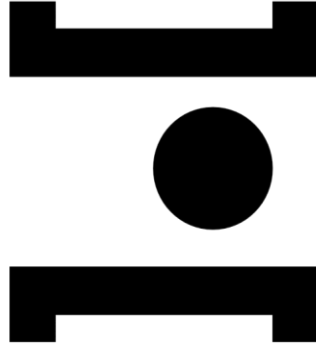


**INSTITUTO POLITÉCNICO DE SANTARÉM**  
**Escola Superior Agrária de Santarém**



**POLITÉCNICO  
DE SANTARÉM**

**Caracterização dinâmica da evolução de índice de vegetação  
na cultura do milho**

**Dissertação**

**Mestrado em Engenharia Agrónómica**

**Gonçalo Filipe Severino Ferreira das Neves**

**Orientação:**

**Professora Anabela Grifo (Orientadora)**  
**Professora Albertina Ferreira (Orientadora)**

**Engenheiro Jorge Martinez (Co-orientador)**

dezembro, 2023



## Agradecimentos

Às minhas orientadoras, Professoras Anabela Grifo e Albertina Ferreira, pela excelente orientação, pelas correções, ensinamentos e ajuda, e, acima de tudo, pela motivação que nunca se esgotava, paciência e disponibilidade total ao longo deste trabalho.

Ao meu coorientador, Eng. Jorge Martinez, pela disponibilidade e ajuda na demonstração das potencialidades da aplicação GranularLink.

À empresa Corteva Agriscience, pela confiança depositada e disponibilização do acesso à aplicação GranularLink.

À empresa Sociedade Agro-Florestal CampoDobrado, pela disponibilização de um dos seus vários campos para a realização deste trabalho.

Ao Eng. Mário Rui, pela disponibilidade e fornecimento de dados ao longo deste trabalho.

Aos meus pais, Fernando Neves e Manuela Gameiro, pelo apoio dado e por todos esforços que realizaram por mim ao longo destes últimos 2 anos e, em especial, no decorrer deste trabalho porque sem eles seria impossível a realização do mesmo.

Aos meus amigos, que de forma direta ou indireta, me ajudaram e incentivaram na realização deste trabalho.

## **Acrónimos/Siglas**

AP – Agricultura de Precisão

GPS – Sistema de posicionamento global

SIG – Sistemas de informação geográfica

VRT – Tecnologias de taxa variada

DR – Detecção remota

OLI – Operational Land Imager

TIRS – Thermal Infrared Sensor

NASA – Agência Espacial Norte Americana

USGS - United States Geological Survey

EU – União Europeia

ESA – Agência Espacial Europeia

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NDMI – Normalized Difference Moisture Index

NDRE - Normalized Difference Red Edge

## **Resumo**

A inovação tecnológica é uma constante na agricultura de precisão e com ela vem uma necessidade de experimentação e confirmação por parte destas. Dentro desta panóplia de tecnologias, os dados fornecidos pelos sensores de deteção remota juntamente com outras informações, como por exemplo dados meteorológicos, permitem fornecer, ao empresário agrícola, uma alternativa aprimorada e muito mais viável em relação à observação *in situ* e assim tomar uma decisão mais consciente e sustentável.

O Programa Espacial Europeu (ESA), entre outros, através do satélite Sentinel-2, fornece estes dados multiespectrais de forma gratuita, mas nem sempre são de fácil manipulação tornando o processo de análise moroso. Programas como o GranularLink, disponibilizam e manipulam dados/informação atempadamente, proporcionando ao empresário agrícola conhecimento que lhe permita tomar as melhores decisões.

Esta dissertação teve como objetivo a comparação e avaliação de índices vegetativos, nomeadamente NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDMI (Normalized Difference Moisture Index) ou NDRE (Normalized Difference of Red Edge), calculados a partir de imagens obtidas diretamente dos programas de observação da terra versus plataformas. Este objetivo foi alcançado através da caracterização da evolução destes índices de vegetação na cultura do milho implementada na Parcela Grande (Pivot) da empresa Sociedade Agro-Florestal CampoDobrado, localizada em Vale de Figueira (Santarém) durante o ano de 2021.

Foram encontradas diferenças ao nível da saturação, entre o NDVI e NDRE, em fases mais tardias da cultura e na correlação com o NDMI, em que o NDRE não satura tanto e obteve uma correlação superior. A variabilidade espacial, encontrada na parte direita do pivot, está de acordo com a forte relação da produtividade com os valores obtidos de NDVI e NDRE. A utilização da aplicação Granular Link, para o processamento e análise de imagens, evidenciou bastantes benefícios para o agricultor em relação ao método “tradicional” (via Sentinel-2) sendo a rapidez e facilidade de obtenção de imagens umas das principais vantagens. No entanto, caso seja necessária uma maior manipulação de dados, neste momento, apenas é possível através do download direto dessas imagens.

**Palavras-chave:** GranularLink, NDMI, NDRE, NDVI, produtividade, Sentinel-2.

## **Abstract**

Technological innovation is a constant in precision agriculture and with it comes a need for experimentation and confirmation. Within this panoply of technologies, the data provided by remote sensing sensors together with other information, such as meteorological data, makes it possible to provide the agricultural entrepreneur with an improved and much more viable alternative to in situ observation and thus make a more conscious and sustainable decision.

The European Space Programme (ESA), among others, through the Sentinel-2 satellite, provides this multispectral data free of charge, but it isn't always easy to manipulate, making the analysis process time-consuming. Programmes such as GranularLink provide and manipulate data/information in a timely manner, giving agricultural entrepreneurs the knowledge to make the best decisions.

The aim of this dissertation was to compare and evaluate vegetation indices, namely NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), NDMI (Normalised Difference Moisture Index) or NDRE (Normalised Difference of Red Edge), calculated from images obtained directly from earth observation programmes versus platforms. This objective was achieved by characterising the evolution of these vegetation indices in the maize crop implemented in the Large Plot (Pivot) of the company Sociedade Agro-Florestal CampoDobrado, located in Vale de Figueira (Santarém) during 2021.

Differences were found in the level of saturation between NDVI and NDRE at later stages of the crop and in the correlation with NDMI, where NDRE did not saturate as much and obtained a higher correlation. The spatial variability found in the right part of the pivot is in line with the strong relationship between productivity and the values obtained for NDVI and NDRE. The use of the Granular Link application for processing and analysing images has shown many benefits for farmers compared to the "traditional" method (via Sentinel-2), with the speed and ease of obtaining images being one of the main advantages. However, if further data manipulation is required, which, for the time being, is only possible by directly downloading these images.

**Key-words:** GranularLink, NDMI, NDRE, NDVI, Sentinel-2, yield.

# Índice

Agradecimentos .....	I
Acrónimos/Siglas .....	II
Resumo .....	III
Abstract.....	IV
Índice .....	V
Índice de figuras .....	VII
Índice de tabelas .....	IX
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica .....	3
2.1 Espectro Eletromagnético.....	3
2.2 Detecção Remota.....	4
2.2.1 Sensores de deteção remota.....	6
2.2.1.1 Sensores ativos .....	6
2.2.1.2 Sensores Passivos .....	7
2.2.2 Programa Landsat.....	7
2.2.3 Programa Copernicus .....	10
2.2.3.1 Sentinel-2.....	10
2.2.4 Missão PlanetScope.....	12
2.2.5 GranularLink .....	14
2.3 Índices de Vegetação .....	23
2.3.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	24
2.3.2 Normalized Difference Moisture Index (NDMI) .....	25
2.3.3 Normalized Difference Red Edge (NDRE) .....	26
3. Material e métodos .....	28

3.1	Localização .....	28
3.2	Caraterização climática.....	28
3.3	Caraterização do solo.....	30
3.4	Processamento das imagens NDVI, NDMI e NDRE a partir do Sentinel-2 .....	31
3.5	Plataforma Granular Link.....	32
3.6	Dados de Produção .....	34
4.	Resultados.....	35
4.1	NDVI .....	35
4.2	NDMI .....	39
4.3	NDRE .....	42
4.4	Granular Link .....	45
4.4.1	Plano Avançado – Sentinel+ .....	45
4.4.2	Plano <i>Premium</i> - PlanetHD .....	49
4.5	Produtividade.....	60
5.	Discussão .....	61
5.1	Comparação entre NDVI, NDMI e NDRE.....	61
5.2	Comparação de índices de vegetação com a produtividade .....	65
5.3	Comparação do processamento e análise de imagens obtidas pelos dois métodos ...	66
6.	Conclusões.....	68
7.	Referências Bibliográficas.....	69
	Anexos.....	74
	Anexo 1 .....	74
	Anexo 2 .....	79
	Anexo 3 .....	83
	Anexo 4 .....	98
	Anexo 5 .....	110

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> - Espectro eletromagnético. ....	3
<b>Figura 2</b> - Assinatura espectral.....	4
<b>Figura 3</b> - Componentes de um Sistema de DR. ....	5
<b>Figura 4</b> - Linha temporal do programa Landsat.....	8
<b>Figura 5</b> - Satélite Landsat 8.....	8
<b>Figura 6</b> - Recolha de dados do Sentinel-2.....	12
<b>Figura 7</b> - Representação espacial dos satélites Dove. ....	13
<b>Figura 8</b> - Representação espacial da SkySat. ....	14
<b>Figura 9</b> - Vigor da planta através da interpretação dos valores de NDVI.....	23
<b>Figura 10</b> - Comparação entre carta de NDVI e NDRE.....	27
<b>Figura 11</b> - Localização da parcela em estudo (Pivot Grande). ....	28
<b>Figura 12</b> - Evolução dos valores médios mensais da temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) normais e dos valores para os meses de maio a setembro de 2021.....	29
<b>Figura 13</b> - Evolução comparativa dos valores mensais de 2021 (R21) para os meses de maio a setembro com os valores normais de precipitação total (R) (1981-2010). ....	30
<b>Figura 14</b> - Classificação dos solos da parcela em estudo.....	31
<b>Figura 15</b> - Imagem matricial NDVI (09/05/2021) sobreposta com os pontos vetoriais. ...	32
<b>Figura 16</b> - Índices disponibilizados pela aplicação Granular Link. ....	33
<b>Figura 17</b> - Gráfico de tendência disponibilizado pela aplicação Granular Link.....	33
<b>Figura 18</b> - Evolução dos valores de NDVI médio durante o ciclo cultural, segundo as imagens processadas do Sentinel-2. ....	35
<b>Figura 19</b> - NDVI: Registos mais baixo (esquerda) e mais alto (direita) durante o ciclo cultural.....	36
<b>Figura 20</b> - NDVI: Evolução entre os dias 5 de maio e 6 de junho.....	37
<b>Figura 21</b> - NDVI: Evolução entre os dias 28 de junho e 28 de julho. ....	38
<b>Figura 22</b> - NDVI: Evolução entre 12 de agosto até à colheita.....	38
<b>Figura 23</b> - Evolução dos valores de NDMI médio durante o ciclo cultural, segundo as imagens processadas do Sentinel-2. ....	39
<b>Figura 24</b> - NDMI: Registos mais alto (esquerda) e mais baixo (direita). ....	40
<b>Figura 25</b> - NDMI: Evolução durante o mês de maio e uniformização a partir de 3 de junho. ....	40
<b>Figura 26</b> - NDMI: imagens após dia 12 de agosto até colheita. ....	41

<b>Figura 27</b> - Evolução dos valores de NDRE médio durante o ciclo cultural, segundo as imagens processadas do Sentinel-2. ....	42
<b>Figura 28</b> - NDRE: Evolução durante o mês de maio até 23 de junho. ....	43
<b>Figura 29</b> - NDRE: Evolução entre 23 de junho e 8 de julho.....	43
<b>Figura 30</b> - NDRE: Evolução a partir de dia 17 de agosto.....	44
<b>Figura 31</b> - Evolução dos valores de NDVI médio durante o ciclo cultural, segundo o plano Avançado da aplicação Granular Link. ....	45
<b>Figura 32</b> - NDVI segundo o plano Avançado do Granular Link ao longo do ciclo cultural (9 de maio – 28 de junho).....	46
<b>Figura 33</b> - NDVI segundo o plano Avançado do Granular Link ao longo do ciclo cultural (8 de julho –22 de agosto). ....	47
<b>Figura 34</b> - NDVI segundo o plano Avançado do Granular Link ao longo do ciclo cultural (27 de agosto – 21 de setembro).....	48
<b>Figura 35</b> - Evolução dos valores de NDVI médio durante o ciclo cultural, segundo o plano Premium da aplicação Granular Link. ....	49
<b>Figura 36</b> - NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (3 de maio – 14 de maio). ....	50
<b>Figura 37</b> - NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (17 de maio – 5 de junho).....	51
<b>Figura 38</b> - NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (6 de junho – 24 de junho). ....	52
<b>Figura 39</b> - NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (25 de junho – 8 de julho).....	53
<b>Figura 40</b> - NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (9 de julho – 21 de julho).....	54
<b>Figura 41</b> - NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (22 de julho – 1 de agosto). ....	55
<b>Figura 42</b> - NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (3 de agosto – 13 de agosto). ....	56
<b>Figura 43</b> - NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (16 de agosto – 26 de agosto). ....	57
<b>Figura 44</b> - NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (27 de agosto – 11 de setembro).....	58

<b>Figura 45</b> - NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (16 de setembro – 30 de setembro).....	59
<b>Figura 46</b> - Mapa de produtividade da Pivot Grande. ....	60
<b>Figura 47</b> - Evolução comparativa dos valores médios de NDVI com os valores médios de NDRE, ao longo do ciclo cultural. ....	61
<b>Figura 48</b> - Comparação de valores de NDVI e NDRE a 13 de junho de 2021.....	62
<b>Figura 49</b> - Comparação de valores de NDVI e NDRE a 13 de julho de 2021.....	63
<b>Figura 50</b> - Comparação de valores de NDVI e NDRE a 17 de agosto de 2021.....	63
<b>Figura 51</b> - Correlação entre NDVI e NDMI. ....	64
<b>Figura 52</b> - Correlação entre NDRE e NDMI. ....	65
<b>Figura 53</b> - Comparação NDVI, NDRE e produtividade .....	66

## **Índice de tabelas**

<b>Tabela 1</b> - Características das bandas do Landsat 8. ....	9
<b>Tabela 2</b> - Características das bandas do Sentinel-2. ....	11
<b>Tabela 3</b> - Caracterização das bandas espectrais dos Dove. ....	13
<b>Tabela 4</b> - Caracterização das bandas espectrais do SkySat. ....	14
<b>Tabela 5</b> - Descrição dos planos de utilização do Granular Link. ....	15

## 1. Introdução

Nos últimos cinquenta anos, a evolução da sociedade no que respeita à tecnologia, à consciência ecológica e ao aproveitamento de fatores de produção tem sido crescente e o setor agrícola não é exceção.

