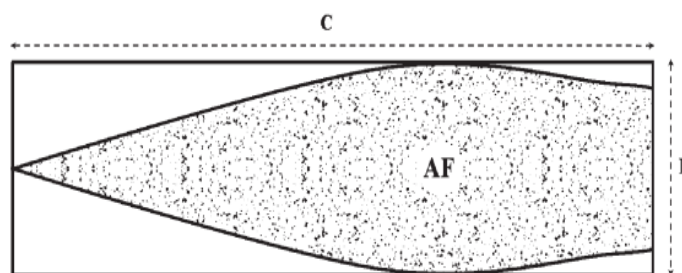


FIGURA 3: : Área foliar do Milho

Proposta por WATSON (1952), a equação de IAF mostra uma proporcionalidade directa com a AF.

$$IAF = \frac{AF}{AT} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

IAF: Índice de área foliar: (m^2/m^2);

AF: Área foliar (m^2);

AT: Área total (m^2).

A proporcionalidade directa entre o IAF e a AF é igualmente verificada na equação proposta por Dugje (1992) aplicada por Berdjour *et al.*, (2020):

$$IAF = (P \times NF \times AF)/A \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

IAF:Índice de área foliar (m^2/ m^2);

P: População de plantas por área do solo;

NF: Número de folhas;

AF: Área foliar da folha de referência (cm^2);

A: Área do solo (m^2).

2.1.4.3. Detecção remota

Os sistemas de observação de terra, especificamente a DR permitem a aquisição de dados que possibilitam inferir o estado das culturas em campo de produção (Gómez-Dans *et al.*,2022). Estudos como (Cleveres *et al.*, 2017; Pasquallato *et al.*, 2019) relatam o alcance de bons resultados no uso de imagens multiespectrais do satélite sentine-2 na estimativa de variáveis biofísicas da vegetação, dentre as quais o IAF.

Contudo, (Gómez-Dans *et al.*, 2022) relatam a complexidade da relação entre o IAF e a reflectancia da energia electromagnetica pela superficie terrestre. Segundo (Crocì *et al.*, 2022) Para a estimativa do IAF por imagens de satélites, tem-se implementado as abordagens estatísticas que baseam-se em algoritmos e na associação dos Índices de Vegetação (IV) que surgem da combinação de duas ou mais bandas espectrais, tais como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), cuja relação com o IAF é relatada por Bochenek *et al.*, (2017), Mullo & Prudnikova (2020), Xing *et al.*, (2021).

Devido a sensibilidade das bandas do *red edge* ao IAF, IVs baseados nas regiões das mesmas bandas mostram-se também serem habilidosos na estimativa do IAF (Madonsela *et al.*, 2021; Xie *et al.*, 2018).

O algoritmo desenvolvido por Weiss & Baret (2016) denominado Protótipo de Processamento do Sentinel nível-2 (SL2P) permite a estimativa do IAF através de imagens pré-processadas a nível 2A e 2B das imagens multiespectrais através da plataforma de aplicação do Sentinel (SNAP).

A avaliação do algoritmo SL2P mereceu, recentemente, o objecto de estudo por parte de Brown *et al.*, (2021), Hú *et al.*, (2020), Kganyago *et al.*, (2020), Tsele *et al.*, (2022), Vinué *et al.*, (2017) com vista a evidenciar o seu desempenho, estudos acima referenciados foram desenvolvidos em diversas regiões e em diferentes condições ambientais e em diferentes tipos de vegetação.

Para a estimativa de IAF através da DR, técnicas envolvendo abordagens físicas constituem uma alternativa, estas são explicadas exhaustivamente por Croci *et al.*, (2022); Kganyago, *et al.*, (2022). Segundo os mesmos autores, as abordagens em causa são pouco implementadas em virtude da sua complexidade.

2.1.5. Água na planta

A água desempenha um papel fundamental na integridade funcional das células e moléculas biológicas. A célula fisiologicamente activa necessita de um ambiente com 80 a 95% de água em relação a massa verde, contudo o teor de água varia com o tipo de planta e o estágio fenológico (Marenco & Lopes, 2015).

A água tem um papel fundamental nos processos vitais das plantas, das principais funções, destaca-se a manutenção da turgescência nas células e tecidos vegetais (Santos & Carlesso, 1998), divisão celular, fotossíntese e translocação de solutos (Galon *et al.*, 2010).

É referido pelos mesmos autores que o suprimento das necessidades hídricas combinado com um o máximo IAF e ideal disponibilidade de radiação solar condiciona a expressão de grandes produtividades por parte da cultura do milho.

O milho é uma cultura sensível ao estresse hídrico, as suas exigências hídricas variam entre 450-600 mm de água por ciclo com um consumo de 4 a 6 mm por dia (Fancelli & Dourado-Neto, 2004).

Segundo (Viera *et al.*, 2010) cerca de 90% da água absorvida pela planta no solo é perdida através da copa pelo processo de transpiração que decorre como explicito pela teoria de Dixon.

A magnitude das perdas por estresse hídrico depende da duração e da severidade do estresse e do estágio fenológico da planta afectada (Sah *et al.*, 2020). De acordo com (Magalhaes & Durães, 2006) a fase da floração é considerada a fase mais sensível ao estresse hídrico e a mais crucial para a produtividade, pois segundo o mesmos autores, podem ocorrer limitações a uma margem superior a 50% quando o estresse hídrico ocorre nessa fase.

Nas primeiras etapas da fase vegetativa o estresse resulta em plantas com fraco vigor e potencial fotossintético para a produção de biomassa, na fase reprodutiva, o estresse hídrico ou baixo teor de água na copa da cultura do milho causa o aborto de sementes (Santos & Carlesso, 1998), assim como afecta a formação do zigoto, enchimento do grau e baixa a produtividade (Pradawet *et al.*, 2023).

Inúmeros métodos têm sido levados a cabo de modo a quantificar o teor de água nas folhas e na copa das plantas, O mais comum é representar esta variável pela diferença entre o peso fresco e o peso seco das folhas (Ustin, 2016), o algoritmo SL2P adoptado pela SNAP permite a estimativa desta variável por imagens multiespectrais do Sentinel-2 (Weiss & Baret 2016).

2.2. O Sentinel-2

Desenvolvido pela União Europeia (UE), o satélite Sentinel-2A foi lançado no ano de 2015, com posterior lançamento, de forma complementar, do sentinel-2B em 2017, ambos com um dos propósitos o monitorização de áreas vegetadas (Addabbo *et al.*, 2016; Cohrs *et al.*, 2020). O satélite foi lançado no âmbito do programa da UE designado Copernicus. Tal como previsto no início do programa, o Sentinel foi desenhado com o objectivo de dar continuidade a missão do Landsat e do SPOT (Nakar, 2019)

O lançamento do Sentinel-2 A e B pela Agência Espacial Europeia (ESA) providenciou um suporte à agricultura de precisão, através do fornecimento de imagens com um número elevado de bandas espectrais, alta resolução espacial e com alta frequência de revisita (Segarra *et al.*, 2020).

De modo a dinamizar o monitorização das áreas cobertas pelo Sentinel (1, 2 e 3), a Agência Espacial Europeia (ESA) desenvolveu uma plataforma de aplicação do Sentinel (SNAP), uma ferramenta que serve de auxílio para o processamento de imagens e um impulso para a agricultura de precisão através de ferramentas de processamento de que dispõe (Addabbo *et al.*, 2016).

O sentinel-2 é um satélite activo com uma resolução temporal de 5 dias, alternados entre o sentinel-2A e o sentinel-2B, com a resolução espacial de 10 a 60 m entre as 13 bandas que são por este cobertas. Dentre as quais 4 com resolução de 10 m, 6 bandas com resolução de 20 m e 3 bandas com resolução 60 m.

Tabela 2: Bandas espectrais do Sentinel-2

Bandas	Designação	Resolução	Comprimento de onda central (nm)
B1	Aerosóis	60 m	443
B2	Azul	10 m	490
B3	Verde	10 m	560
B4	Vermelho	10 m	665
B5	<i>Red edge</i> 1	20 m	705
B6	<i>Red edge</i> 2	20 m	740
B7	<i>Red edge</i> 3	20 m	783
B8a	Infravermelho proximo	10 m	842
B8b	<i>Red edge</i> 4	20 m	865
B9	Vapor de água	60 m	945
B10	Cirrus	60 m	1375
B11	SWIR 1	20 m	1610
B12	SWIR 2	20 m	2190

Fonte: (Weiss & Baret, 2016).

O seu sensor denominado Instrumento Multi-Espectral (MSI) tem a capacidade de cobertura simultânea de 100 km x 100 km, correspondente a uma folha de imagem (Addabbo *et al.*, 2016). As imagens são disponibilizadas em diferentes níveis de pré-processamento (L1C e L2A), correspondente a reflectância acima e abaixo da atmosfera, respectivamente, assim como a correção atmosférica pode ser executada pelo algoritmo *Sen-2Cor* (Segarra *et al.*, 2020).

III. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área de estudo

O ensaio foi conduzido entre os meses de Julho e Novembro no campus da Escola Superior de Desenvolvimento Rural (ESUDER) da Universidade Eduardo Mondlane (UEM), no distrito de Vilankulo (21 59' 25''S ; 35 16' 11''E).