O aparecimento de novos equipamentos e tecnologias tem permitido a melhor compreensão do que se passa com a cultura e/ou solo através da monitorização e avaliação da variabilidade temporal e espacial dando origem ao conceito de produção denominado agricultura de precisão (AP). O objetivo da AP é reduzir custos de produção, aumentar a produtividade e o rigor do controlo da aplicação dos fatores de produção, respeitando o meio ambiente e garantindo a sustentabilidade. O propósito é sempre tratar de forma diferente aquilo que é diferente.

A AP envolve diversas tecnologias onde se destacam: sistemas de posicionamento global (GPS), sistemas de informação geográfica (SIG), tecnologias de taxa variada (VRT), sensores de deteção remota, monitores de produtividade e tecnologias de recolha e armazenamento de dados.

Dentro desta panóplia de tecnologias, os dados fornecidos pelos sensores de deteção remota juntamente com outras informações, como por exemplo dados meteorológicos, permitem fornecer, ao empresário agrícola, uma alternativa aprimorada e muito mais viável em relação à observação *in situ* e assim tomar uma decisão mais consciente e sustentável.

Programas de observação da Terra como o Landsat e o Copernicus recolhem dados multiespectrais que disponibilizam de forma gratuita. A manipulação destes dados nem sempre é fácil. O tratamento e análise das imagens recolhidas por estes programas envolve o conhecimento de diversas tecnologias, pode ser bastante morosa e não estar ao alcance do empresário agrícola.

Assim, existem alternativas como por exemplo plataformas que disponibilizam e manipulam dados/informação atempadamente, proporcionando ao empresário agrícola conhecimento que lhe permita tomar as melhores decisões.

Esta dissertação tem como objetivo a comparação e avaliação de índices vegetativos, nomeadamente NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDMI (Normalized Difference Moisture Index) ou NDRE (Normalized Difference of Red Edge), calculados a partir de imagens obtidas diretamente dos programas de observação da terra versus plataformas. Este objetivo será alcançado através da caracterização da evolução de índices de vegetação na cultura do milho.

Os índices de vegetação permitirão reforçar a importância da deteção remota para avaliar a variabilidade temporal e calcular a magnitude da variabilidade espacial da produtividade da cultura do milho.

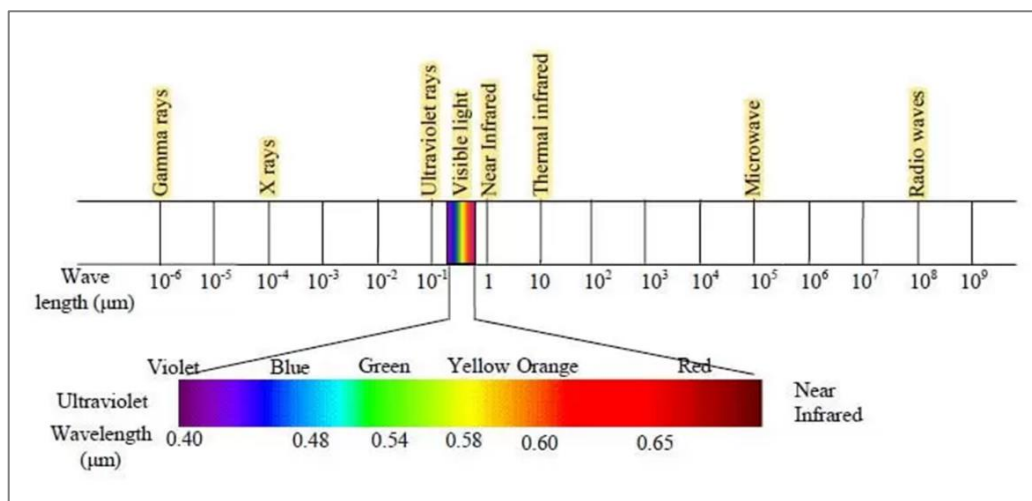
## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Espectro Eletromagnético

A energia eletromagnética é uma forma dinâmica de energia que se manifesta num movimento ondulatório (Aggarwal, 2004). O espectro eletromagnético divide estas ondas eletromagnéticas em diferentes categorias, de acordo com os valores de comprimento de onda e de frequência. Os comprimentos de onda do espectro eletromagnético que podem ser vistos pelo olho humano encontram-se entre 0,4  $\mu\text{m}$  e 0,7  $\mu\text{m}$ . Esta faixa é designada por espectro eletromagnético visível (**Figura 1**).

**Figura 1**

*Espectro eletromagnético.*



*Nota.* Retirado de GISRSStudy (2023)

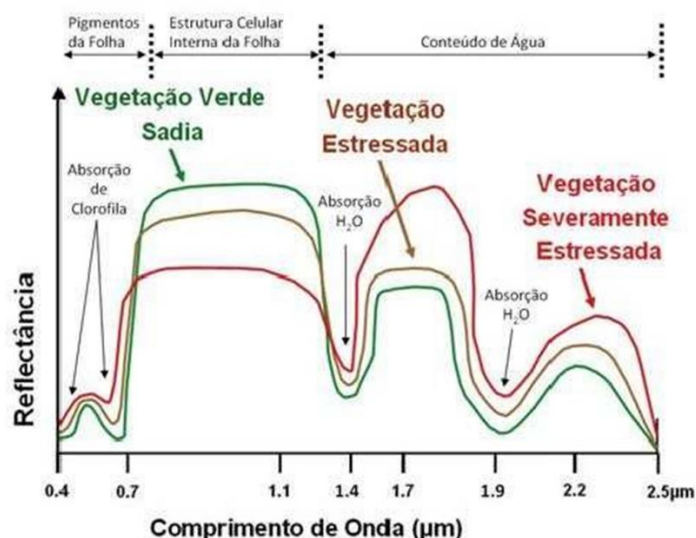
Com a funcionalidade múltipla dos sensores dos satélites e a disponibilidade de bandas espectrais, é possível identificar o comportamento espectral da vegetação consoante o tipo de vegetação (Sousa & Silva, 2011)

As características espectrais da vegetação variam consoante o comprimento de onda e os seus pigmentos. O pigmento clorofila presente no parênquima das folhas absorve a radiação nos comprimentos de onda do azul (0,42-0,49 $\mu\text{m}$ ) e do vermelho (0,58-0,70 $\mu\text{m}$ ), refletindo no comprimento de onda do verde (0,49-0,58 $\mu\text{m}$ ). Para além de radiação no intervalo do comprimento de onda de visível, a estrutura interna das folhas atua como um excelente refletor difuso de comprimentos de onda do infravermelho próximo (0,70-1,30 $\mu\text{m}$ ) (Xu et al., 2007).

ZAGOLSKI et al., 1996, realça que a monitorização dos valores de refletância do infravermelho próximo permite determinar o estado da vegetação, que será considerada saudável se a refletância for alta neste comprimento de onda. Esta característica da vegetação tem bastante interesse em agronomia, uma vez que perturbações capazes de provocar alterações no conteúdo dos cloroplastos condicionam a sua capacidade fotossintética e aumentam a vulnerabilidade a stresses nutricionais, senescência e sintomas fitopatológicos. Uma folha considerada saudável tem uma curva de refletância característica designada por assinatura espectral (**Figura 2**).

**Figura 2**

*Assinatura espectral.*



*Nota.* Retirado de Cavalcante (2016)

## 2.2 Detecção Remota

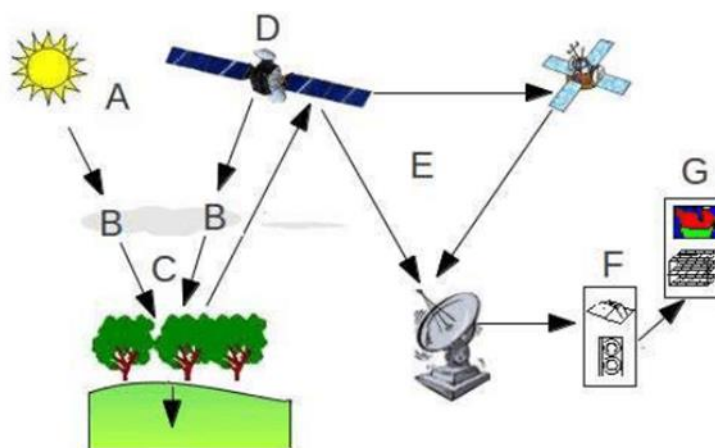
Segundo Coelho et al., (2003), a deteção remota (DR) define-se como uma técnica de recolha de informação de áreas e objetos sobre ou próximos da superfície terrestre, por um sensor de radiação eletromagnética colocado acima da mesma superfície terrestre. Esta tem como objetivo auxiliar a análise da variabilidade espacial de superfícies produtivas através de modelos matemáticos que usam imagens aéreas (Pereira, 2019).

Como realça Moreira (2020), a aquisição de imagens, conforme o percurso da **Figura 3**, envolve uma fonte energética de iluminação (A) incidente, maioritariamente a radiação solar, sobre o objeto em estudo (C). A radiação emitida pela fonte entra em contacto e

interage com a atmosfera (B) no percurso até ao objeto e pode ocorrer novamente, caso este, reflita para o sensor remoto (D). O sensor regista a energia difundida ou emitida pelo objeto, e posteriormente, a energia registada é transmitida para uma estação (E) que recebe e processa os dados para a elaboração de uma imagem (F). Esta é interpretada, visual e/ou digitalmente com o objetivo de extrair informações sobre o objeto. A etapa final do processo de DR resulta na aplicação da informação extraída na resolução de um determinado problema, de acordo com a contextualização (G).

**Figura 3**

*Componentes de um Sistema de DR.*



*Nota.* Retirado de Moreira, 2020, (p.12)

## **2.2.1 Sensores de deteção remota**

Lechner et al., 2020 referem que os sensores utilizados em DR são dispositivos capazes de medir e registar energia eletromagnética, sendo estes instalados em plataformas aéreas (aviões, helicópteros, ou veículos não tripulados) e espaciais (satélites), podendo estes ser ativos ou passivos.

### **2.2.1.1 Sensores ativos**

Sensores ativos são sensores que emitem um sinal eletromagnético (pulso) e que depois medem e registam o tempo que demoram a receber a radiação refletida desse pulso. As vantagens principais destes sensores é poderem trabalhar durante a noite e não serem afetados pela atmosfera (Sousa & Silva, 2011). Os sensores remotos LiDAR (Light Detection And Ranging) e o RADAR (Radio Detection And Ranging) são exemplos deste tipo de sensores.

O sensor LiDAR emite um pulso laser com um comprimento de onda compreendendo, normalmente, a região do espectro eletromagnético do infravermelho próximo. A distância a um objeto é conseguida pela diferença de tempo entre a emissão de um pulso laser e a deteção do sinal refletido. Os dados LiDAR são representados por nuvens de pontos 3D. A aptidão deste sensor para efetuar a medição de distâncias, torna possível criar modelos tridimensionais da superfície da terra. O LiDAR é particularmente bom na caracterização da estrutura da vegetação e pode também medir diretamente a altura das árvores e do solo, construindo representações tridimensionais da estrutura da floresta (Lechner et al., 2020) .

O sensor RADAR regista a informação radiométrica no campo das microondas (desde 1cm até 1m). Estas conseguem atravessar nuvens com alta densidade já que não interferem com a atmosfera (Sousa & Silva, 2011). As diferenças entre tempos de retorno e comprimentos de ondas podem ser usadas para realizar uma representação 3D de um determinado objeto. Os dados RADAR são apresentados em formato raster, como uma grelha de valores, permitindo diferenciar características de cobertura do solo de acordo com a rugosidade da sua superfície, a estrutura 3D dos alvos e o teor de água (Lechner et al., 2020).

### **2.2.1.2 Sensores Passivos**

Os sensores passivos dependem de uma fonte de energia, normalmente o Sol. Estes como dependem da radiação refletida ou emitida, sofrem efeitos de difusão e absorção quando interagem com a atmosfera ou de radiação refletida de terrenos adjacentes, sendo a energia recebida pelo sensor afetada pela presença de nuvens e pelas características da superfície, não permitindo a sua utilização noturna. Como exemplo de sensores passivos temos os sensores térmicos e óticos. Os sensores térmicos detetam a radiação emitida no infravermelho térmico. Os sensores óticos recolhem dados na região do visível, infravermelho próximo e médio, e infravermelho térmico do espectro eletromagnético, podendo ser divididos em sensores multiespectrais ou hiperespetrais, dependendo do número de bandas espectrais (Lechner et al., 2020).

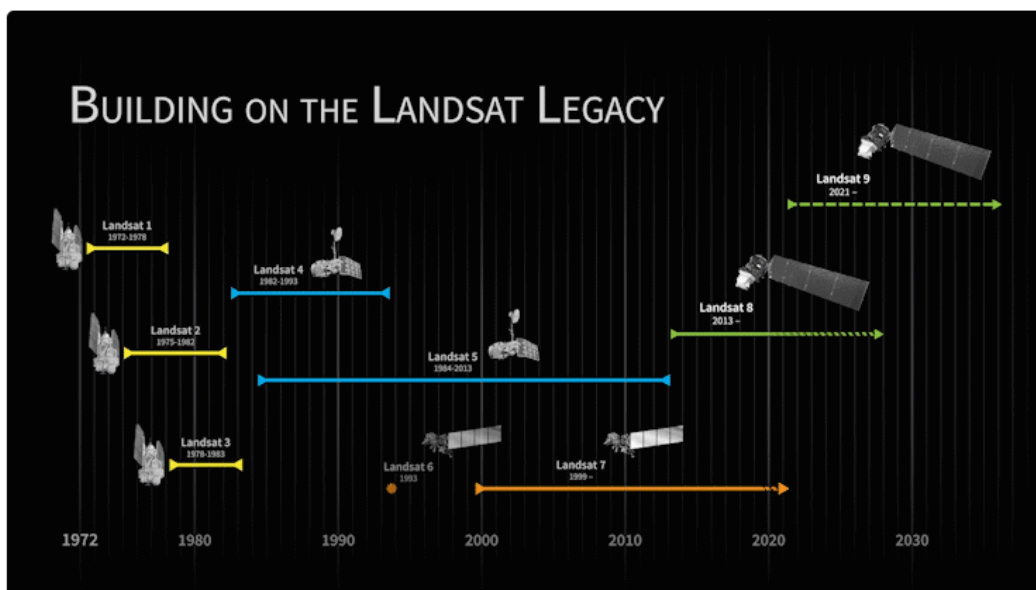
Segundo Sousa & Silva (2011), os dados obtidos por estes sensores podem ser descritos em termos de resolução espacial, resolução temporal, resolução espectral e resolução radiométrica. A resolução espacial corresponde à dimensão da célula do terreno ou pixel observada por um radiómetro, em cada instante e define a distância mínima entre dois objetos que um sensor consegue registar distintamente. A resolução temporal consiste no tempo que um satélite leva a completar um ciclo orbital completo ou seja o intervalo de tempo que um satélite demora até passar novamente no mesmo local. A resolução espectral é o número e largura das bandas espectrais presentes num sensor. A resolução radiométrica descreve a capacidade do sensor para discriminar pequenas variações de energia, ou seja, é o número de níveis distintos, ou discretos, em que um sinal pode ser dividido.

### **2.2.2 Programa Landsat**

O programa Landsat surgiu no ano de 1967, a partir de um projeto desenvolvido pela Agência Espacial Americana, com vista à construção de satélites para observação da superfície da Terra. Desde então foram lançados 9 satélites (**Figura 4**) com diferentes sensores, comprimentos de onda e resoluções espaciais (Falcão, 2019).

**Figura 4**

*Linha temporal do programa Landsat.*



*Nota.* Retirado de eoPortal, 2022

Segundo Masek et al., 2020, a 11 de fevereiro de 2013, foi lançado o Landsat 8 (Figura 5). Este orbita a Terra, numa órbita quase polar, a uma altitude de 705 km, inclinado a 98,2 graus e circunda o nosso planeta a cada 99 minutos, com um ciclo de repetição de 16 dias.

**Figura 5**

*Satélite Landsat 8.*



*Nota.* Retirado de NASA (2023).

O Landsat 8 foi concebido para a recolha de dados multiespectrais de 11 bandas, da superfície terrestre e para isso utiliza dois sensores passivos, *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). O sensor OLI captura imagens com precisão radiométrica de 12 bits por pixel, utiliza 9 bandas espectrais nas zonas dos infravermelhos visíveis, infravermelho próximo, ondas curtas e pancromática. O sensor TIRS recolhe dados para duas bandas espectrais na região térmica (**Tabela 1**).

**Tabela 1**

*Caraterísticas das bandas do Landsat 8.*

Sensor	Banda espectral	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolução espacial (m)
<b>OLI</b>	B1 – Aerossol costeiro	0,43 – 0,45	30
	B2 – Azul	0,45 – 0,51	30
	B3 – Verde	0,53 – 0,59	30
	B4 – Vermelho	0,64 – 0,67	30
	B5 – Infravermelho Próximo (NIR)	0,85 – 0,88	30
	B6 – Infravermelho de ondas curtas 1	1,57 – 1,65	30
	B7 – Infravermelho de ondas curtas 2	2,11 – 2,29	30
	B8 - Pancromática	0,50 – 1,38	15
	B9 - CIRRUS	1,36 – 1,38	30
<b>TIRS</b>	B10 – Infravermelho térmico 1	10,60 – 11,19	100
	B11 – Infravermelho térmico 2	11,50 – 12,51	100

*Nota.* Adaptado de United States Geological Survey (USGS) (2013).

No dia 27 de setembro de 2021, numa parceria entre a NASA e USGS, foi lançado o satélite Landsat 9. Este é muito parecido com o Landsat 8, apresentando apenas algumas alterações. Utiliza a mesma órbita e providencia imagens de 16 em 16 dias, mas com 8 dias de diferença do Landsat 8. Em termos de sensores é composto por um melhoramento do OLI e TIRS, OLI-2 e TIRS-2 (Masek et al., 2020).

### **2.2.3 Programa Copernicus**

Segundo a União Europeia (UE) (2015), o programa Copernicus é um programa europeu de observação e monitorização da Terra coordenado e gerido pela comissão europeia em parceria com a agência espacial europeia (ESA). Este proporciona dados de forma operacional e serviços de informação de forma gratuita sobre numerosas áreas de aplicação, graças a um conjunto de satélites, designados por Sentinel e informação recolhida *in situ*. Cada missão do Sentinel é baseada numa constelação de 2 satélites com objetivo de fornecer informação ótica e de radar para a superfície terrestre, oceânica e atmosférica.

Até ao dia de hoje foram executadas 4 missões, sendo que, o primeiro satélite do programa (Sentinel-1A) foi lançado a 3 de abril de 2014 com o objetivo de monitorização da superfície terrestre e oceano utilizando o sensor RADAR permitindo a disponibilidade de imagens independentemente das condições climatológicas. Em junho de 2015, o Sentinel-2A foi lançado com o objetivo de monitorização da vegetação, solo e áreas costeiras sendo este o mais utilizado para fins agrícolas. O Sentinel-3A foi lançado em fevereiro de 2016 com o propósito de observação marítima em termos de topografia da superfície marítima e controlo de temperatura e cor do oceano e solo. O Sentinel-6 Michael Freilich, lançada a novembro de 2020, é uma missão conjunta entre ESA, organização europeia para a exploração de satélites meteorológicos (EUMETSAT), NASA e administração oceânica e atmosférica nacional (NOAA) com o objetivo de medição da humidade e temperatura da troposfera e estratosfera. O Sentinel-6 amplia e melhora os dados climáticos recolhidos pelo Sentinel-3 focando-se nas medições críticas sobre a mudança do nível do mar. Estes dados serão complementados pelo Sentinel-6B, com previsão de lançamento em 2025. As missões Sentinel-4 e Sentinel-5 tem data prevista de lançamento em março e dezembro de 2024, respetivamente, com o objetivo de monitorização da qualidade do ar presente na troposfera, através da análise a certos gases como ozono e dióxido de azoto, por exemplo (Sentinel Online & ESA, n.d).

#### **2.2.3.1 Sentinel-2**

Segundo a Agência Europeia Espacial (ESA) (2022) , o Sentinel-2 é composto por uma constelação de dois satélites idênticos de órbita polar, o Sentinel-2A (lançado a 23 de junho de 2015) e o Sentinel-2B (lançado a 7 de março de 2017). O objetivo da missão é fornecer aquisições sistemáticas de imagens multiespectrais de alta resolução. Este

disponibiliza 13 bandas multiespectrais, conforme a **Tabela 2**, com uma resolução espacial compreendida entre 10 e 60 metros e uma resolução temporal de 5 dias. Estas novas características permitiram um aprimoramento dos dados obtidos em relação ao Sentinel-1.

**Tabela 2**

*Caraterísticas das bandas do Sentinel-2.*

<b>Banda Espectral</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>	<b>Resolução espacial (m)</b>	<b>Combinação de Bandas</b>
<b>B02 – Azul</b>	490	10	Cor Verdadeira RGB 04/03/02  Falsa Cor 1 e 2 RGB 08/04/03 E 04/08/03
<b>B03 – Verde</b>	560	10	
<b>B04 – Vermelho</b>	665	10	
<b>B08 – Infravermelho Próximo (NIR)</b>	842	10	
<b>B05 – Vermelho Limítrofe 1</b>	705	20	SWIR 1 RGB 12/11/8A
<b>B06 - Vermelho Limítrofe 2</b>	740	20	
<b>B07 - Vermelho Limítrofe 3</b>	783	20	
<b>B08A - Vermelho Limítrofe 4</b>	865	20	
<b>B11 – Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 1</b>	1610	20	
<b>B12 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 2</b>	2190	20	
<b>B01 - Aerossóis</b>	443	60	
<b>B09 - Vapor de água</b>	940	60	
<b>B10 - Cirrus</b>	1375	60	

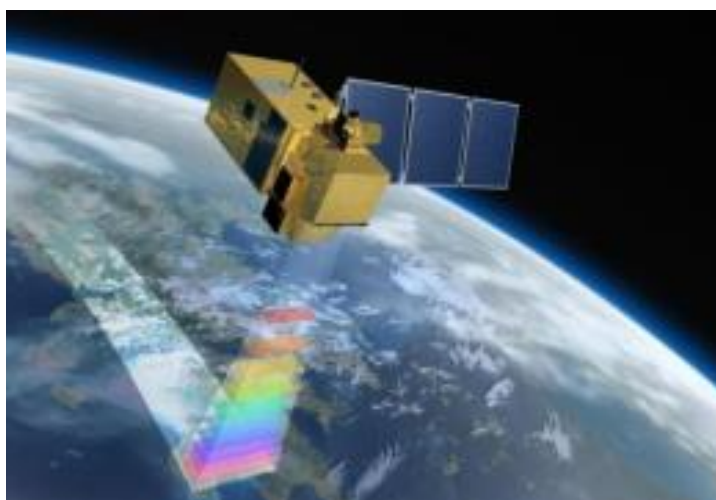
*Nota.* Adaptado de ESA (2022).

Cada satélite utiliza um tipo de sensor passivo denominado de instrumento multiespectral (MSI). Este utiliza um conceito de varrimento (**Figura 6**) que consiste na

recolha de dados em linha ao longo da faixa orbital e aproveita o movimento do satélite em órbita para capturar novas linhas de dados. Este tem um período de observação entre 17 a 32 minutos (ESA, 2022).

### Figura 6

*Recolha de dados do Sentinel-2.*



*Nota.* Retirado de ESA (2022).

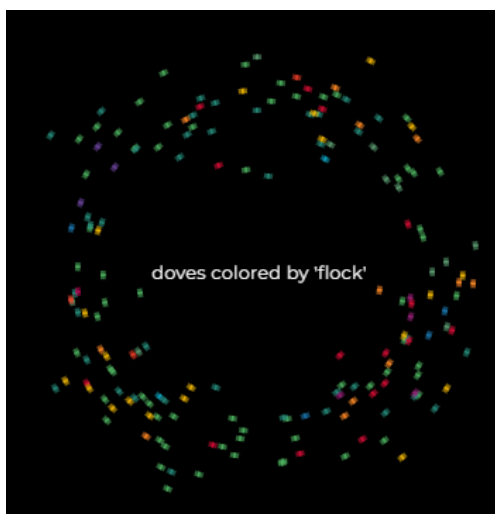
#### 2.2.4 Missão PlanetScope

Segundo Planet (2023), a constelação PlanetScope é composta por mais de 150 satélites em órbita que capturam mais de 350 milhões de metros quadrados de imagens diariamente. Esta é composta por 2 constelações de satélites distintas: os Doves e SkySats.

Os Doves são satélites do tamanho de caixas de sapato com um peso aproximado de 5 quilogramas. Tipicamente são lançados para o espaço em grandes quantidades e formam uma espécie de rebanho (**Figura 7**). Estes são equipados com sensores (Dove-C, Dove-R e SuperDove) que operam em 8 bandas espectrais conforme a **Tabela 3**. Disponibiliza uma resolução espacial entre 3 metros e 4,1 metros dependendo do sensor do Dove e com uma resolução temporal diária (The European space Agency, n.d).

**Figura 7**

*Representação espacial dos satélites Dove.*



*Nota.* Retirado de Planet (2023).

**Tabela 3**

*Caraterização das bandas espectrais dos Dove.*

<b>Banda Espectral</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>
<b>Aerossol</b>	431 - 452
<b>Azul</b>	465 - 515
<b>Verde I</b>	513 - 549
<b>Verde</b>	547 - 583
<b>Amarelo</b>	600 - 620
<b>Vermelho</b>	650 - 680
<b>Vermelho Limítrofe</b>	697 - 713
<b>Infravermelho Próximo</b>	845 - 885

*Nota.* Adaptado de The European space Agency (n.d)

A constelação SkySat é composta por 21 satélites (**Figura 8**). Esta providencia 5 bandas espectrais (**Tabela 4**) e também é capaz de capturar vídeos até 90 segundos. Dependendo do sensor no satélite, este tem uma resolução espacial nas bandas multiespectrais entre 0,75 metros e 1 metro e na banda pancromática entre 0,57 metros e 0,86 metros. Além do referido anteriormente, tem uma resolução temporal diária.

**Figura 8**

*Representação espacial da SkySat.*



*Nota.* Os 21 satélites da constelação estão representados pelos quadrados azuis. Retirado de Planet (2023).

**Tabela 4**

*Caraterização das bandas espectrais do SkySat.*

<b>Banda Espectral</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>
<b>Azul</b>	450 - 515
<b>Verde</b>	515 – 595
<b>Vermelho</b>	605 - 695
<b>Infravermelho próximo</b>	740 - 900
<b>Pancromática</b>	450 - 900

*Nota.* Adaptado de The European space Agency (n.d).

### **2.2.5 GranularLink**

Segundo Corteva Agriscience (n.d), o Granular Link é uma aplicação (Web ou aplicação móvel) que combina a tecnologia mais recente com a experiência agrícola da Corteva. Esta plataforma é capaz de fornecer informações agronómicas, em modo digital, sobre recomendações e alertas sobre as necessidades das culturas, dados meteorológicos, monitorização de pragas e doenças e mapas VRA (Variable Rate Application). Os serviços

proporcionados pela Granular Link baseiam-se na análise da variabilidade espacial e temporal de vários índices de vigor obtidos a partir de imagens de satélite do Sentinel-2 e PlanetScope. Esta aplicação disponibiliza 3 planos de utilização (**Tabela 5**).

**Tabela 5**

*Descrição dos planos de utilização do Granular Link.*

<b>Plano de Utilização</b>	<b>Resolução espacial</b>	<b>Resolução temporal</b>	<b>Índices de vegetação</b>
<b>Básico</b>	10 x 10 m	5 dias	NDVI
<b>Avançado - Sentinel+</b>	3 x 3 m	3 - 5 dias	13 índices (NDVI, MCARI, NDWI, etc)
<b>Premium – Planet HD</b>	3 x 3 m	Todos os dias	13 índices (NDVI, MCARI, NDWI, etc)

*Nota.* Adaptado de Corteva agriscience (n.d).

Os planos de utilização Básico e Avançado utilizam imagens do Sentinel-2 com a particularidade de que o plano Avançado utiliza imagens que são recalculadas para uma resolução espacial de 3x3m. Em relação ao plano *Premium* são utilizadas imagens do programa PlanetScope.