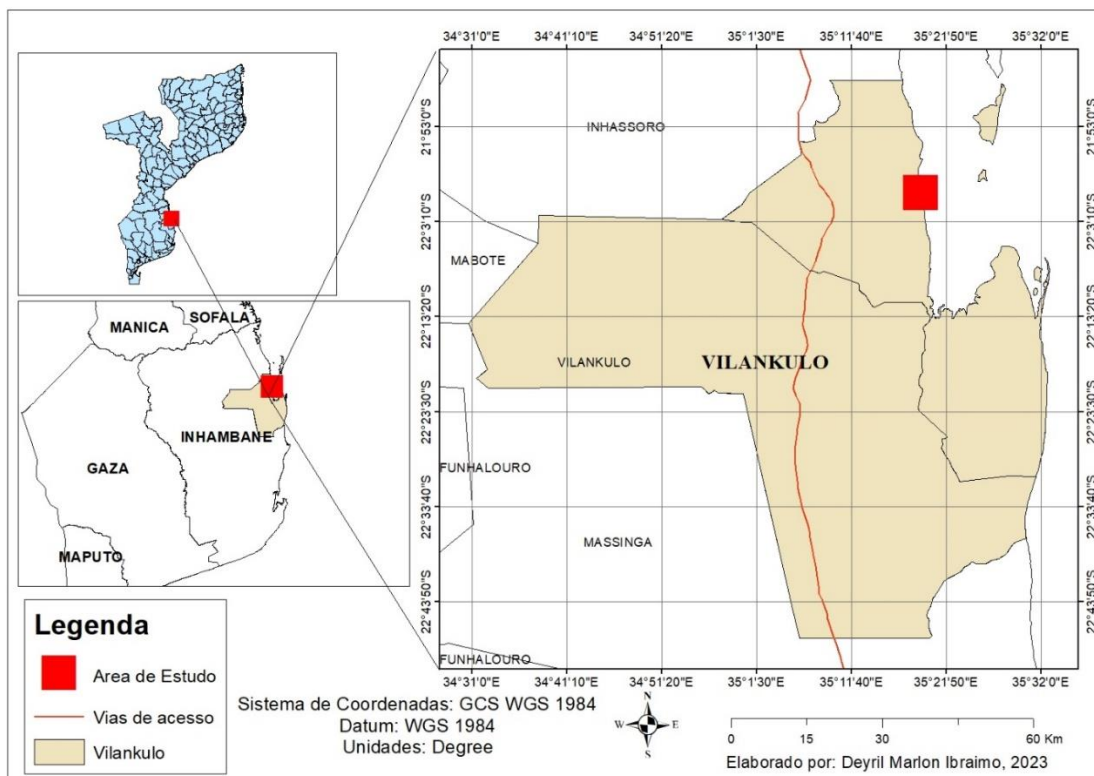


FIGURA 4: Mapa de Localização da área de estudo

3.2. Área experimental.

3.2.1. descrição de solos

Em conformidade com o predominante no distrito de Vilankulo, o solo do campus da ESUDER é caracterizado, de forma particular, por ser franco arenoso à arenoso nas profundidades de 0 a 6 m, possuem uma textura franca de estrutura grumosa da superfície até os os 6 m de profundidade e estrutura granular entre 0,30 m a 6 m de profundidade (Ngungulu *et al.*,2019).

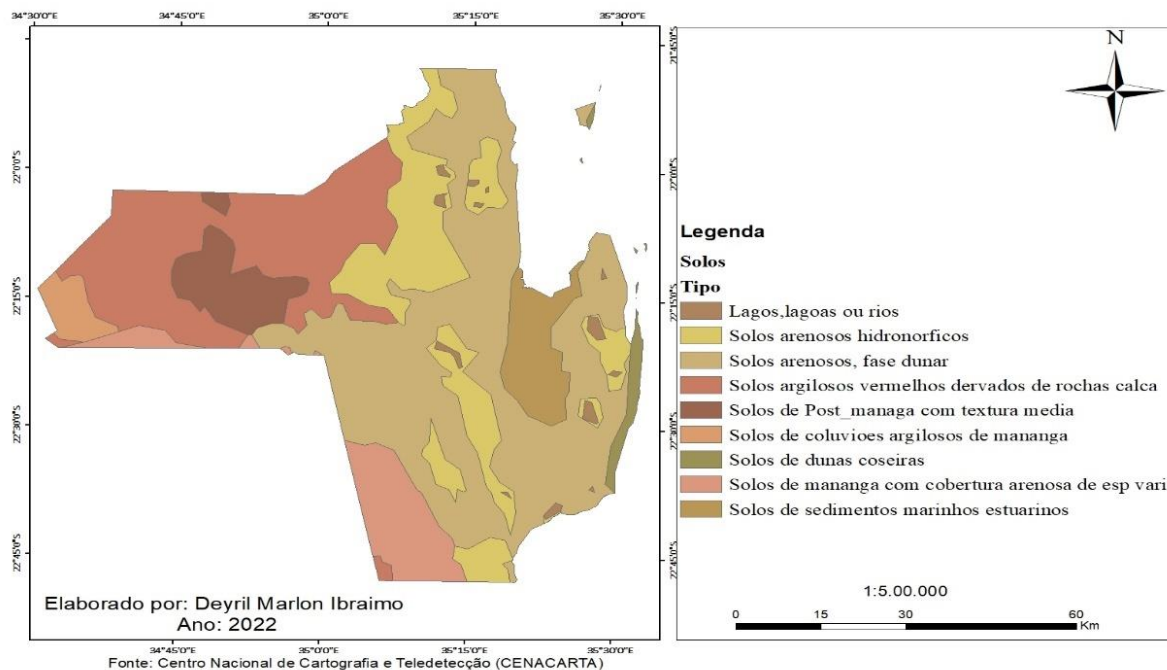


FIGURA 5: Mapa de solos de Vilankulo

Segundo (Ngungulu *et al.*,2019) a porosidade dos solos da ESUDER varia entre 49.2 a 39.4 % e são caracterizados pela velocidade de infiltração básica (VIB) de 1440 à 1556 mm.h⁻¹, Capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) de 5 g de água/ 100 g de solo e 0,8 g de água/ 100 g de solo respectivamente, o pH varia entre 5,4 a 6,1.

3.2.2. Instalação e tratos culturais

O ensaio foi conduzido em uma área homogénea de 0,41 ha com 139 m e 30 m de comprimento e largura respectivamente. O genótipo usado foi a variedade de milho *Topo* (KC9089) da empresa BAYER. A sementeira foi feita a 9 de julho de 2022 com um espaçamento de 30 cm entre plantas e 100 cm entre linhas, correspondendo a 100 plantas por linha, totalizando 13 900 plantas.

Foi adoptado o sistema de irrigação por gota-a-gota com gotejadores capacitados para a dotação de 2 l/hora, com quatro (4) fontes independentes entre os quatro (4) pontos de amostragem da área experimental. As linhas laterais com o espaçamento de 1 metro e os gotejadores com o espaçamento de 30 cm, em conformidade com o compasso da sementeira.

Para a fertilização do solo aplicou-se NPK 3:4:2 na fase vegetativa (duas semanas pós emergência), na mesma fase, aplicou-se esterco de bovino na proporção de 10 ton/ha e, 15 dias antes da fase reprodutiva aplicou-se Ureia.

Para o controlo de pragas foram usados os compostos Belt e Hitcel nas proporções de 16mL/16L de água e 12mL/16L de água respectivamente, com a frequência de 15 dias durante toda a fase vegetativa, tendo sido cessada antes da floração.

3.3. Colecta de dados

Para ambas variáveis de estudo foram empregados tanto métodos directos quanto indirectos. Foram seleccionadas quatro (4) parcelas de 20m x 20m cujas plantas serviram de população amostral, onde, com a frequência de 5 dias foi feita a colecta de dados das variáveis em estudo.

Tabela 3: Pontos de amostragem

Ponto	Latitude	Longitude
1	21° 59'25''S	35° 16' 11''E
2	21° 59'25''S	35° 16' 11''E
3	21° 59'25''S	35° 16' 11''E
4	21° 59'24''S	35° 16' 11''E

3.3.1. Índice de área foliar

3.3.1.1. Medição do IAF com base no equipamento LAI-2200C

O LAI-2200C é um equipamento desenvolvido pela empresa LI-COR que mede o IAF assim como outros atributos na copa das plantas, através de mensuração da luz que é captada pelo sensor óptico de que o equipamento dispõe, este que faz as leituras em cinco (5) ângulos zenitais.



FIGURA 6: LAI-2200C CANOPY ANALYZER

Com recurso ao equipamento LAI-2200C foi mensurado o IAF em cada uma das parcelas de 20m x 20m. O IAF da parcela correspondente a média de 24 leituras realizadas dentro da parcela, sendo 6 para cada uma das extremidades partindo do centro. O aparelho era colocado por de baixo da copa da planta junto ao colmo com o sensor voltado para a copa com cobertura ao ângulo de 90°. A colecta era realizada ao pôr do sol, quando a intensidade da radiação solar reduzisse, ou nas manhãs, até duas horas depois do nascer do sol. Com a frequência de 5 dias. Contudo, apenas os dados das datas patentes na tabela foram considerados.

3.3.1.2. Medição do IAF com base nos dados alométricos

Para a medição do IAF à nível do campo, foi igualmente empregado o método proposto por Montgomery (1911) para a medição da AF e assim calcular o IAF. Foram medidas as dimensões (comprimento e largura) da folha mais desenvolvida de cada uma das oito (8) plantas amostrais, assim como foi contabilizado o número total de folhas correspondentes. As equações 1 e 2 foram empregadas para os cálculos de AF e IAF respectivamente.

3.3.1.3. Estimativa do IAF com base em imagens Sentinel-2

A estimativa do IAF das parcelas amostrais a partir do processamento de imagens multiespectrais sentinel-2/MSI foi feita através do *software* SNAP (Plataforma de aplicação do Sentinel) e, compreendeu as seguintes etapas:

a) Aquisição de imagem

A aquisição das imagens satélite Sentinel-2 (A e B), com resolução temporal de 5 dias, disponibilizadas pela ESA por acesso gratuito, foi feita a partir da ligação (<http://scihub.copernicus.eu/>). Para evitar a interferência das nuvens, foram consideradas apenas imagens em que a área experimental era isenta da cobertura de nuvens. As imagens compreendiam as 13 bandas do Sentinel-2 com a correção atmosférica ao nível de pré-processamento L2A.

Tabela 4: Descrição das imagens

Data de sensoriamento	Fonte: Sentinel-2:	Cobertura de nuvens (%)	Estágio fenológico
18/Ago/2022	A	11.2	V10
02/Set/2022	B	69.2	V11
12/Set/2022	B	0.94	V12
17/Set/2022	A	12.7	R1
22/Set/2022	B	15.4	R2
02/Out/2022	B	9.5	R3
07/ Out/ 2022	A	8	R4
17/Out/2022	A	57.1	R5

b) Processamento de imagem

As imagens foram importadas ao SNAP, abertas em composição de cores naturais (RGB) vermelho, verde e azul, usando respectivamente as bandas 4, 3 e 2 para melhor visualização. Foram recortadas e reduzidas à dimensão do campo experimental e, posteriormente reamostradas para a resolução espacial das bandas para 10 m.

c) Estimativa da variável

Através dos processadores biofísicos da SNAP presentes na componente *Raster* (modelo matricial), foram gerados os mapas da variável IAF e, seguidamente, foram extraídas as

médias do IAF dos *pixels* da área amostral, Onde em cada *pixel* de 10 m foi extraído o valor do IAF.

Para a identificação dos *pixels* cujos valores correspondiam a área da população amostral, foram importados, em formato *shapefile* (criado a partir do *software* QGIS), os quatro pontos de amostragem, cujas coordenadas foram extraídas com recurso ao Sistema de Posicionamento Geográfica (GPS).

3.3.2. Teor de água na copa

3.3.2.1. Obtenção do TAC com base nos dados gravimétricos

Para a variável TAC foi usado um (1) método directo, neste caso, o método gravimétrico, que com o mesmo propósito foi usado por Boren & Boschetti (2020). O método consiste na obtenção da diferença entre o peso fresco e o peso seco das folhas.

Com a frequência de 5 dias, nas parcelas amostrais foram retiradas as folhas superiores de 8 plantas, empacotadas em envelopes, para evitar a desidratação antes da pesagem. Com recurso a um disco e uma canivete, as folhas foram cortadas em um formato circular com 3 cm de diâmetro, a área da folha recortada foi pesada em uma balança de precisão e colocada na estufa à uma temperatura de 65°C até o alcance do peso constante das folhas, neste caso, o peso seco.

O teor de água na folha foi obtido através da equação:

$$TAF = \frac{PF - PS}{AD} \quad (\text{Equação.4})$$

Onde:

TAF : Teor de água na copa (g/cm²)

PF : Peso fresco (g)

PS : Peso seco (g);

AD : Área do disco (cm²).

Em seguida, o produto entre o TAF e o IAF foi obtido, correspondendo ao TAC.

3.3.2.2. Estimativa do TAC com base em imagens Sentinel-2

Partindo da etapa a) do subcapítulo anterior, foi feito no SNAP o ajuste de bandas da imagem para a resolução de 20 m e, de igual forma ao IAF, foram gerados os mapas da variável e calculados os valores do TAC nos *pixels* correspondentes aos pontos de amostragem (importados ao SNAP em *Shapefile*)

3.4. Análise de dados

As médias dos valores obtidos por cada método na mensuração das variáveis de estudo em cada uma das parcelas foram inicialmente submetidos ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov a nível de significância de 5% no pacote estatístico IBM SPSS.

Seguidamente, para a validação, no mesmo pacote estatístico, foram executadas as correlações bivariadas dos dados (i. IAF mensurado por LAI2200C X IAF estimado por imagens Sentinel-2, ii. IAF mensurado por LAI2200C x IAF obtido por dados alométricos iii. IAF obtido por medicoes alometricas X IAF estimado por imagens Sentinel-2/MSI, TAC obtido por metodo gravimetrico X TAC estimado por imagens Sentinel-2/MSI) pelo coeficiente de correlação de Pearson (r) e coeficiente de correlação de Spearman (ρ) para os dados paramétricos e não paramétricos respectivamente, a nível de significancia de 5%.

a) Coeficiente de correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson (r), ou r de pearson mede a correlação linear entre duas variaveis quantitativas.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Onde:

r : Coeficiente de correlação de Pearson;

X_i : Valores da variável X em uma amostra;

\bar{X} : Média de valores de X;

Y_i : Valores da variável Y em uma amostra;

Y : Média dos valores da variável Y.

b) Coeficiente de correlação de Spearman

O coeficiente de Spearman, também denominado ρ de spearman é uma medida não paramétrica de correlação de postos (dependencia estatística entre duas variáveis).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

P: Coeficiente de correlação de Spearman;

d_i : Diferença entre dois pontos de cada observação;

n: Número de observações.

Por fim, no *software* estatístico IBM SPSS foram gerados os coeficientes de determinação (R^2) das correlações e foi extraído o indicador de erro: Raíz quadrada do erro médio (RMSE).

c) Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida de ajuste de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear simples ou múltipla, aos valores observados de uma variável aleatória.

$$R^2 = \frac{\sum(Y_i^n - \hat{Y}_i)^2}{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

R^2 : Coeficiente de determinação;

Y_i : Valor observado do Parâmetro biofísico;

\hat{Y}_i : Valor estimado do parâmetro biofísico.

d) Raiz quadrada do erro médio

Uma medida frequentemente utilizada para medir a diferença entre valores (valores de amostra ou população) previstos por um modelo ou um estimador e os valores observados. Este indicador quantifica a amplitude do erro entre as amostras. Em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é usado para testar as análises espaciais.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

N : Número de observações (amostras);

X_i : Valor observado da amostra;

\hat{Y}_i : Valor estimado da amostra.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estatística descritiva das variáveis

4.1.2. Índice de área foliar

Foi constatada uma diferença na escala dos valores de IAF obtido pelos três (3) métodos de medição desta variável. As estimativas do Sentinel 2 apresentaram valores de pequena escala, tendo sido subestimados, sobretudo quando comparados aos valores obtidos com base no LAI 2200C. (tabela 5).

Tabela 5: Estatística descritiva- índice de área foliar

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Variância
Sentinel-2 IAF (m ² /m ²)	32	0.357	1.24	0.648	0.192	0.037
Dados alométricos IAF (m ² /m ²)	32	0.407	3.732	1.848	0.909	0.827
LAI 2200C (m ² /m ²)	32	0.625	4.710	3.167	1.128	1.273
Válido N	32					

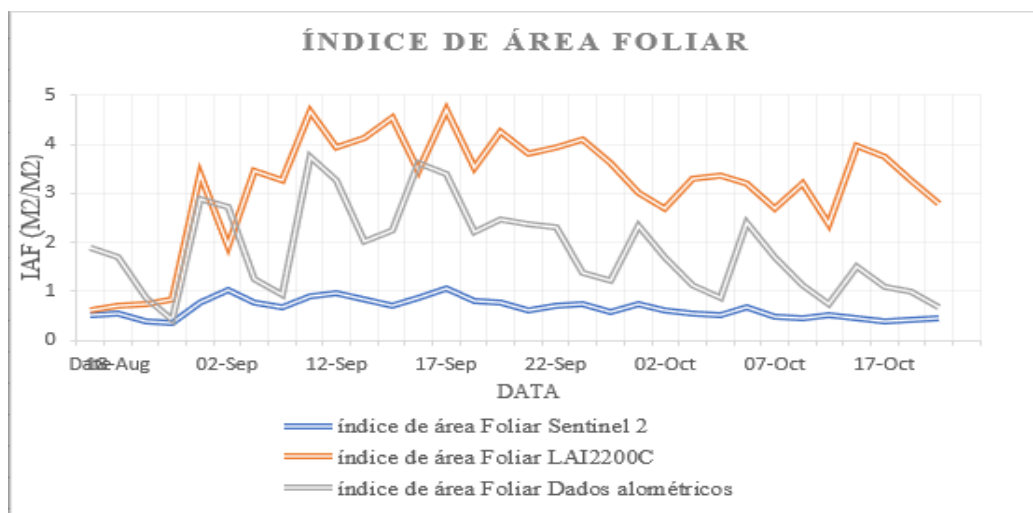


Figura 7: Grafico de comparação de variação temporal de IAF

4.1.3. Teor de água na copa

Foi constatado que os valores do TAC pelo Sentinel-2/MSI foram subestimados, tendo se observado estimativas muito inferiores em comparação com os valores obtidos no campo pelo método gravimétrico (tabela 7).

Tabela 6: Estatística descritiva- Teor de água na copa

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Variância
Sentinel-2 TAC (g/m ²)	32	0.0029	0.0183	0.0095	0,00402	0.000016
Dados gravimetricos TAC (g/m ²)	32	0.3431	9.6573	3.2663	2,420	5.860
Válido N	32					