O plano Básico está disponível para todos os agricultores. Pelo contrário, os planos Avançado e *Premium* estão disponíveis para os agricultores associados da empresa Corteva.

A aplicação Granular Link disponibiliza diversos índices de vegetação. Realçam-se em seguida os índices disponibilizados e os respetivos conselhos de utilização que podem ser consultados pelos diversos utilizadores.

## **NDVI**

O NDVI permite a estimativa do estado de vigor da cultura medindo os seus valores de reflexão no NIR e nas bandas vermelhas. O índice varia de 0 (cobertura de solo muito baixa ou solo nu) a 1 (quantidade elevada de vegetação saudável e densa).

### **Conselhos de utilização**

Para a maioria das culturas, NDVI representa um bom indicador do estado da cultura, ajudando a detetar stress ou outros problemas e a monitorizar o teor de azoto. A NDVI é útil durante todo o desenvolvimento da cultura e particularmente durante as fases intermédias. Em momentos em que o desenvolvimento vegetativo é elevado, pode saturar-se e tornar-se ilegível.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$$

## **MCARI1 (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index 1)**

O MCARI1 é um índice muito sensível a variações na atividade clorofílica e permite diferenciar as áreas com uma alta atividade fotossintética daquelas sem cultura ou com cultura pouco saudável. Apesar de ser um índice não padronizado, valores próximos de 0,85 são frequentes em culturas saudáveis.

### **Conselhos de utilização**

O MCARI1 pode ser utilizado durante todo o ciclo de cultivo, sendo útil em combinação com outros índices (emergência de culturas, deteção de problemas, em culturas com cobertura vegetal esparsa, etc.). É ideal para observar áreas afetadas por pragas/doenças/problemas e monitorizá-las ao longo de todo o ciclo de cultivo.

$$\text{MCARI1} = 1,2 \times (2,5 \times (\text{RedEdge} - \text{RED}) - 1,3 \times (\text{RedEdge} - \text{GREEN}))$$

## **GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)**

Este índice normalizado complementa o NDVI e permite a estimativa do vigor da cultura, estado de saúde e capacidade de absorção de azoto, medindo os seus valores de reflexão nas faixas NIR e verdes. Mostra uma maior correlação com o azoto foliar do que o NDVI e uma maior sensibilidade à atividade fotossintética. É uma escolha para estimar as

necessidades de fertilização/nutrição. O índice varia de 0 (cobertura do solo muito baixa ou solo nu) a 1 (quantidade elevada de vegetação saudável e densa).

### **Conselhos de utilização**

Este índice é principalmente utilizado em fases avançadas da cultura quando a capacidade fotossintética está no seu máximo, uma vez que os valores de NDVI podem saturar-se. A sua maior sensibilidade à concentração de clorofila significa que, em condições em que a planta tem maior refletância verde, este índice torna-se de grande relevância.

$$\mathbf{GNDVI} = \frac{(\mathbf{NIR} - \mathbf{GREEN})}{(\mathbf{NIR} + \mathbf{GREEN})}$$

### **EVI2 (Enhanced Vegetation Index 2)**

O EVI2 é um índice de vegetação otimizado concebido para melhorar o sinal de vegetação com maior sensibilidade em regiões de biomassa elevada e melhor monitorização da vegetação ou da influência climática. O EVI 2 é uma versão do EVI para aqueles sensores que não têm uma banda azul. É utilizado para analisar áreas com grandes quantidades de clorofila e, de preferência, com efeitos topográficos mínimos.

### **Conselhos de utilização**

O índice EVI 2 pode ser utilizado durante todo o ciclo da cultura, mas é preferível utilizá-lo frequentemente quando a acultura tem um grande crescimento e cobre o solo, pois não satura e permite uma melhor visão das áreas problemáticas.

$$\mathbf{EVI\ 2} = 2,4 \times \frac{\mathbf{NIR} - \mathbf{RED}}{\mathbf{NIR} + \mathbf{RED} + 1}$$

### **Visível**

A camada visível permite-nos observar a cultura ou terra de interesse por meio da combinação de faixas que o olho humano capta. Desta forma, obtemos uma imagem da sua parcela como se fosse uma fotografia aérea de satélite.

### **Conselhos de utilização**

Esta camada é particularmente interessante para ajudar a detetar a presença de nuvens, sombras ou outros elementos que possam estar a afetar a imagem da cultura.

$$\mathbf{RGB} = \mathbf{RED/GREEN/BLUE}$$

### **SBI (Soil Brightness Index)**

O Índice de Brilho do Solo correlaciona indiretamente e quantidade de luz que um solo reflete com o conteúdo de matéria orgânica, areias e salinidade, podendo ser um indicador de alteração das condições do solo. Este índice serve para monitorizar a degradação do solo e os padrões de erosão do solo. Os solos de cor mais escura estão associados a um maior teor de matéria orgânica, enquanto os solos mais claros ou mais brilhantes estão associados a parâmetros de textura arenosa ou a sais mais dissolvidos.

### **Conselhos de utilização**

Este índice é essencialmente indicado para quando não há cultura estabelecida, ou seja, imediatamente antes da sementeira ou após a colheita, ou em culturas cuja vegetação não cobre completamente o solo (arbustos, lenhosos, etc.).

$$\mathbf{SBI} = \sqrt{\left(\frac{\mathbf{RED} \times \mathbf{RED}}{\mathbf{GREEN} \times \mathbf{GREEN}}\right) / 2}$$

### **WDRVI (Wide Dynamic Range Vegetation Index)**

O Índice de Vegetação de Amplo Alcance Dinâmico é semelhante ao NDVI, mas utiliza um coeficiente de ponderação de 0,1 a 0,2 (a) para reduzir a disparidade entre as contribuições dos sinais quase infravermelhos e vermelhos para o NDVI. O WDRVI é particularmente eficaz em situações com densidade de vegetação moderada a elevada quando o NDVI excede 0,6. O NDVI tende a uniformizar quando a fração de vegetação e o índice de área foliar (LAI) aumentam, enquanto o WDRVI é mais sensível a uma gama mais ampla de frações de vegetação e a mudanças no LAI.

### **Conselhos de utilização**

O WDRVI deve ser utilizada em fases avançadas do cultivo quando a vegetação estiver saudável e plenamente desenvolvida e quando índices complementares como a NDVI começarem a saturar e não puderem ser observadas diferenças entre zonas. Com este índice, as diferenças mesmo em áreas em bom estado serão marcadas e acentuadas de forma inteligente para uma melhor tomada de decisão.

$$\mathbf{WDRVI} = \frac{a \times (\text{NIR}-\text{RED})}{a \times (\text{NIR}+\text{RED})}$$

### **NDWI (Normalized Difference Water Index)**

O Índice de Diferença Normalizada de Água é utilizado para destacar características de água aberta numa imagem de satélite, permitindo que um corpo de água se destaque contra o solo e a vegetação. O NDWI é utilizado como medida da quantidade de água retida pela vegetação, ou do nível de saturação de humidade retida pelo solo.

### **Conselhos de utilização**

O índice de água normalizada pode ser utilizado em qualquer fase do ciclo anual, sendo mais interessante nos períodos em que se deseja conhecer a capacidade da cultura para reter água (humidade da cultura) ou em fases críticas da cultura quando o stress hídrico devido a altas temperaturas ou períodos sem irrigação deve ser minimizado.

$$\mathbf{NDWI} = \frac{\text{GREEN} - \text{NIR}}{\text{GREEN} + \text{NIR}}$$

### **GCI (Green Chlorophyll Vegetation Index)**

O GCI é utilizado para estimar o conteúdo de clorofila foliar em várias espécies de plantas. O teor de clorofila reflete o estado fisiológico da vegetação; diminui nas plantas em stress e pode, portanto, ser utilizado como medida da saúde da vegetação. Este índice é também utilizado para monitorizar o impacto da sazonalidade, stress ambiental, ou produtos de proteção de culturas aplicado na saúde da vegetação.

### **Conselhos de utilização**

Os índices que incorporam informação da clorofila têm mais sentido ser utilizados nos momentos em que a cultura contém maior teor de clorofila (a maior parte do desenvolvimento vegetativo). Este índice indica particularmente os pontos da parcela com concentrações altas ou baixas, sendo um bom indicador quando a cultura cobre o solo tanto quanto possível.

$$\text{GCI} = \frac{\text{NIR}}{\text{GREEN}} - 1$$

### **SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)**

O Índice de Vegetação Ajustada ao Solo é utilizado para mitigar o impacto da claridade do solo. Um fator L de ajustamento do solo foi adicionado à equação NDVI para corrigir os efeitos do ruído do solo (cor, humidade, variabilidade do solo entre regiões, etc.), que muitas vezes afetam os resultados. O SAVI é utilizado para análise de culturas jovens; para regiões áridas com vegetação escassa (menos de 15% da área total) e superfícies de solo expostas.

### **Conselhos de utilização**

A utilização deste índice é recomendada para os momentos em que a cultura se estabelece, nas fases iniciais em que existe uma grande quantidade de solo visível já que este índice corrige o efeito da reflexão do solo sobre as medições da cultura.

$$\text{SAVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \times (1 + L)$$

### **OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)**

O Índice de Vegetação Otimizada Ajustada ao Solo é uma modificação do índice SAVI que usa também a refletância no NIR e no espectro vermelho. A diferença entre os dois índices é que o OSAVI tem em conta o valor padrão do fator de ajuste de fundo da copa (0,16). O OSAVI é utilizado para monitorizar áreas com vegetação de baixa densidade onde é possível visualizar o solo através da copa das árvores.

### **Conselhos de utilização**

De forma semelhante ao índice SAVI, a utilização deste índice é recomendada para os momentos em que a cultura se estabelece ou nas fases iniciais em que existe uma grande quantidade de solo visível corrigindo o efeito da reflexão do solo sobre as medições da cultura.

$$\text{OSAVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED} + 0,16}$$

### **LAI (Leaf area index)**

O Índice de Vegetação de Área Foliar foi concebido para analisar a superfície da folhagem, estima a quantidade de folhas numa região específica contribuindo com informações úteis para o estudo da dinâmica da vegetação. O LAI é uma medida sem unidades que é calculada como o rácio da área de folhagem de um lado (iluminada) para a superfície do solo que pode cobrir. Este índice de vegetação é importante para monitorizar a saúde das culturas e das florestas, o ambiente e as condições climáticas. O LAI é escalável a uma planta individual, cultura(s) no campo, ou a toda a região.

### **Conselhos de utilização**

Este índice pode ser utilizado em qualquer altura do ano, uma vez que se trata de uma variável primária intrínseca do dossel que não deve depender das condições de observação. As condições de luz incidente são fundamentais para determinar o LAI, por isso é necessário garantir que não existem nuvens ou quaisquer outros fatores que afetem a luminosidade.

### **IPVI (Infrared percentage vegetation index)**

O Índice de Percentagem de Vegetação Infravermelha (IPVI) é funcionalmente o mesmo que o NDVI, mas computacionalmente mais rápido devido à eliminação da banda vermelha no numerador. Os valores variam de 0 a 1.

### **Conselhos de utilização**

O índice IPVI pode ser utilizado em qualquer altura do desenvolvimento da cultura, complementar a outros índices conhecidos, tais como NDVI ou GNDVI, uma vez que o seu cálculo e interpretação segue os mesmos parâmetros.

$$\mathbf{IPVI} = \frac{\mathbf{NIR}}{\mathbf{NIR} + \mathbf{RED}} = \frac{1}{2} (\mathbf{NDVI} + 1)$$

### **NIR (Near Infrared)**

O infravermelho próximo é uma banda e não um índice cuja reflexão, a partir das culturas, ajuda a detetar problemas. Na análise do NIR, quanto mais brilhante (vermelho brilhante na escala) for um objeto, melhor é o seu estado vegetativo. Valores mais escuros de vermelho, e mesmo valores pintados na escala azulada indicam piores condições de cultivo ou diretamente áreas de solo descoberto.

### **Conselhos de utilização**

A camada NIR pode ser utilizada em qualquer altura para determinar o grau de reflexão no espetro infravermelho.

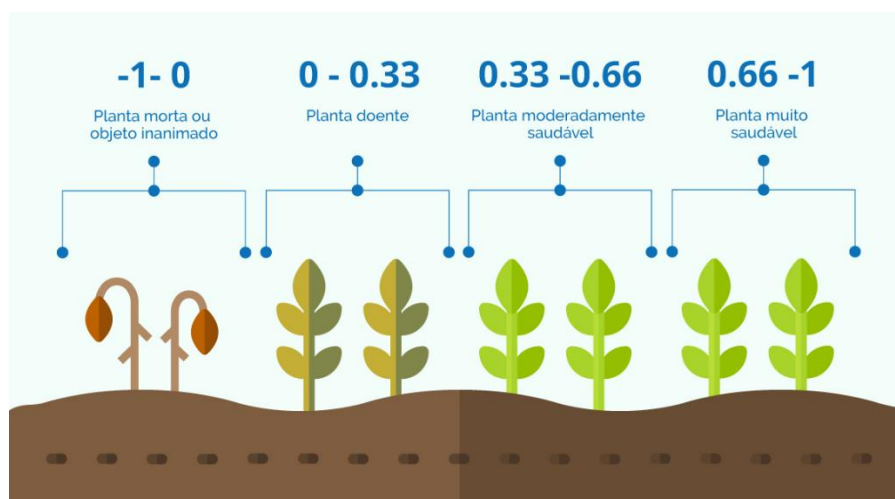
## 2.3 Índices de Vegetação

Os diferentes objetos presentes na superfície da terra absorvem e refletem de modo diferente a radiação que incide sobre eles. A identificação destas diferenças, pode ser traduzida em valores numéricos designados por índices de vegetação, que permitem distinguir possíveis problemas e atuar atempadamente ao longo do ciclo cultural. Estes índices resultam de operações matemáticas entre duas ou mais bandas do espetro eletromagnético e que resultam em comparações entre quantidades de luz absorvida e refletida.

O resultado dos algoritmos dos índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE, avaliados neste estudo, são expressos no intervalo de valores compreendido entre -1 e 1. Valores compreendidos entre -1 e 0 indicam que a planta está morta ou é um objeto inanimado. Valores compreendidos entre 0 e 1 assinalam o vigor vegetativo das plantas em que valores mais próximos de 1 correspondem a um maior vigor vegetativo (**Figura 9**). Assim, os índices de vegetação permitem delinear e monitorizar a distribuição espacial da vegetação e do solo com base nos padrões de refletância da vegetação verde.