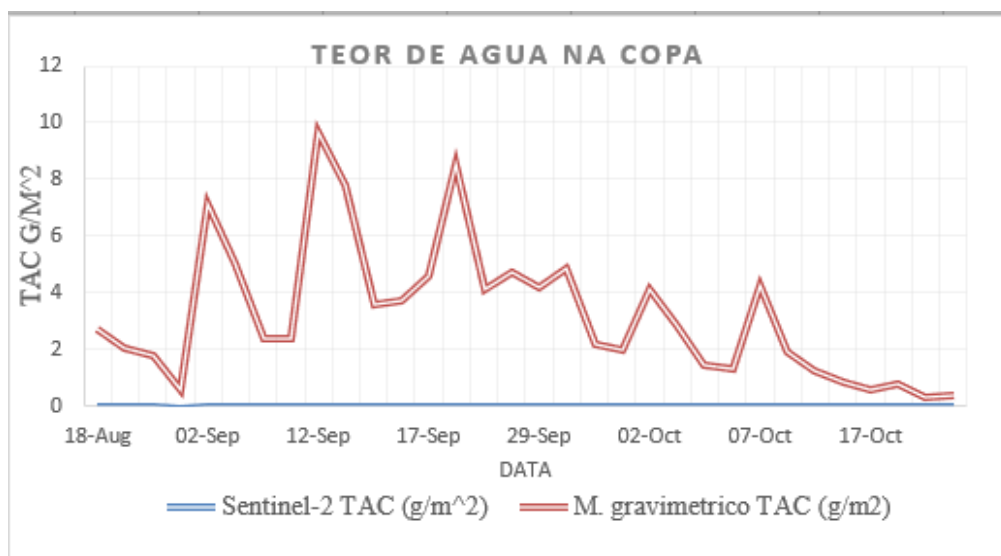
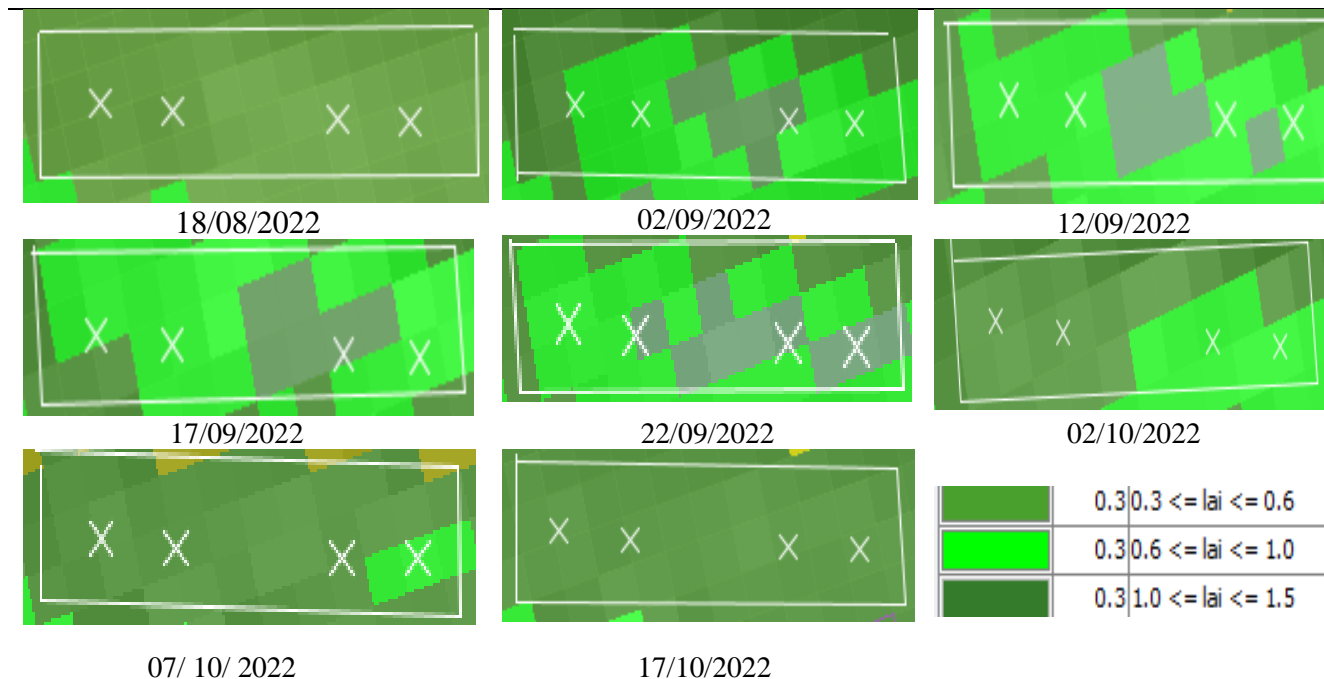


Figura 8: Gráfico de comparação de Variação temporal do TAC

4.2. Mapeamento da evolução temporal das variáveis

4.2.2. Índice de área foliar

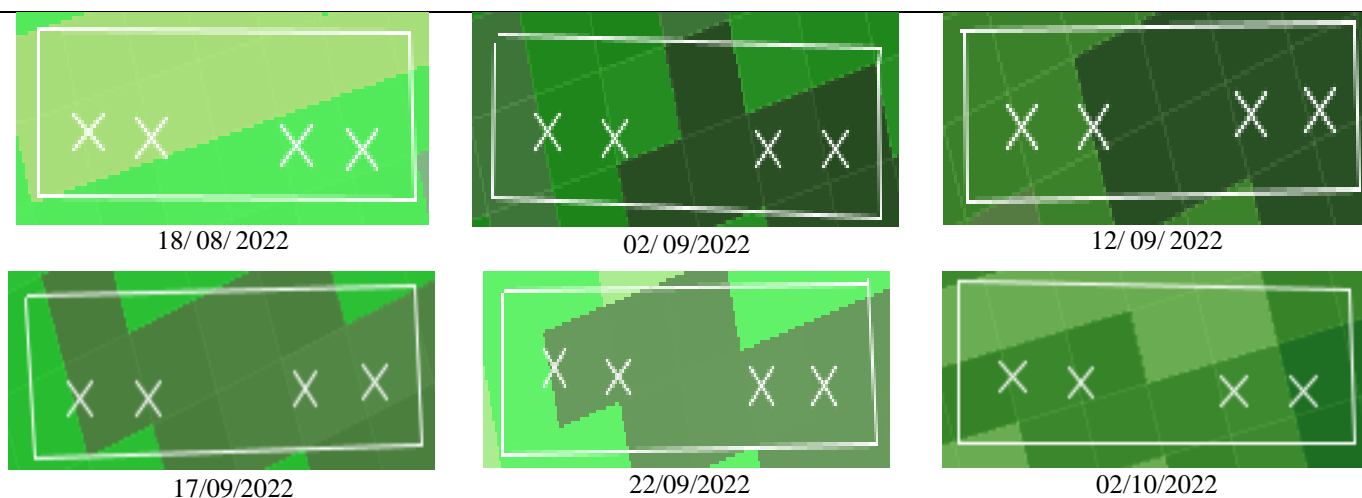
As imagens sentinel-2 permitiram mapear as alterações do IAF ao longo do ciclo da cultura do milho (*Zea mays* L.) no campo experimental, onde verificou-se o alcance do IAF máximo ao dia 12 de Setembro, coincidindo com o estágio V12 da cultura na classificação da tabela 1, a ultima fase do estágio de desenvolvimento.

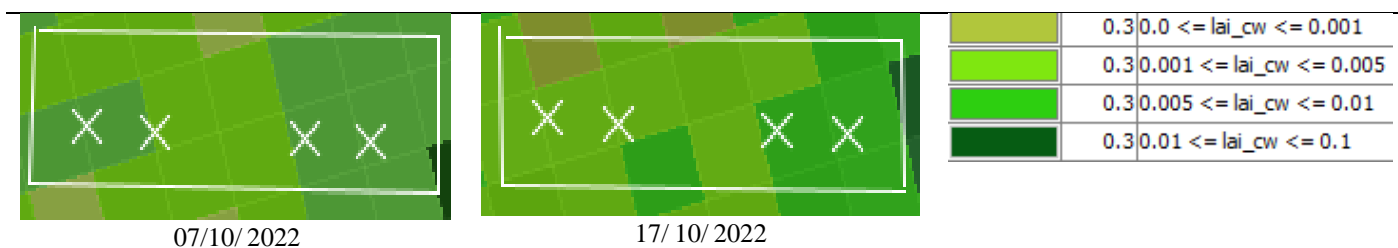


Figuras 9: Mapas de variação temporal de IAF

1.1.2. Teor de água na copa

As imagens Sentinel-2 possibilitaram o mapeamento do TAC e evidenciaram a variação da variável na cultura do milho, tendo-se constatado o alcance do TAC máximos entre os dias 12, 17 e 22 de Setembro, coincidindo com os estágios V12, R1 e R2 respectivamente, eventualmente resultante da rega intensiva durante os primeiros estágios da fase reprodutiva.





Figuras 10: Mapas de variação temporal de TAC

4.3. Eficiência do algoritmo SL2P

4.3.1. Índice de área foliar

Ao realizar o teste de correlação entre os dados oriundos dos três métodos usados para a obtenção do IAF na cultura do milho, de forma geral, o coeficiente de correlação mais alto foi observado na correlação entre o IAF estimado por imagens sentinel 2 e o IAF obtido por dados alométricos (Tabela 7). A correlação de Spearman revelou a ocorrência de uma correlação positiva moderada ($\rho = 0,519$; $p < 0,05$) entre o sentinel-2/MSI e o LAI 2200C, tendo sido notada uma subestimativa do IAF obtido por imagens Sentinel-2 (Tabela 7).

Correlação positiva e fraca ($\rho = 0,455$; $p < 0,05$) foi constatada entre o IAF de obtido por dados alométricos e o aparelho LAI 2200C *canopy analyzer*. Onde foi possível notar a subestimativa dos valores do IAF obtidos por sentinel-2/MSI (Tabela 7).

O coeficiente de correlação de Pearson mostrou haver correlação positiva, forte e significativa ($r = 0,823$; $p < 0,05$) entre o IAF estimado por Sentinel-2/MSI e o IAF obtido por dados alométricos. Este resultado mostra uma alta correspondência entre os estimadores biofísicos do Sentinel-2 e os dados obtidos no campo por medições alométricas. Contudo, uma subestimativa dos valores o IAF do Sentinel-2/MSI foi igualmente observada (Tabela 7).

Tabela 7: Correlações- índice de área foliar

	Sentinel-2/MSI IAF (m ² /m ²)	LAI 2200C IAF (m ² /m ²)	Dados alométricos IAF (m ² /m ²)
Sentinel-2/MSI IAF (m ² /m ²)	-	0,519*	0,823*
LAI 2200C IAF (m ² /m ²)	0,519*	-	0,455*
Dados alométricos IAF (m ² /m ²)	0,823*	0,455*	-

*Significativo a nível de 5%

A relação entre o IAF estimado por sentinel-2 e IAF obtido por LAI 2200C mostrou-se fraca, com o coeficiente de determinação baixo ($R^2 = 0,23$; RMSE = 1,41).

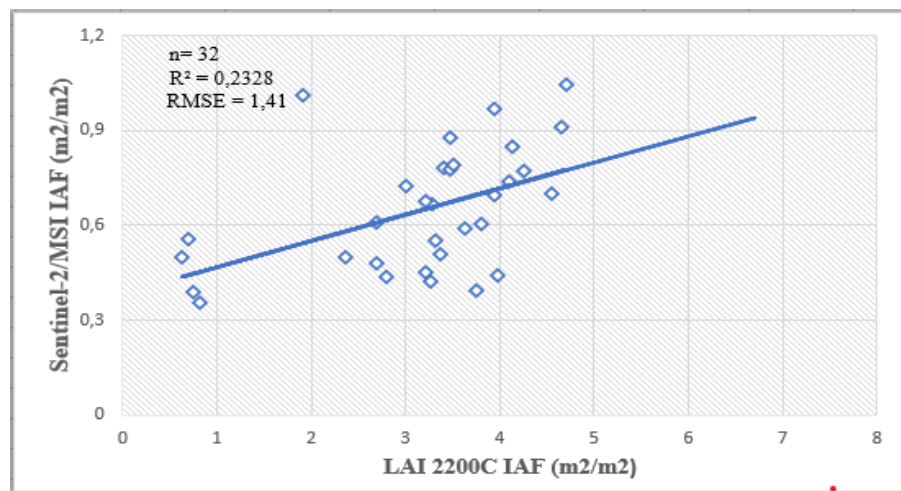


Figura 11: Gráfico de Correlação de IAF (LAI 2200C x Sentinel 2)

Resultados similares foram obtidos por Beeri *et al.*, (2020), uma correlação fraca ($R^2 = 0,296$). Em contrapartida correlação moderada foi constatada por Kang *et al.*, (2022) com $R^2 = 0,5$, Kganyago *et al.*, (2020) com $R^2 = 0,55$ e (Yu *et al.*, 2020) com $R^2 = 0,45$. Estes autores relatam inconsistência do LAI-2200C na validação do IAF estimado através de imagens Sentinel-2.

Os autores acima referenciados relacionam esses resultados ao nível de processamento da imagem, pois segundo os mesmos, a correção atmosférica das imagens para o nível L2A não baseia-se nas condições atmosféricas locais e que ao nível de pré-processamento L1C melhores resultados são encontrados.

Tendo sido o LAI 2200C submetido a uma correlação com os valores do IAF obtidos por dados alométricos, observou-se uma correlação fraca ($R^2 = 0,207$; RMSE = 1,43) o que mostra haver discrepância nos resultados do IAF entre estes dois métodos de medição da variável.

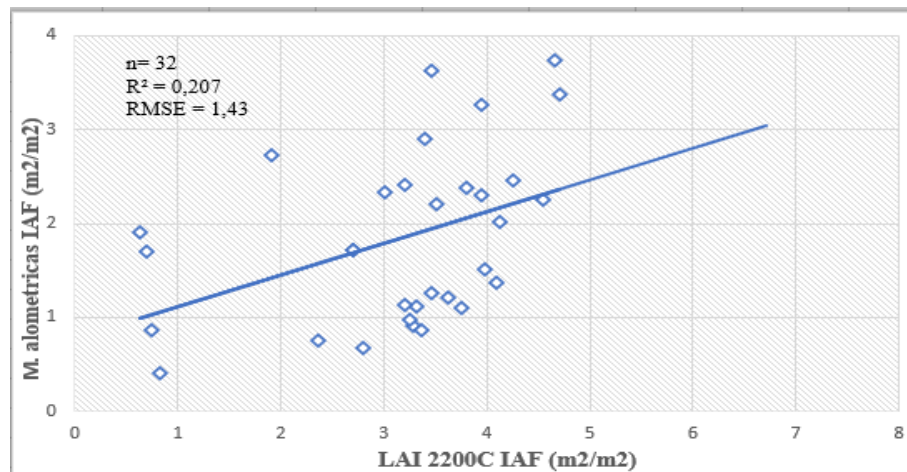


Figura 12: Gráfico de Correlação de IAF (LAI 2200C x M. alométricas)

Ao correlacionar o IAF obtido por dados alométricos e o IAF estimado por imagens Sentinel 2 foi obtida uma correlação forte ($R^2 = 0,67$), pese embora com o RMSE = 1,4. Este resultado evidenciou a precisão das imagens Sentinel 2 na estimativa do IAF, contudo, foi verificado que o sentinel-2 subestima, em ligeira escala, os valores do IAF em relação aos dados alométricos.

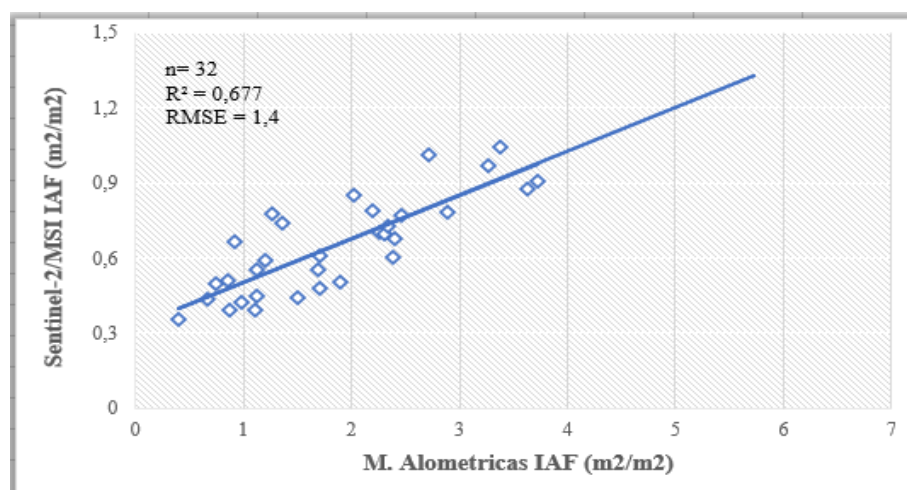


Figura 13: Gráfico de Correlação de IAF (M. alométricas x Sentinel 2)

Resultados similares ($R^2 = 0,65$ e RMSE = 1,37) foram obtidos por Furlanetto *et al.*, (2023) e por Xie *et al.*, (2019) com $R^2 = 0,62$ e RMSE = 1,53.

Correlação forte ($R^2 = 0,77$) foi igualmente obtida por Djamai *et al.*, (2018) embora com erros mais reduzidos (RMSE = 0,7). Facto que foi igualmente constatado por Brown e companheiros (2021) com $R^2 = 0,78$ e RMSE = 0,32.

Yu *et al.*, (2020) apontam os estágios fenológicos como um factor com o qual a precisão das estimativas dos PBFs através das imagens sentinel-2 tenha relação. Pois em seu estudo, após limitar-se apenas na fase vegetativa, desconsiderando a fase reprodutiva, foi por eles constatado que o R^2 era elevado de 0,45 para 0,68 (similar ao resultado constatado na presente pesquisa) e o RMSE reduzia de 0,65 a 0,64, o que mostra haver limitações na estimativa do IAF por sensores aéreos durante fase reprodutiva, facto que é igualmente sustentado por Raj *et al.*, (2020).

Na fase reprodutiva da cultura do milho, tende a observar-se a senescência das folhas, este fenómeno ocorre a partir das primeiras folhas da parte inferior da copa e vai se estendendo até as folhas superiores (Valentinuz *et al.*, 2004). Entretanto, Raj *et al.*, (2021) explicam que este fenómeno não é imediatamente detectável em uma vista aérea ou do topo da copa. A este facto associa-se o declínio da precisão das imagens Sentinel-2 na estimativa do IAF.

Em conformidade, Brown *et al.*, (2021) verificaram o decréscimo do R^2 com a expansão do IAF, tendo visto a correlação decrescendo com o alcance de valores altos do IAF, que coincidem com a fase reprodutiva. Isto deve-se ao facto do sensor (MSI) acoplado ao satélite (Sentinel-2) captar as imagens por via aérea, o que ocasionalmente permite que a leitura das plantas seja feita partindo das folhas superiores e, por essa razão, as alterações nas folhas da base não são imediatamente distinguíveis.

Brown *et al.*, (2021) evidenciam a variação da precisão das imagens Sentinel 2 em função do desenvolvimento das plantas, mostrando um declínio da precisão em função do aumento do IAF. Onde chegou a atingir um $R^2 = 0,06$ quando o IAF atingiu a escala de 5-6 m^2/m^2 . Foi igualmente constatado pelos mesmos autores que a estação anual exerce uma influência na precisão das estimativas de IAF por imagens Sentinel-2, tendo sido por eles alcançada melhor precisão no verão em relação ao inverno.

Hu *et al.*, (2020) ao correlacionar o IAF obtido através de medições em campo e o IAF estimado por imagens Sentinel-2 na cultura do milho obtiveram resultados diferentes, com uma precisão mais baixa ($R^2 = 0,32$; RMSE= 1,24), os mesmos constataram que o IAF

estimado por imagens Sentinel-2 era subestimado, porém, em uma magnitude mais inferior ao constatado no presente estudo.

Os autores supracitados apontam o erro na correção atmosférica como potencial limitação e das mais prováveis causas da fraca correlação entre os dois métodos de medição da variável, aliando-se, desta forma, a constatação de Kganyago *et al.*, (2020) sobre o efeito da correção atmosférica das imagens multiespectrais do Sentinel-2 na estimativa do IAF.

Por sua vez, Tsele *et al.*, (2022) em contraste ao presente trabalho, constataram uma relação muito fraca ($R^2 < 0,05$) e $RMSE > 0,5$ apontando igualmente os erros na correção atmosférica como um dos factores por de trás dos erros na estimativa dos Parâmetros biofísicos de áreas vegetadas através do algoritmo SL2P do SNAP.

4.3.2. Teor de água na copa

Pelo teste de correlação de Spearman (ρ) foi constatada uma correlação positiva e forte ($\rho = 0,85$; $p < 0,05$), contudo, foi verificada uma alta subestimativa do TAC obtido por imagens Sentinel-2/MSI ($RMSE = 4,3 \text{ g/m}^2$) em comparação com o TAC obtido por dados gravimétricos.