**Figura 9**

*Vigor da planta através da interpretação dos valores de NDVI.*



*Nota.* Retirado de Cherlinka (2019).

### 2.3.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

O NDVI é um indicador utilizado para analisar o estado da vegetação e que se baseia na forma como a mesma reflete alguns comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

Segundo Rouse et al. (1973), Rouse et al. (1974) e Tucker (1979) o NDVI é calculado considerando a alta refletância no infravermelho próximo (NIR) e a baixa refletância no vermelho (RED), como pode ser visualizado na equação seguinte:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{RED})}{(\text{NIR} + \text{RED})}$$

Utilizando as bandas disponibilizadas pelo satélite Sentinel-2, na equação anterior, a banda NIR corresponde à banda 8 e a banda RED à banda 4.

A diferença dos resultados obtidos na equação anterior é resultante essencialmente da quantidade de biomassa, do vigor da vegetação, da presença de água e da presença de pigmentos foliares com especial destaque para a clorofila, ou seja, a intensidade de coloração verde e a área foliar estão diretamente associadas ao valor do NDVI.

O NDVI não mede diretamente a produtividade da cultura, mas permite uma boa diferenciação da cobertura do solo e do estado da vegetação, auxiliando na tomada de decisão sendo um dos índices de vegetação mais comuns e utilizados para caracterizar o estado vegetativo das plantas (Braga, 2009; Costa et al., 2020).

Segundo Panek & Gozdowski (2020), num estudo sobre a relação entre o NDVI e a produtividade de cereais na Europa Central, indicam que existe uma forte correlação entre estas duas variáveis durante os meses de março a maio o que possibilita uma previsão da produtividade cerca de 3 a 4 meses antes da colheita e afirmam, também, que um aumento de 0,1 de NDVI naquele período pode resultar num aumento de produtividade de 1,1t/ha a 2,6t/ha para aquelas regiões.

O NDVI é um índice que normalmente satura nos estádios mais avançados de desenvolvimento da cultura, ou seja, há uma grande cobertura do solo por parte da vegetação (Y. Gao et al., 2015; Jensen, 2009). Para além deste aspeto negativo (Jensen, 2009) realça a sensibilidade do NDVI a mudanças de luz absorvida e refletida.

### 2.3.2 Normalized Difference Moisture Index (NDMI)

Gao (1996) & McFEETERS (1996) desenvolveram o Normalized Difference Water Index (NDWI) derivado das bandas do infravermelho próximo (NIR) e verde (G). Os valores resultantes deste índice salientam a quantidade de água existentes nos corpos de água.

Uma alternativa a este método de cálculo é utilizar o NDMI, um índice de água da folha por diferença normalizada que tem como objetivo estudar mudanças na biomassa e avaliar o stress hídrico da vegetação. É calculado através da razão entre a refletância das bandas no infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR), que correspondem às bandas mais afetadas pelas mudanças no conteúdo de água da vegetação e estrutura da folha (SWIR) e pelo teor de matéria seca da folha (NIR). Como evidenciam Gao (1996), Sader et al. (2003), Wilson & Sader (2002) este índice é calculado pela equação:

$$\text{NDMI} = \frac{(\text{NIR} - \text{SWIR})}{(\text{NIR} + \text{SWIR})}$$

De acordo com as bandas disponibilizadas pelo Sentinel-2, a banda NIR corresponde à banda 8 e a SWIR à banda 11.

A combinação do NIR com o SWIR remove as variações induzidas pela estrutura interna da folha e pelo teor de matéria seca da folha, melhorando a precisão na recuperação do teor de água da vegetação (Alberto, 2022).

Um estudo realizado por Mimić et al. (2022) evidenciou-se que, devido à seca que ocorreu durante o verão de 2017, na Sérvia, as produções de milho e girassol foram muito afetadas. Como consequência foi desenvolvido um sistema de monitorização de níveis de humidade das culturas. Estas culturas são sensíveis à seca principalmente quando esta é acompanhada com temperaturas elevadas, com efeitos mais graves durante as fases de saídas das sedas, polinização e enchimento do grão. As perdas destas culturas podem chegar até 50% de produtividade. Em ambas as culturas, a fase reprodutiva ocorreu no mês de julho. O estudo demonstrou que, com base no NDMI médio do mês de julho, é possível criar um sistema de aviso prévio de seca.

### 2.3.3 Normalized Difference Red Edge (NDRE)

Segundo Gitelson & Merzlyak (1994), NDRE é um índice de medição de clorofila nas plantas. Este índice é muito semelhante ao NDVI, mas permite detetar diferenças na vegetação em estádios mais avançados do ciclo cultural (Grifo et al., 2022; Sharifi, 2020).

O NDRE é calculado através da razão entre a refletância das bandas no NIR e da banda vermelho limítrofe RedEdge, segundo a equação:

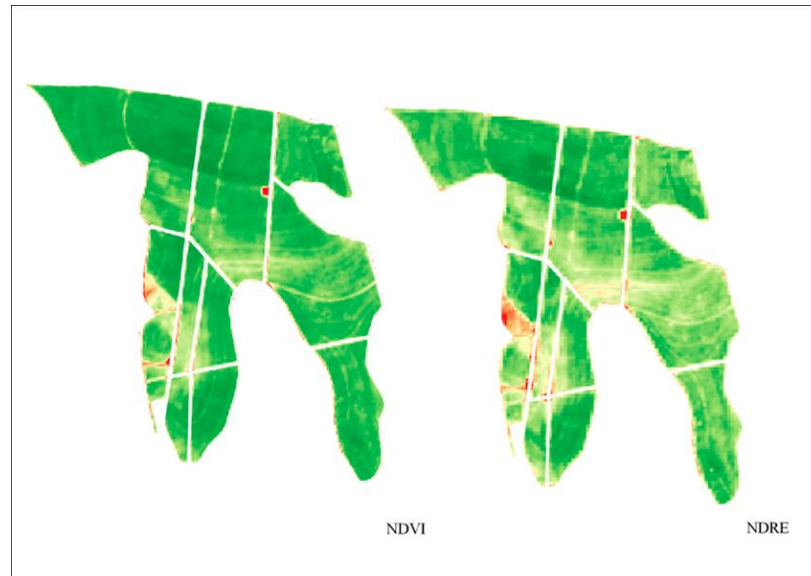
$$\text{NDRE} = \frac{(\text{NIR} - \text{RedEdge})}{(\text{NIR} + \text{RedEdge})}$$

Segundo as bandas disponibilizadas pelo Sentinel-2, a banda NIR corresponde à banda 8 e a RedEdge corresponderia à banda 5.

De acordo com Naguib & Daliman (2022), o NDVI calcula a percentagem de cobertura vegetal enquanto o NDRE calcula a concentração de clorofila presente na folha ou a concentração de azoto (**Figura 10**). O NDRE utiliza a luz vermelha limítrofe, que se localiza na transição entre vermelho e infravermelho próximo e que consegue penetrar nas folhas mais profundamente. Consequentemente, este índice demonstra melhores resultados numa fase mais tardia da cultura (onde está presente uma maior concentração de clorofila e biomassa) que o NDVI que tende a saturar nas fases mais avançadas do ciclo cultural. Os valores do NDRE podem variar de -1 a 1.

**Figura 10**

*Comparação entre carta de NDVI e NDRE.*



*Nota.* Retirado de Chbagro (2020).

Zhang et al., (2019) mostrou que, modelos de previsão de produção para a cultura de arroz, baseados em NDRE apresentam uma maior precisão do que baseados em NDVI durante a fase reprodutiva. Os autores recomendam o uso de modelos de produtividade baseados em NDVI para fases mais iniciais de desenvolvimento da cultura e NDRE para as mais tardias.

Segundo Li et al. (2014), índices baseados na luz vermelha limítrofe, como o NDRE, comparativamente ao NDVI são os melhores para estimar a concentração e absorção de azoto das plantas de milho durante as fases V6 (sexta folha) até V12 (décima segunda folha) permitindo ao agricultor uma melhor gestão da adubação azotada.

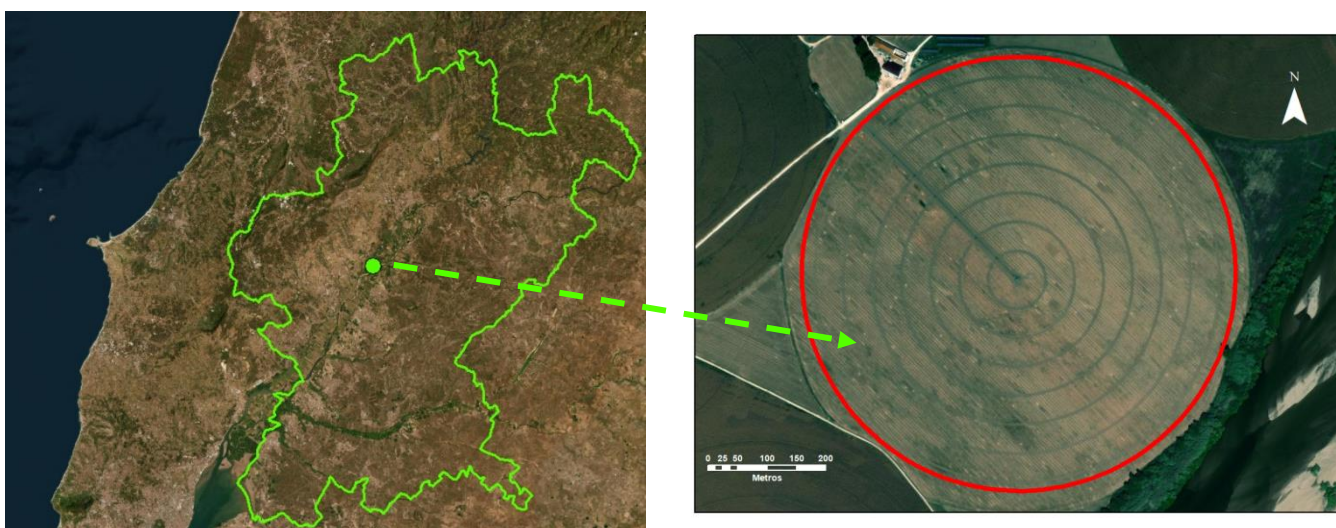
### 3. Material e métodos

#### 3.1 Localização

O estudo foi realizado numa parcela agrícola designada por Pivot Grande, com cerca de 43 hectares, pertencente à Sociedade Agro-Florestal CampoDobrado, localizada na freguesia de Vale Figueira (39,309620°, -8,585591°), concelho de Santarém (**Figura 11**).

#### Figura 11

*Localização da parcela em estudo (Pivot Grande).*



#### 3.2 Caracterização climática

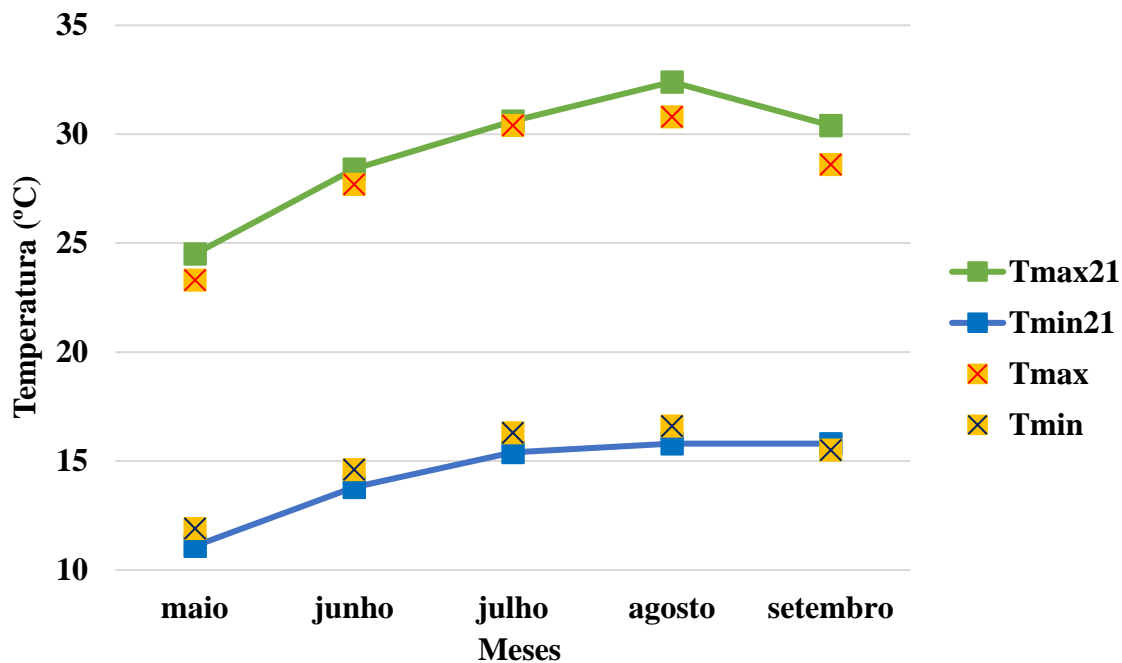
O clima de Portugal Continental, segundo a classificação de Köppen, divide-se em duas regiões: uma de clima temperado com inverno chuvoso e Verão seco e quente (Csa) e outra de clima temperado com inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente (Csb), sendo que no caso em estudo, localiza-se na região designada por Csa.

No gráfico da **Figura 12**, observam-se os valores médios mensais da temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) normais (1981-2010) e os valores da temperatura, máxima (Tmax21) e mínima (Tmin21), para os meses de maio a julho de 2021.

Verifica-se que os valores de temperatura máxima de 2021 para os meses de maio, junho e julho foram semelhantes aos valores de temperatura máxima normal e que os meses de agosto e setembro foram superiores à normal. Os valores de temperatura mínima em 2021, durante os 5 meses, seus valores os foram semelhantes aos das normais climatológicas dos últimos 30 anos.