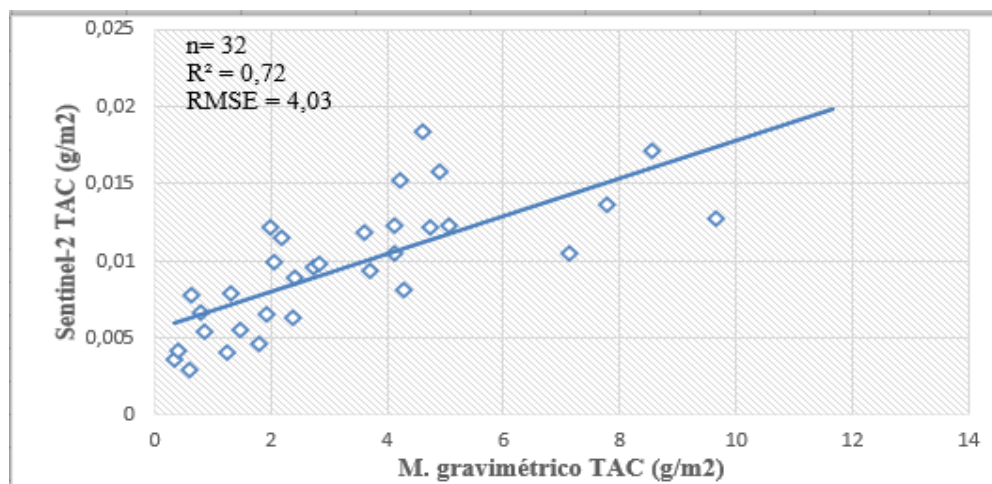


Figura 14: Gráfico de Correlação de TAC (M. gravimétrico x Sentinel 2)

O coeficiente de determinação revelou haver correlação forte entre os dados obtidos pelos dois métodos de medição da variável ($R^2 = 0,72$), porém erros bastante elevados foram verificados ($RMSE = 4,3 \text{ g/m}^2$), o que revela haver uma diferença de magnitude ampla entre os valores obtidos por estes dois métodos na determinação do TAC.

Djamai *et al.*, (2018) ao validar, pelo método gravimétrico, o teor de água na copa estimado através de imagens Sentinel-2 obtiveram resultados diferentes ($R^2= 0,49$; RMSE = $0,42 \text{ kg/m}^2$).

Na mesma perspectiva, resultados com erro bastante reduzido (RMSE= $0,32 \text{ Kg/m}^2$) foram constatados por Djamai *et al.*, (2019), onde os valores do TAC obtidos por imagens Sentinel-2 eram subestimados em magnitude inferior em comparação com o obtido no presente trabalho e o constatado por Djamai *et al.*, (2018).

Weiss & Baret (2016) apontam a confusão com a humidade do solo como o principal factor por de trás da incerteza do algoritmo S2LP na estimativa do TAC.

V. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusão

Os mapas das variáveis biofísicas fornecem grande cobertura e permitem a ilustração da distribuição e variação dos Parâmetros biofísicos na vegetação.

O algoritmo SL2P do SNAP mostra ser eficiente para estimativa do índice de área foliar, correlacionando-se fortemente com as medidas de campo pelo método alométrico, com erros reduzidos, diferentemente para a estimativa do teor de água na copa, onde mostra proporcionar erros elevados.

5.2. Recomendações

Recomenda-se a adoção de técnicas de detecção remota com recurso a imagens Sentinel-2 para a monitorização do desenvolvimento de culturas do milho em campo, sobretudo para o índice área foliar, reduzindo a necessidade de remoção das folhas pelo uso de métodos destrutivos, contudo, não descartando a necessidade de acompanhamento em campo.

Recomenda-se o desenvolvimento da mesma pesquisa em outras áreas do distrito de Vilankulo, assim como em outras estações anuais, com melhores condições atmosféricas, pelo que ocasione a redução na limitação de obtenção de dados espaciais. Assim como Recomenda-se o desenvolvimento de modelos baseados nas condições locais para o alcance de maior precisão nas estimativas dos Parâmetros biofísicos. Recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas envolvendo a avaliação de algoritmos e métodos de correção atmosférica das imagens do Sentinel-2 para minimizar os erros nas estimativas dos Parâmetros biofísicos através das mesmas.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Acharya, S. M., Pawar, S. S., & Wable, N. B. (2018). *Application of Remote Sensing & GIS in Agriculture*. 6495(4), 63–65.
2. Addabbo, P., Focareta, M., Marcuccio, S., Votto, C., & Ullo, S. L. (2016). *Contribution of Sentinel-2 data for applications in vegetation monitoring*. *Acta IMEKO*, 5(2), 44–54. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v5i2.352.
3. Almeida, I., Machado, A., Godoy, M., Rios, A., & Buso, W. (2016). *Gérmen integral de milho na alimentação de vacas leiteiras* 4677–4690. <https://www.nutritime.com.br/site/wp-content/uploads/2020/02/Artigo-377.pdf>
4. Aschonitis, V. G., Papamichail, D. M., Lithourgidis, A., & Fano, E. A. (2014). Estimation of Leaf Area Index and Foliage Area Index of Rice using an Indirect Gravimetric Method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(13), 1726–1740. <https://doi.org/10.1080/00103624.2014.907917>
5. Barros, J.F.C & Cadalo, J.G (2014) *a cultura do milho*, Évora.
6. Bochenek, Z., Dąbrowska-Zielińska, K., Gurdak, R., Niro, F., Bartold, M., & Grzybowski, P. (2017). Validation of the LAI biophysical product derived from Sentinel-2 and Proba-V images for winter wheat in western Poland. *Geoinformation Issues*, 9(1(9)), 15–26. <http://www.igik.edu.pl/upload/File/wydawnictwa/GI9BochenekZ.pdf>
7. Beeri, O., Netzer, Y., Munitz, S., Mintz, D. F., Pelta, R., Shilo, T., Horesh, A., & Mey-tal, S. (2020). *Kc and lai estimations using optical and sar remote sensing imagery for vineyards plots*. *Remote Sensing*, 12(21), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs12213478>
8. Berdjour, A., Dugje, I. Y., Rahman, N. A., & Odoom, D. A. (2020). *Direct Estimation of Maize Leaf Area Index as Influenced by Organic and Direct Estimation of Maize Leaf Area Index as Influenced by Organic and Inorganic Fertilizer Rates in Guinea Savanna*. May. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n6p66>
9. Boren, E. J., & Boschetti, L. (2020). *Landsat-8 and Sentinel-2 Canopy Water Content Estimation in Croplands through Radiative Transfer Model Inversion*. <https://doi.org/10.3390/rs12172803>
10. Brown, L. A., Fernandes, R., Djamai, N., Meier, C., Gobron, N., Morris, H., Canisius, F., Bai, G., Lerebourg, C., Lanconelli, C., Clerici, M., & Dash, J. (2021). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Validation of baseline and modified Sentinel-2 Level 2 Prototype Processor leaf area index retrievals over the United States*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 175(February), 71–87. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.02.020>

11. Campbell,G,S. & Norman,JM. (1998). *Introduction to environmental biophysics*. 2^a ed, New York.
12. Carrilho, J. Z., Ferreira, I. A., & Ribeiro, R. N. (2021). *WIDER Working Paper 2021 / 135 The relative neglect of agriculture in Mozambique* (Issue August). in Mozambique using water stress model of FAO. Maputo, IIAM.15p..
13. Carvalho SJP, Christoffoleti PJ (2007) *Estimativa da a´rea foliar de cinco especies do género Amaranthus usando dimensoes lineares do limbo foliar*. *Planta Dan* 25:317–324
14. Clay,J. (2003). *world agriculture aand the environment: a commodity-by-commonity guide to ipacts and practices*. Island press. Washington DC.
15. Cohrs, C. W., Cook, R. L., Gray, J. M., & Albaugh, T. J. (2020). *Sentinel-2 Leaf Área Index Estimation for Pine Plantations in the Southeastern United States*. 1–16.
16. Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Brauer, D. K., Howell, T. A., Tolk, J. A., & Copeland, K. S. (2017). Allometric method to estimate leaf área index for row crops. *Agronomy Journal*, 109(3), 883–894. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.11.0665>
17. Croci, M., Impollonia, G., Marcone, A., Antonucci, G., Letterio, T., Colauzzi, M., Vignudelli, M., Ventura, F., Anconelli, S., & Amaducci, S. (2022). *RTM Inversion through Predictive Equations for Multi-Crop LAI Retrieval Using Sentinel-2 Images*.
18. Danelichen,V.,Biudes,M.,Machado,N.,Velasque,C.,Silva,B. & Geira,J. (2016). *Uso do sensoriamento remoto na estimativa de índice de área foliar em floresta tropical*. *Ciência e natura* V.38 P.1352-1360 DOI:10.5902/2179460X19917.
19. Daniel, P., & Lagoas, S. (2002). *Estimativa da Área Foliar de Cultivares de Milho*.
20. DA Silva, J, M & De Sousa, A, M, O. (2021). *Fundamentos Teóricos de Detecção Remota Departamento de Engenharia Rural Universidade de Évora Fundamentos Teóricos de Detecção Remota Março*.
21. Daughtry, C. S. T., Walthall, C. L., Kim, M. S., De Colstoun, E. B., & McMurtrey, J. E. (2000). *Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance*. *Remote Sensing of Environment*, 74(2), 229–239. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9).
22. Djamai, N., Fernandes, R., McNair, H & Goita, K. (2018). *Validation of biophysical parameters derived from Sentinel-2A over an agricultural study side located in Canada (Conferenve presentation)*, proc. SPIE 10783, Remote sensing for Agriculture, Ecosystems, and hydrology XX, 1078302; <https://doi.org/10.1117/12.2326885>.
23. Djamai, N., Zhong, D., Fernandes, R., & Zhou, F. (2019). *Evaluation of vegetation biophysical variables time series derived from synthetic Sentinel-2 images*. *Remote Sensing*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/rs1113154>

24. Dugje, I. Y. (1992). *Effects of row spacing on growth, development and yield of Masakwa Sorghum (Sorghum bicolor (L.) Monech) on a semi-arid vertisols*. University of Maiduguri, Nigeria
25. Fancelli, A.L.; D. Dourado-Neto. (2004). *Produção de Milho*. Guaíba: 2º Ed. Agropecuária. 360p
26. FAO. (2021). *World food and agriculture-statistical yearbook 2021*, Roma.
27. Formagio, A, R. & Sanches,L. (2017). *Sensoriamento remoto na agricultura*. São Paulo
28. Favarin,J.,Neto,D., Garcia,A., Nova,N.,Favarin,M. (2002) *equações para estimativa do índice de área foliar do cafeeiro*.pesq.agropec.brasileira, v.37,n.6 p.769-733.
29. Fernandes, M. S. (2007). *Efeito da temperatura de extrusão na absorção de água, solubilidade e dispensabilidade da farinha pré-cozida de milho-soja*. Ciência tecnologia alimentos, Campinas, v. 23, n. 2, p. 211
30. Furlanetto, J., Dal, N., Matteo, F., Luigi, L., Polese, R., Caceffo, D., Nicoli, L., & Morari, F. (2023). LAI estimation through remotely sensed NDVI following hail defoliation in maize (*Zea mays* L .) using Sentinel - 2 and UAV imagery. *Precision Agriculture*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-09993-9>.
31. Galon, L., Tironi, S. P., Andréia, A., & Rodrigues, E. (2010). *Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho Influence of abiotic factors on corn yield*. 18–38.
32. Gómez-dans, J. L., Lewis, P., Yin, F., Asare, K., Lamptey, P., Kobina, K., Aidoo, Y., Maccarthy, D., Ma, H., Wu, Q., Addi, M., Aboagye-ntow, S., Doe, C. E., Alhassan, R., Kankam-boadu, I., Huang, J., & Li, X. (2022). *Location , biophysical and agronomic parameters for croplands in Northern Ghana*. 2021(August), 1–34.
33. Hossain, F., Muthusamy, V., Bhat, J., & Jha, S. (2016). 38,872. *September*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-3613-9>
34. Hu, Q., Yang, J., Xu, B., & Huang, J. (2020). *Evaluation of Global Decametric-Resolution LAI , FAPAR and FVC Estimates Derived from sentinel-2 imagery* Remote Sens.,12, 912; doi:10.3390/rs12060912
- 35.Irmak, S., Haman, D. Z., & Bastug, R. (2000). *Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn*. *Agronomy Journal*, 92(6), 1221–1227.
36. July, R., & Bell, J. (2017). *Corn growth stages and development*.
37. Junior,A,L.,Rodrigues,G,C.,Neto,J,C.,Silva,F,C.,Andre,L,.,Jorge,C. (2015). *Estimativa da fração coberta do solo usando imagens aéreas obtidas por Vants*

38. Kang, Y., Gao, F., Anderson, M., Kustas, W., Nieto, H., Knipper, K., Yang, Y., White, W., Alfieri, J., Torres, A., Maria, R., Alsina, M., & Karnieli, A. (2022). *Evaluation of satellite Leaf Area Index in California vineyards for improving water use estimation*. *Irrigation Science*, 40(4), 531–551. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00798-8>
39. Kganyago, M., Mhangara, P., Alexandridis, T., Laneve, G., Ovakoglou, G., & Mashiyi, N. (2020). *Validation of sentinel-2 leaf area index (LAI) product derived from SNAP toolbox and its comparison with global LAI products in an African semi-arid agricultural landscape*. *Remote Sensing Letters*, 11(10), 883–892. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2020.1767823>.
40. Kganyago, M., Adjorlolo, C., & Mhangara, P. (2022). *Exploring Transferable Techniques to Retrieve Crop Biophysical and Biochemical Variables Using Sentinel-2 Data*. *Remote Sens*. 2022, 14, 3968. <https://doi.org/10.3390/rs14163968>.
41. Kling JG & Edmeades G. 1997. *Morphology and growth of maize*. 2 ed. IITNCIMMYT Research Guide 9. Training Program, International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria. 36 p.
42. Kumar, B., Karjagi, C., Jat, S. L., Parihar, C.M., Yathish K.R., Singh, V., Hooda, K. S., Dass, A., Mukri, G., Sekhar, J.C (2012) *Maize biology: An Introduction*, Directorate of Maize Research, Indian Council of Agricultural Research (ICAR), Technical Bulletin, 2012/2, pp. 32.
43. Mabilana, H, A., Fontana, D, C & Fonseca. E, L. (2012) *Desenvolvimento de modelo agrometeorológico espectral para estimativa de rendimento do milho na província de Manica-Moçambique*. *Rev.Ceres, Viçosa* v.59n.3, p.337-349.
44. Madonsela, S., Cho, M. A., Naidoo, L., Main, R., & Majazi, N. (2021). Exploring the utility of Sentinel-2 for estimating maize chlorophyll content and leaf area index across different growth stages. *Journal of Spatial Science*, 00(00), 1–13. <https://doi.org/10.1080/14498596.2021.2000898>
45. Magalhães, P.C. e Durães, F.O.M. (2006) *Fisiologia da produção de milho. Embrapa Milho e Sorgo, Embrapa Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, Circular Técnica, 76.
46. Mananze, S. E., Pôças, I., & Cunha, M. (2018). *Maize leaf area estimation in different growth stages based on allometric descriptors*. 13(4), 202–209. <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12916>
47. Mananze, S., Pôças, I., & Cunha, M. (2018). Retrieval of maize leaf area index using hyperspectral and multispectral data. *Remote Sensing*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/rs10121942>.
48. Marengo, R.A.; Lopes, N.F. (2015). *Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral*. Viçosa: UFV, 451 p.

49. Mokhtarpour, H., Teh, C. B. S., Saleh, G., Asadi, M. E., & Consultant, I. (2010). *Non-destructive estimation of maize leaf area , fresh weight , and dry weight using leaf length and leaf width.*
50. Mondo,V., Carvalho,S., Labonia,V., Neto,D., Cicero,S. (2009). *Comparação de métodos para estimativa de área foliar em plantas de milho.* Revista brasileira de milho e sorgo.v.8,n-3.p.233-246.
51. Mudema, A. J., Sitole, R. F. & Mlay G (2012). *Direcção de Formação , Documentação e Transferência de Tecnologias Relatórios Preliminares de Pesquisa Rentabilidade da cultura do milho na zona sul de. 3.*
52. Mullo, F., & Prudnikova, E. (2020). *Possibilities of using sentinel-2 satellite data to estimate crop cover and LAI of winter wheat at different stages of development. 02005, 0–4.*
53. Myneni, R. 2012. “MODIS LAI/FPAR Product User’s Guide [Online].” lpdaac.usgs.gov: USGS LP DAAC. <https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/modis/docs/MODIS-LAI-FPAR-User-Guide.pdf>
54. Nakar, D. (2019). *Sentinel-2: Multispectral Instrument (MSI) design and system performance This work is the final assignment of the course : Satellite imaging and. July.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27242.67529>
55. Ngungulu, I, D., Vine, P, N., Chutumia, C, B., Maite, C, J., Manjate, F, A & Remane,F, E, O. (2019). *Características dos solos nos campos experimentais da uem-esuder, vilankulo, moçambique*
56. Pasqualotto, N.; Delegido, J.; Van Wittenberghe, S.; Rinaldi, M.; Moreno, J. (2019). *Multi-Crop Green LAI Estimation with a New Simple Sentinel-2 LAI Index (SeLI).* Sensors, 19, 904.
57. Patanè, C.(2011). *Leaf area index, leaf transpiration and stomatal conductance as affected by soil water deficit and VPD in processing tomato in semi arid Mediterranean climate.* J. Agron. Crop Sci. 197 (3), 165–176
58. Paes, V.M (2012). *Análise da variabilidade espaço-temporal da produtividade de milho numa parcela na região da Golegã.* Dissertação de mestrado, ISA/UTL.
59. Pimentel, C.; Rossiello, R.O.P. (1995) *Entendimento sobrerelações hídricas. In: simpósio internacional sobre estresse ambiental: o milho emperspectiva, 1995, Belo Horizonte, MG. Anais...EMBRAPA/CNPMS, 1995. v.1. 449p. p.131-146.*
60. Pinter, P. J., Hatfield, J. L., & Barnes, E. M. (2003). *DigitalCommons @ University of Nebraska - Lincoln Remote Sensing for Crop Management.*
61. Piekarczyk, J., Wójtowicz, A & Wójtowicz M. (2016). *Application of remote sensing methods in agriculture. January.*