**Figura 12**

*Evolução dos valores médios mensais da temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) normais e dos valores para os meses de maio a setembro de 2021.*



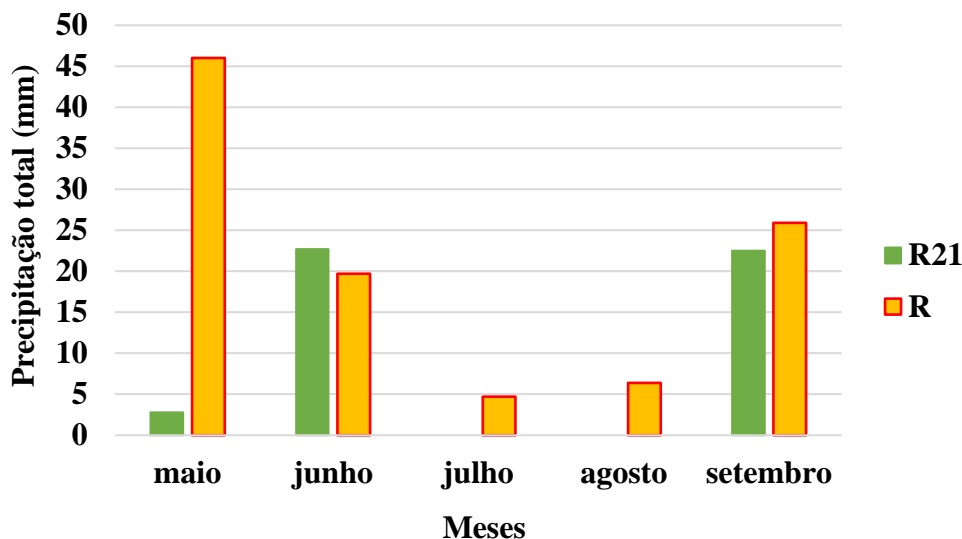
*Nota.* Adaptado de Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA) (2023)

No gráfico da **Figura 13** apresenta-se a evolução comparativa dos valores mensais de 2021 (R21) para os meses de maio a setembro com os valores normais de precipitação total (R) (1981-2010).

Pela observação do gráfico verifica-se que, no geral, para os meses descritos de 2021, a precipitação foi inferior relativamente aos valores normais de precipitação, com a exceção dos meses de junho e setembro de 2021 que foram semelhantes à normal.

**Figura 13**

*Evolução comparativa dos valores mensais de 2021 (R21) para os meses de maio a setembro com os valores normais de precipitação total (R) (1981-2010).*



*Nota.* Adaptado de IPMA (2023)

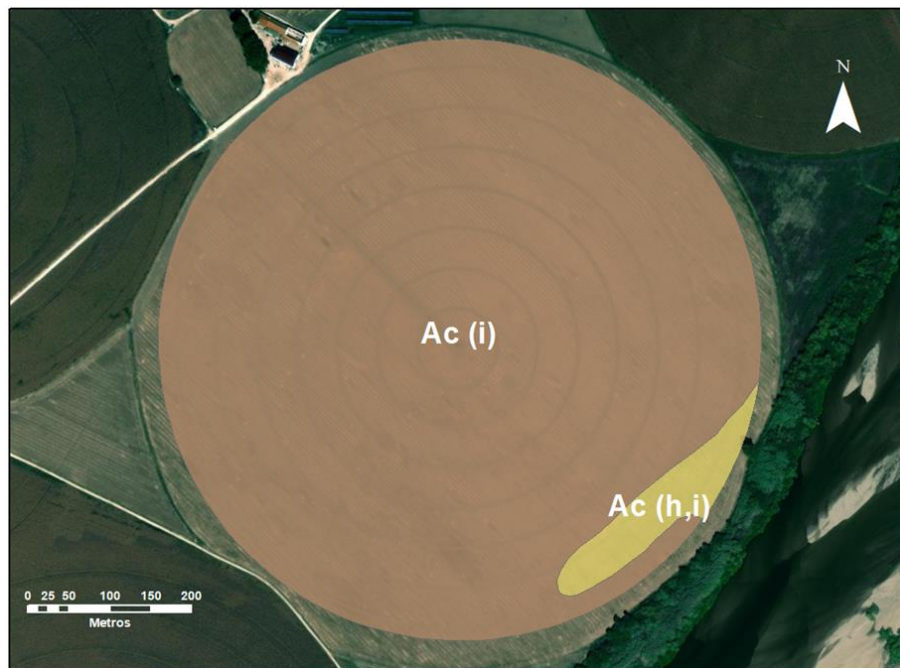
### 3.3 Caracterização do solo

Os solos da parcela em estudo estão classificados como fluviossolos éutricos de acordo com a classificação FAO/Unesco. Segundo (Cardoso, 1965), estes solos são aluviossolos modernos, ou seja, são solos incipientes, não hidromórficos constituídos por depósitos estratificados de aluviões que recebem, em geral, de tempos a tempos, adições de sedimentos aluvionais. Desta forma não apresentam horizontes diferenciados relativamente ao material originário. Por vezes possuem uma certa acumulação de matéria orgânica à superfície que rapidamente sofre mineralização devido ao bom arejamento do solo, fazendo com que esta acumulação nunca seja muito grande. Em termos de características estes solos são muito diversos: as texturas podem ser arenosas e argilosas, o pH varia de ácido a básico, com toalha freática a profundidade variável e com fertilidade muito variável. Contudo são considerados dos solos mais férteis do País.

Como se observa na **Figura 14**, os solos desta parcela estão classificados como Ac – Aluviossolos Modernos, Calcários, (Para – Solos Calcários), de textura mediana em que se demarcam 96% da parcela com inundável (i) e 4% com mal drenada e fase inundável (h,i).

**Figura 14**

*Classificação dos solos da parcela em estudo.*



*Nota.* Classificação segundo Cardoso, 1965: Ac – Aluviossolos Modernos, Calcários, (Para – Solos Calcários), de textura mediana; (i) fase inundável; (h) fase mal drenada.

### **3.4 Processamento das imagens NDVI, NDMI e NDRE a partir do Sentinel-2**

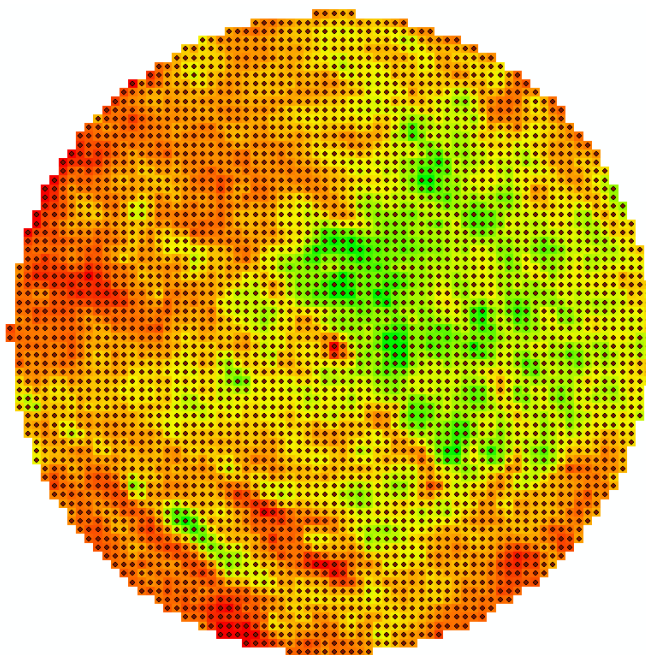
De modo a obter as imagens NDVI, NDMI e NDRE das parcelas em estudo, recorreu-se à plataforma *Copernicus Data Space Ecosystem*, onde foram descarregadas as bandas multiespectrais desde o dia 4 de maio de 2021 até 26 de setembro de 2021, do fuso 29 (imagem de 100km x 100km) onde se encontra a parcela em estudo. Em seguida, recorrendo ao software ArcGis 10,8, ferramenta *Composite bands*, obtiveram-se as imagens em cor verdadeira (**Anexo 1**), para a verificação da presença ou não de nuvens na parcela em estudo. Após esta análise, verificou-se que de 30 imagens descarregadas, apenas 20 se encontram sem nuvens.

Para o cálculo dos respetivos índices, foi utilizada a ferramenta *Raster Calculator* utilizando as fórmulas anteriormente mencionadas, obtendo-se uma imagem matricial de 100km x 100km. De forma a delimitar a imagem à parcela em estudo, recorreu-se ao *Extract by Mask*, obtendo-se uma imagem da parcela com pixéis de 10m x 10m. De referir que para todos os processos foi utilizado o polígono da parcela de forma a manter a uniformidade.

A extração da informação de cada píxel da parcela, foi realizada pela conversão, através da ferramenta *Raster to Point*, dos dados matriciais para dados vetoriais (**Figura 15**), ou seja, em cada píxel foi extraído um ponto que contém o valor do índice em estudo. Os dados extraídos foram analisados em Excel contribuindo para a análise da variabilidade espacial e temporal dos índices em estudo.

### **Figura 15**

*Imagem matricial NDVI (09/05/2021) sobreposta com os pontos vetoriais.*



### **3.5 Plataforma Granular Link**

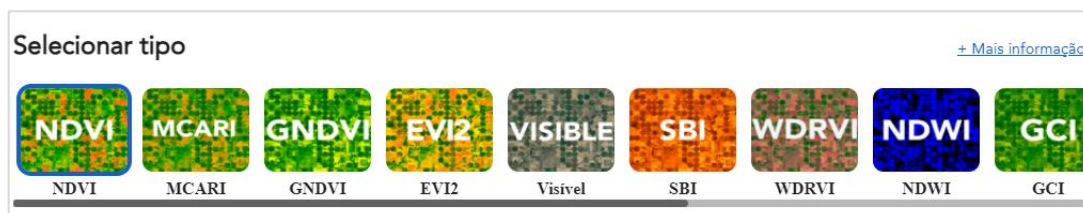
Através do acesso e registo na plataforma Granular Link (<http://link.granular.ag>), gentilmente autorizado pela CORTEVA Agriscience, foi necessário a criação de uma exploração agrícola, à qual foi atribuído o nome de Campo Dobrado, para proceder à delimitação da parcela em estudo. Para esta delimitação existem duas formas de o fazer, desenhar manualmente a parcela ou inserir um ficheiro em formato shapefile, kmz ou kml. Para a inscrição da parcela, foi necessário preencher alguns campos, como por exemplo nome da parcela, cultura instalada, tipo de rega e localização.

De seguida, através de *screenshots*, foram retiradas, de acordo com os índices disponibilizados (**Figura 16**), as imagens da cor verdadeira (*Visible*) e NDVI da parcela em estudo usando o plano de utilização Avançado e *Premium* da aplicação. Do plano Avançado

foram retiradas 30 imagens de cor verdadeira (**Anexo 2**) de onde resultaram 19 imagens sem obstruções, ou seja, 19 imagens NDVI. Do plano *Premium*, de 126 imagens de cor verdadeira (**Anexo 3**) originaram 80 imagens sem nuvens.

**Figura 16**

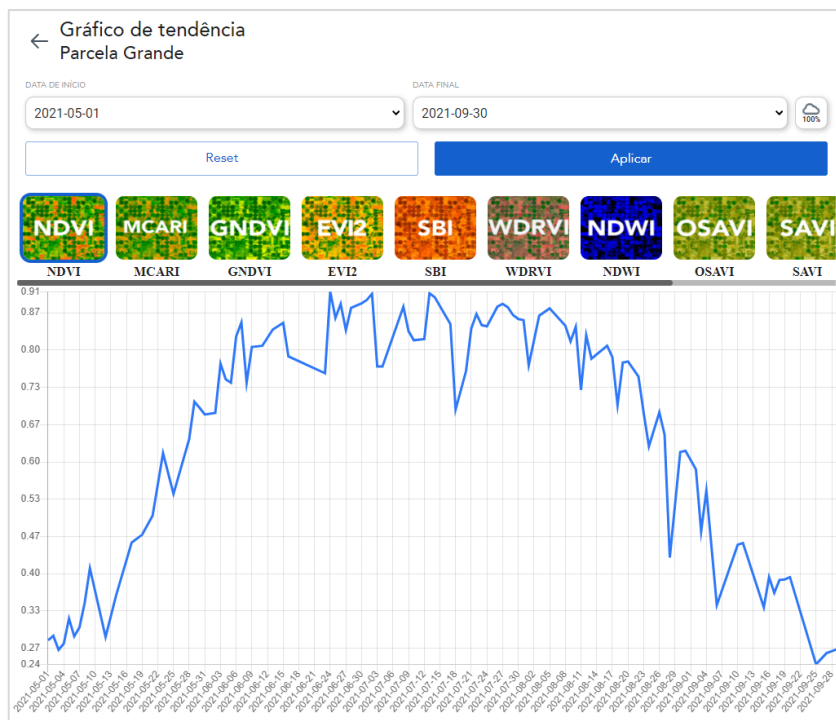
*Índices disponibilizados pela aplicação Granular Link.*



Para a observação da evolução do índice NDVI ao longo do ciclo cultural, a aplicação disponibiliza um gráfico de tendência. Conforme se pode observar na **Figura 17** foi delimitado o período de 1 de maio a 30 de setembro de 2021 para conseguir uma melhor observação desta evolução.

**Figura 17**

*Gráfico de tendência disponibilizado pela aplicação Granular Link.*



### 3.6 Dados de Produção

Os dados da produção de milho foram disponibilizados pela Sociedade Agro-Florestal Campodobrado.

Foi considerada a produção do ano de 2021, correspondente ao híbrido P0937 (FAO 500), semeado em 1 de abril de 2021 com uma densidade de 85790 plantas/ha.

Os dados foram recolhidos por uma ceifeira debulhadora com largura de corte de 4,5 m, que dispõe de um sistema de monitorização de produtividade (t/ha). Este sistema dispõe ainda de sensores capazes de medir a humidade do grão e a velocidade de trabalho da ceifeira.

Os dados extraídos foram analisados em Excel e sujeitos a um processo de filtragem para remoção de erros segundo Blackmore (1999), Menegatti & Molin (2003) e Simbahan et al. (2004). Foram eliminados os dados que:

- se encontravam fora dos limites da parcela;
- obtidos com uma velocidade da ceifeira de deslocamento inferior a 1.6 km/h e superior a 10 km/h;
- registaram produtividade com valor zero;
- registaram produtividade fora dos limites aceitáveis para a variedade em causa e local de produtividade do milho;
- o fluxo de grão no sensor de massa é inferior ou superior aos valores estabelecidos pelo fabricante.

No software ArcGis foi obtido o mapa de produtividade em formato matricial. À semelhança de todos os mapas construídos neste estudo, o mapa de produtividade foi recortado (ferramentas *Clip* e *Extract by Mask*) pelo limite da parcela.