62. Pradawet, C., Khongdee, N., Pansak, W., Spreer, W., Hilger, T., & Cadisch, G. (2023). *Thermal imaging for assessment of maize water stress and yield prediction under drought conditions*.56–70. <https://doi.org/10.1111/jac.12582>.
63. Raj, R., Kar, S., Nandan, R., Jagarlapudi, A., (2020). *Precision agriculture and unmanned aerial vehicles (UAVs)*. In: Unmanned Aerial Vehicle: Applications in Agriculture and Environment. Springer, Cham, pp. 7–23.
64. Ranum, P., & Pe, J. P. (2014). *Global maize production , utilization , and consumption*. 1312, 105–112. <https://doi.org/10.1111/nyas.12396>
65. Raven, P, H.; Eichhorn, S, E.; Evert, R, F. *Biologia vegetal*. 8ª edição. Guanabara koogan, 867p, 2014
66. Ritchie, S. W.; Hanway, J. J.; Benson, G. O. (1993) *How a corn plant develops*. **Special Bulletin**, Iowa, n. 48. Disponível em: <<http://www.biologie.uni-hamburg.de/bonline/library/maize/www.ag.iastate.edu/departments/agronomy/cornngross.html>>.
67. Sah, R. P., Chakraborty, M., Prasad, K., Pandit, M., Tudu, V. K., Chakravarty, M. K., Narayan, S. C., Rana, M., & Moharana, D. (2020). Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. *Scientific Reports*, 10(1), 1– 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7>
68. Sangoi, L; Almeida, M. L; Lech, V. A; Gracietti, L. C; Rampazzo, C. (2001) *Desempenho de híbridos de milho com ciclos contrastantes em função da desfolha e da população de plantas*. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 271-276.
69. Sangoi, L; Lech, V. A; Rampazzo, C; Gracietti, L. C. (2002) *Acúmulo de matéria seca em híbridos de milho sob diferentes relações entre fonte e dreno*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, n. 3 p. 259-267.
70. Santos, R.F & Carlesso, R. (1998). *Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294.
71. Singh, P., Kumar, S., Srivastava, S., Garg, S., Singh, V. P., Bhatnagar, S. K., & Singh, R. K. (2008). *GIS and remote sensing in agriculture*. *Vegetos*, 21(1), 11–27.
72. Souza, M. C., do Amaral, C. L., Habermann, G., da Costa Aguiar Alves, P. L., & da Costa, F. B. (2015). *Non-destructive model to estimate the leaf área of multiple Vochysiaceae species*. *Revista Brasileira de Botanica*, 38(4), 903–909. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0176-4>
73. Taiz,L & Zeiger E. (2009). *Fisiologia vegetal*,4ed. Porto alegre:Artmed
74. Tanko, U. M., & Hassan, U. T. (2016). *Leaf área determination for maize (Zea mays L.), Okra (Abelmoschus esculentus L.) and Cowpea (Vigna unguiculata L.) Crops using Linear Measurements*. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 6(4), 103-111

75. Tsele, P., Ramoelo, A., Qabaqaba, M., Mafanya, M., & Chirima, G. (2022). *level 2 prototype processor over a heterogeneous savanna and grassland environment in South Africa Validation of LAI , chlorophyll and FVC biophysical estimates from sentinel-2 level 2 prototype processor over a heterogeneous savanna and grassland environ.* Geocarto International, 0(0), 1–24. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2087756>
76. Ustin, S. L. (2016). *Remote Sensing of Leaf , Canopy , and Vegetation Water Contents for Satellite Chapter 20 Remote Sensing of Leaf , Canopy , and Vegetation Water Contents for Satellite Environmental Data Records.* May. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5872-8>.
77. Valentinuz, O.R., Tollenaar, M., (2004). *Vertical profile of leaf senescence during the grain-filling period in older and newer maize hybrids.* Crop Sci. 44 (3), 827–834
78. Vieira, E, L., Souza, G, S., Santos, A, R & Santos Silva, J (2010). *Manual de fisiologia vegetal.* São Luis:ADUFMA.230P.
79. Vinué, D., Camacho, F., & Fuster, B. (2017). *Validation of sentinel-2 lai and fapar products derived from snap toolbox over the barrax cropland site (spain).*
80. Watson, DJ. (1952) *The physiological basis of variation in yield.* *Advances in Agronomy*, 4:101-145.
81. Weiss, M., Baret, F., 2016. *S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER, 1.1. ed.* Institut National de la Recherche Agronomique, Avignon, France. https://step.esa.int/docs/extra/ATBD_S2ToolBox_L2B_V1.1.pdf
82. Xie, Q., Dash, J., Huang, W., Peng, D., Qin, Q., Mortimer, H., . . . & Ye, H. (2018). *Vegetation indices combining the red and red-edge spectral information for leaf area index retrieval.* *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(5), 1482–1493
83. Xie, Q., Dash, J., Huete, A., Jiang, A., Yin, G., Ding, Y., Peng, D., Hall, C. C., Brown, L., Shi, Y., Ye, H., Dong, Y., & Huang, W. (2019). Retrieval of crop biophysical parameters from Sentinel-2 remote sensing imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.019>
84. Xing, N., Huang, W., Ye, H., Dong, Y., & Kong, W. (2021). *Remote sensing retrieval of winter wheat leaf area index and canopy chlorophyll density at different growth stages.* *Big Earth Data*, 00(00), 1–23. <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1918909>
85. Yu, L., Shang, J., Cheng, Z., Gao, Z., Wang, Z., Tian, L., Wang, D., Che, T., Jin, R., Liu, J., Dong, T., & Qu, Y. (2020). *Assessment of cornfield LAI retrieved from multi-source satellite data using continuous field LAI measurements based on a wireless sensor network.* *Remote Sensing*, 12(20), 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs12203304>

86. Zhao, J., Ren, B., Zhao, B., & Liu, P. (2022). *Yield of summer maize hybrids with different growth duration determined by light and temperature resource use efficiency from silking to physiological maturity stage. September, 1–14.*
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.992311>

APÉNDICES

Apendice I : Teste de normalidade da variável índice de área foliar

	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Statistic	df	Sig.
Índice de área foliar (Sentinel_2)	0.107	32	.0200*
Índice de área foliar (LAI 2200C)	0.203	32	0.002
Índice de área foliar (Dados alometricos)	0.116	32	0.200*

*Significativo a nivel de 5%

a Teste mais adequado ao caso

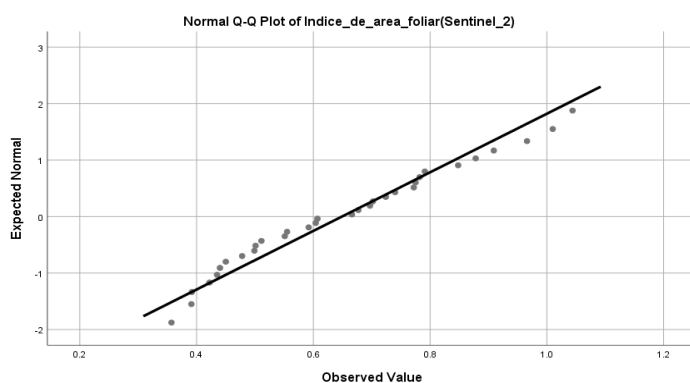
Apendice II: Teste de normalidade da variável teor de água na copa

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Teor de agua na folha_ sentinel 2	0.084	32	0.200*	0.974	32	0.626
Teor de agua na folha metodo directo	0.136	32	0.0137	0.904	32	0.008

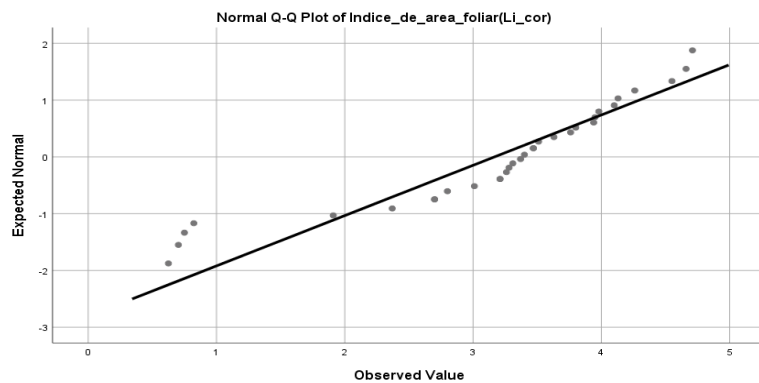
*Significativo a nivel de 5%

a Teste mais adequado ao caso

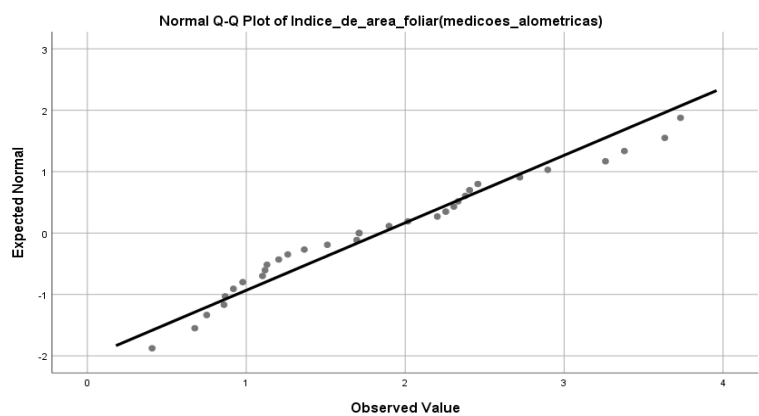
Apendice III: Grafico de normalidade do índice de área foliar estimado por Sentinel-2



Apendice IV: Gráfico de normalidade de índice de área foliar por LAI 2200C



Apendice V: Gráfico de normalidade do índice de área foliar por método alométrico.



I



II



Figuras I e II: Medição de índice de área foliar por LAI 2200C Canopy analyzer

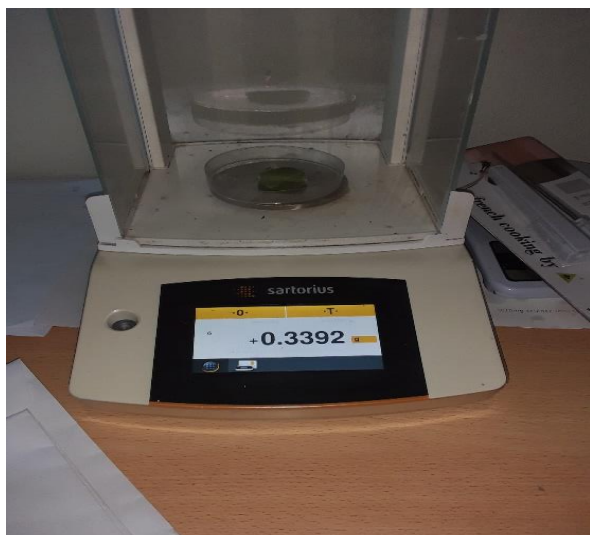


Figura III: Obtenção do peso fresco da amostra



Figura IV: Preparação de calda (água x Hítce)