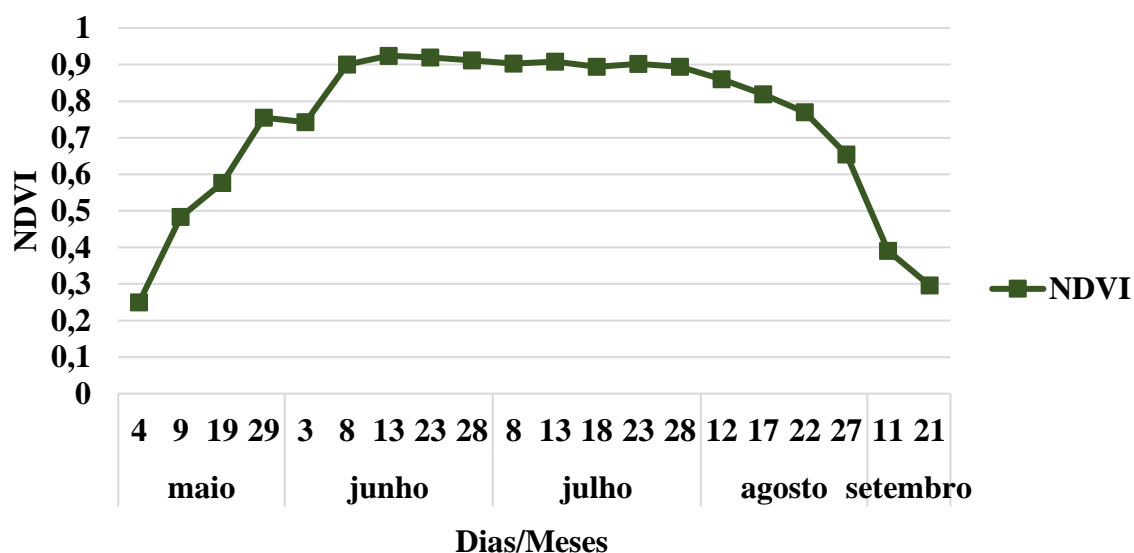
## 4. Resultados

### 4.1 NDVI

De acordo com a evolução dos valores de NDVI (**Figura 18**) obtidos ao longo do ciclo cultural é possível descrever 2 fases de desenvolvimento. Uma primeira fase de desenvolvimento vegetativo, desde a emergência da planta até ao lançamento da bandeira, entre os dias 4 de maio e 13 de junho, é caracterizada por um aumento gradual do NDVI, com valores médios entre 0,25 e 0,92. Este incremento, resulta de um gradual aumento da cobertura do solo devido ao aumento de biomassa até atingir o ponto em que a planta começa a direcionar energia para a produção do grão. De notar, que no dia 3 de junho, houve uma ligeira diminuição do valor de NDVI possivelmente devido à presença de nebulosidade na zona. A segunda fase é a fase reprodutiva, desde a saída das sedas até à colheita, entre os dias 13 de junho e 27 de agosto, descrita pela estabilização do NDVI em valores próximos do máximo, mas com uma tendência de diminuição devido ao começo da floração e por conseguinte a formação do grão até atingir a sua maturação fisiológica.

**Figura 18**

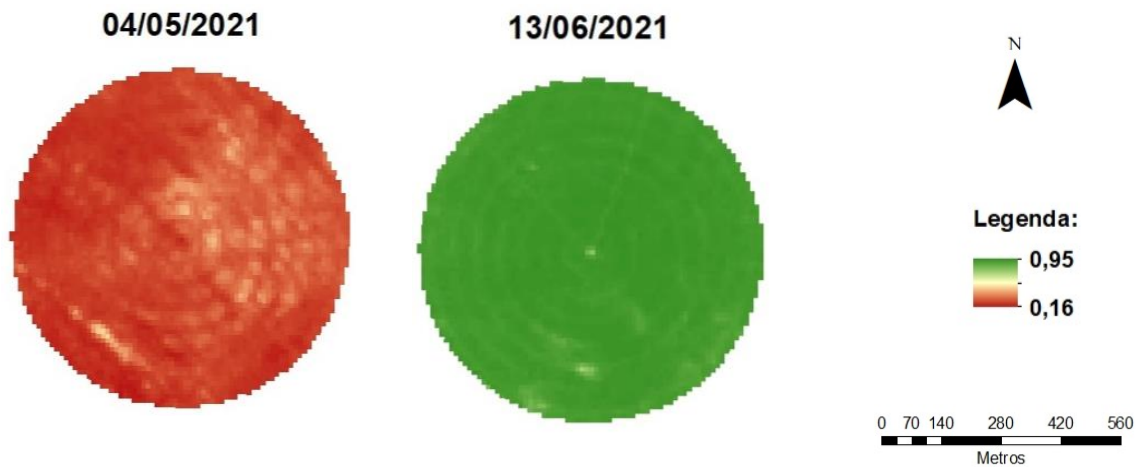
*Evolução dos valores de NDVI médio durante o ciclo cultural, segundo as imagens processadas do Sentinel-2.*



No **Anexo 4** pode ser observada a evolução do NDVI ao longo do ciclo cultural, obtida pelo processamento das imagens do Sentinel-2. Registou-se um máximo de 0,95, no dia 13 de junho e um mínimo de 0,16, no dia 4 de maio que correspondem, respetivamente, ao dia em que se obteve a média mais alta e ao dia com média mais baixa de NDVI (**Figura 19**).

**Figura 19**

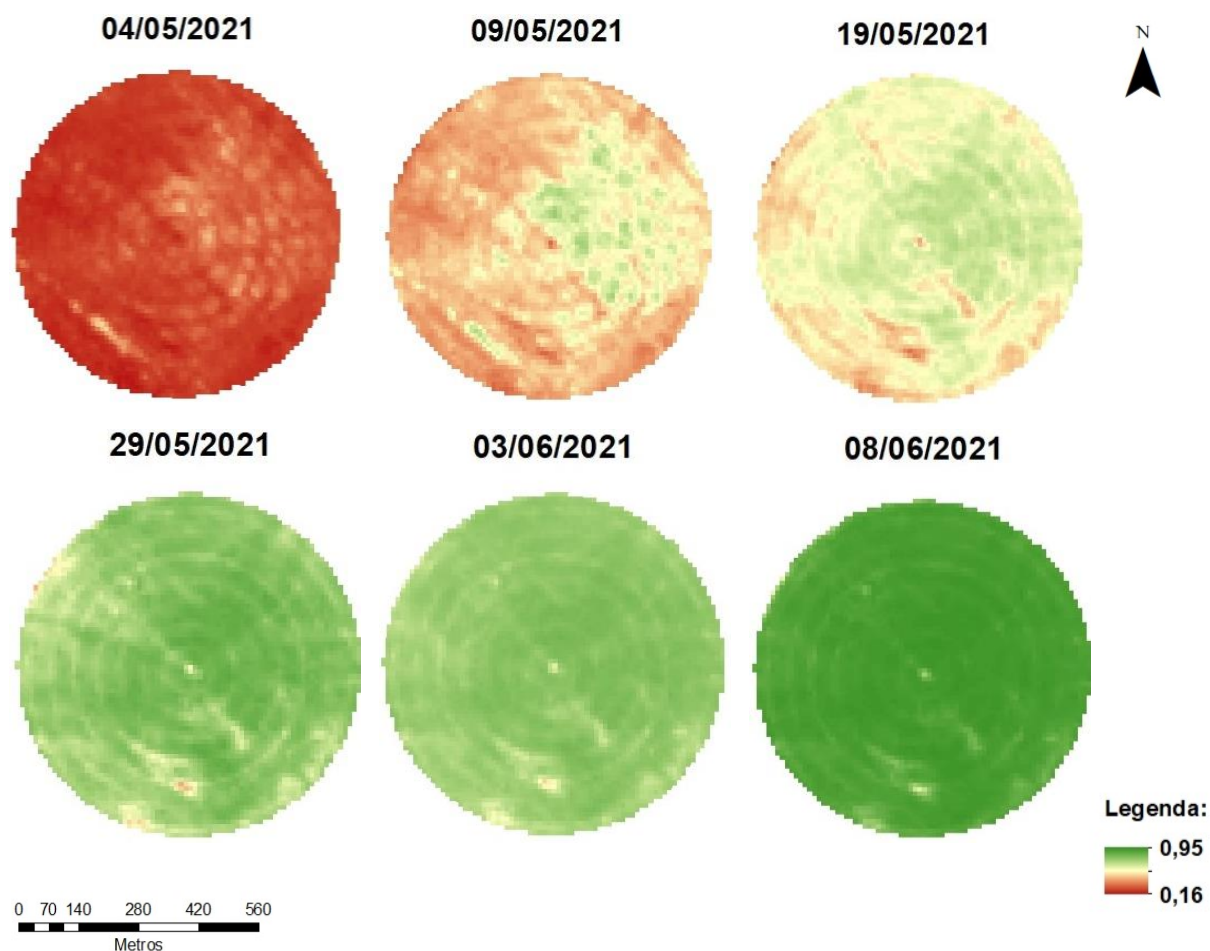
*NDVI: Registos mais baixo (esquerda) e mais alto (direita) durante o ciclo cultural.*



Após a sementeira e durante o mês de maio notou-se, na metade direita do pivot, um valor de NDVI mais elevado podendo ser explicado por um desenvolvimento mais rápido das plantas. No início do mês de junho, observou-se uma tendência para a uniformidade da parcela, distinguindo-se na parte inferior do pivot algumas manchas com valores mais baixos de NDVI (**Figura 20**).

**Figura 20**

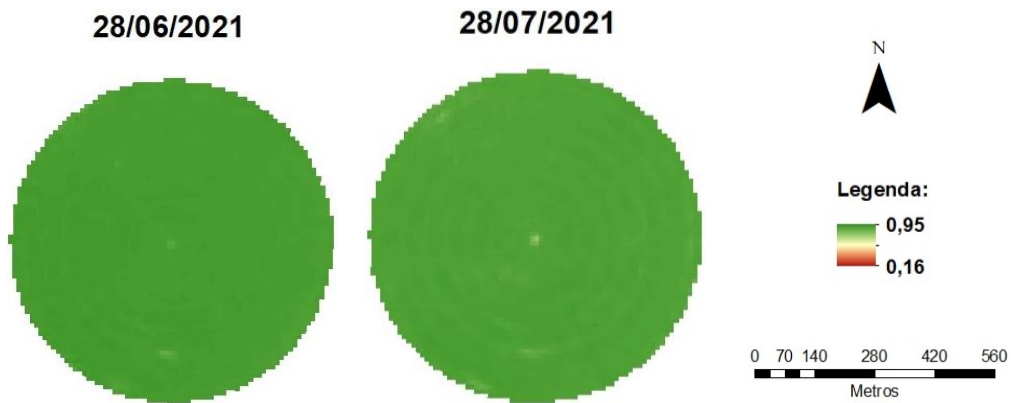
*NDVI: Evolução entre os dias 5 de maio e 6 de junho.*



Pela visualização das imagens durante os dias 28 de junho e 28 de julho não se encontra grandes diferenças apesar dos valores médios de NDVI apresentarem um ligeiro decréscimo (**Figura 21**).

**Figura 21**

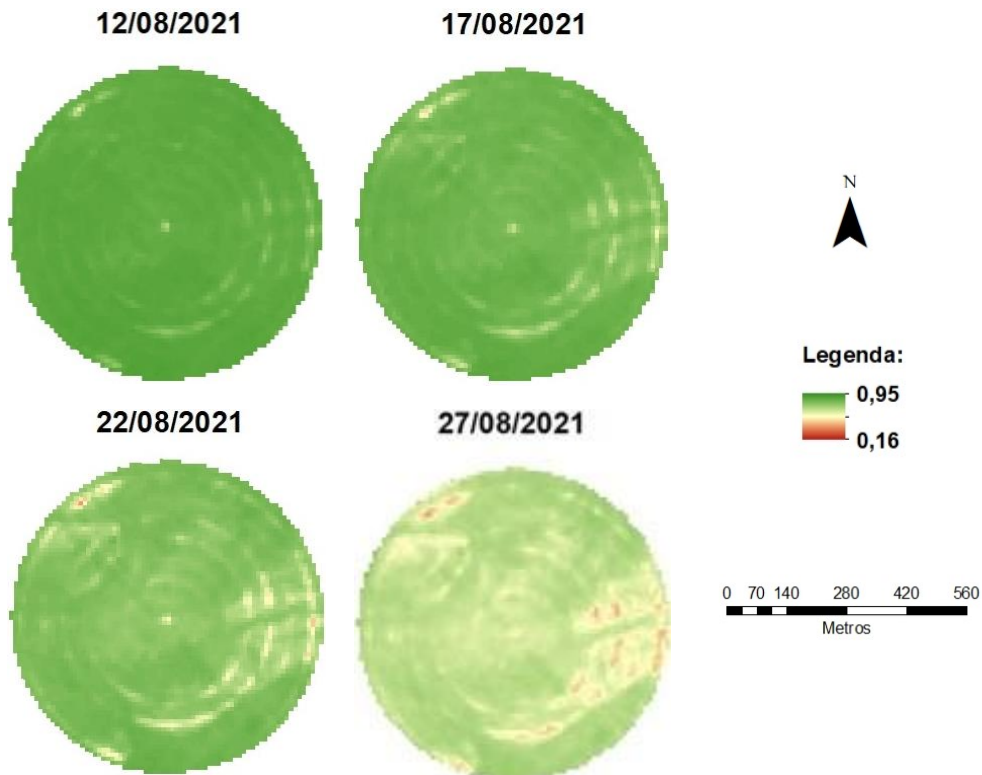
*NDVI: Evolução entre os dias 28 de junho e 28 de julho.*



A partir do dia 12 de agosto até à colheita, na parte inferior direita do pivot, notou-se uma diminuição mais acentuada de NDVI em relação às restantes partes, possivelmente devido a um adiantamento do ciclo cultural na fase inicial (**Figura 20; Figura 22**)

**Figura 22**

*NDVI: Evolução entre 12 de agosto até à colheita.*

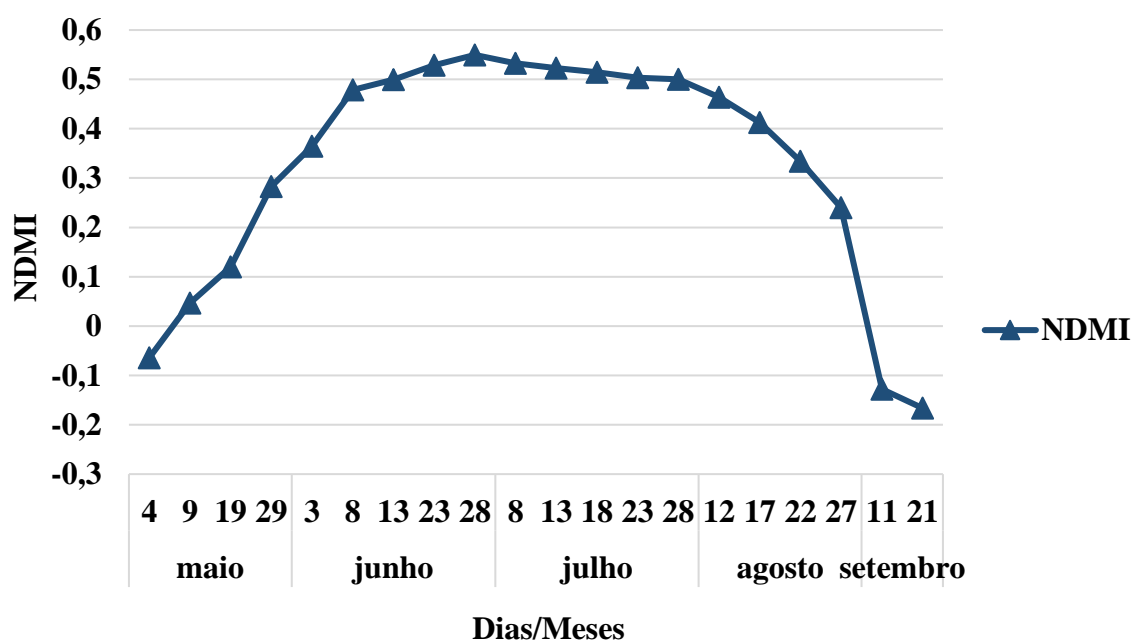


## 4.2 NDMI

A evolução do NDMI, gráfico da **Figura 23**, mostra um valor baixo na fase inicial devido à baixa densidade da vegetação. No entanto, ao longo do desenvolvimento vegetativo este valor foi aumentando gradualmente até 8 de junho. A partir deste dia notou-se um ligeiro aumento, atingindo o pico de 0,55 de NDMI médio, mas mantendo os valores perto 0,5 até 28 de julho. Estes valores podem ser explicados pela fase crítica de reprodução em que é necessário que as plantas não entrem em stress hídrico. Entre os dias 12 e 27 de agosto, verificou-se uma diminuição de NDMI, significando uma diminuição do conteúdo de água na vegetação, ou seja, atingiu-se o período de maturação fisiológica.

**Figura 23**

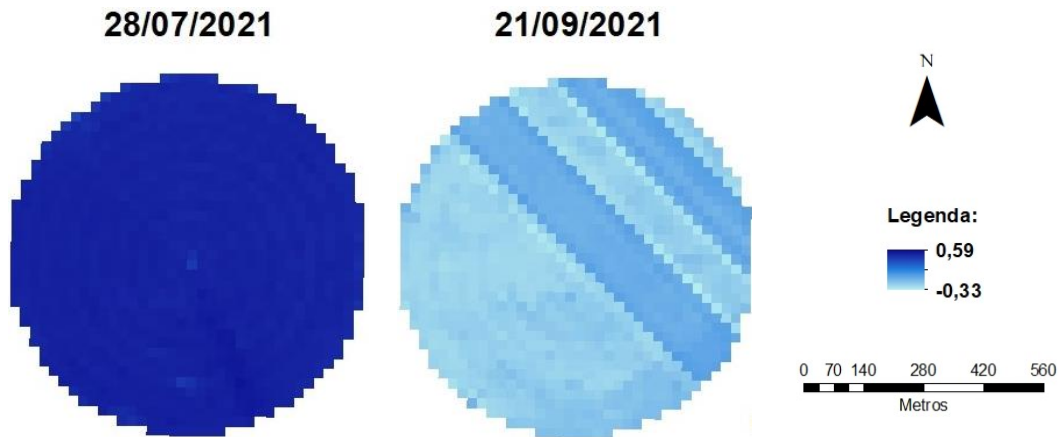
*Evolução dos valores de NDMI médio durante o ciclo cultural, segundo as imagens processadas do Sentinel-2.*



No **Anexo 4** pode ser observada a evolução do NDMI ao longo do ciclo cultural, obtida pelo processamento das imagens do Sentinel-2. Registou-se um valor mínimo de -0,33 e um máximo de 0,59 nos dia 21 de setembro e 28 de julho, respetivamente (**Figura 24**).

**Figura 24**

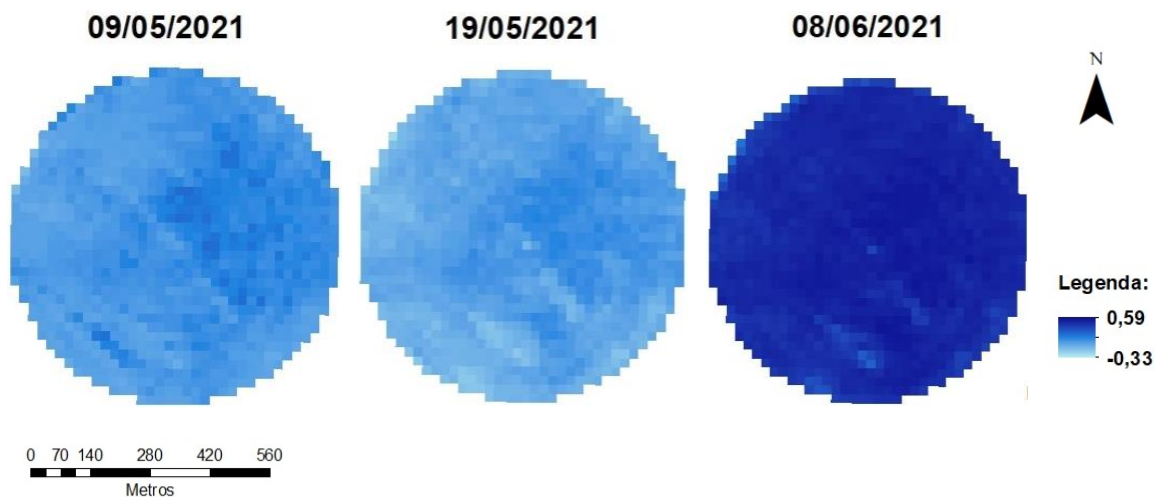
*NDMI: Registos mais alto (esquerda) e mais baixo (direita).*



Durante o mês de maio, a metade direita do pivot mostrou valores de NDMI mais elevados o que está de acordo com o observado para o NDVI. A partir de 3 de junho, notou-se uma uniformidade do conteúdo de água na vegetação com a exceção de algumas manchas na parte inferior do pivot onde o NDMI apresentou valores mais (Figura 25).

**Figura 25**

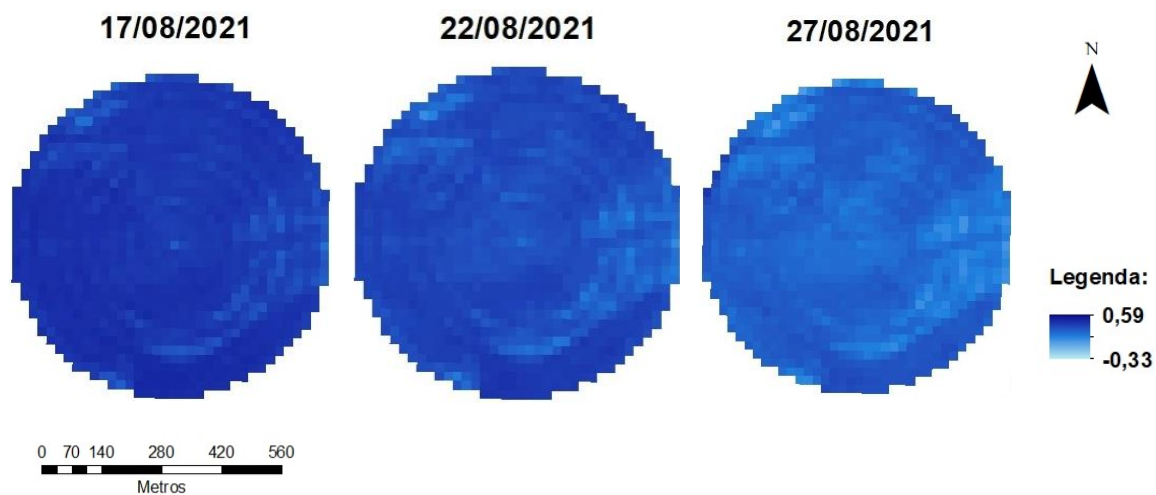
*NDMI: Evolução durante o mês de maio e uniformização a partir de 3 de junho.*



Após o dia 12 de agosto até à colheita, a parte inferior direita distinguiu-se das restantes com NDMI mais baixo (**Figura 25; Figura 26**).

**Figura 26**

*NDMI: imagens após dia 12 de agosto até colheita.*

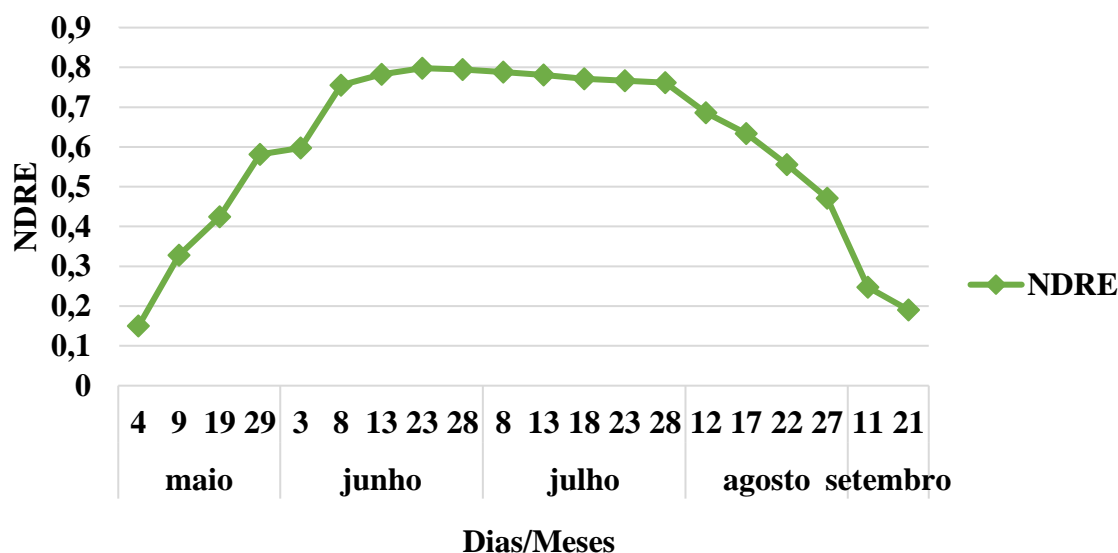


### 4.3 NDRE

De acordo com a evolução do NDRE médio (**Figura 27**) durante o ciclo cultural, o desenvolvimento vegetativo começou num aumento gradual do índice médio, passando por uma pequena estabilização entre 29 de maio e 8 de junho, chegando até a um NDRE médio máximo de 0,8 a 23 de junho. Entre 23 de junho e 8 de julho notou-se uma estabilização a 0,8 e a partir desse dia surgiu um ligeiro decréscimo nos valores de NDRE médio até 28 de agosto. Neste dia até à colheita, ocorreu uma diminuição acentuada de NDRE.

**Figura 27**

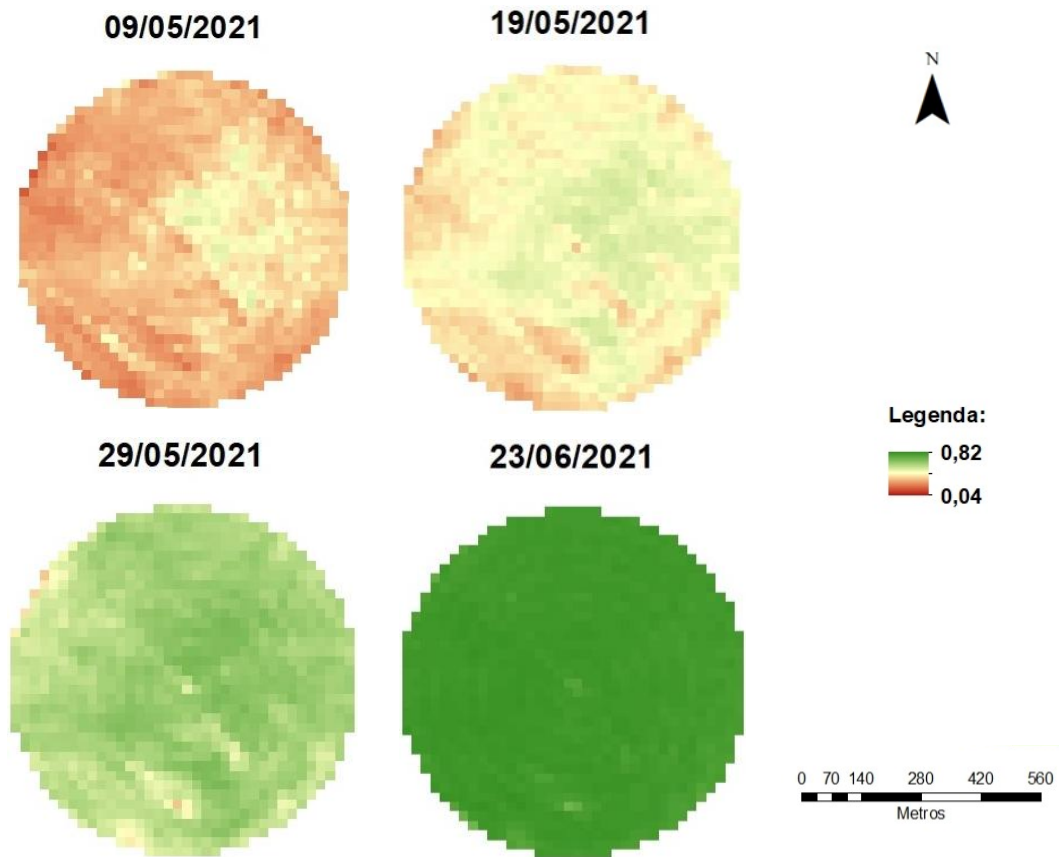
*Evolução dos valores de NDRE médio durante o ciclo cultural, segundo as imagens processadas do Sentinel-2.*



No **Anexo 4** pode ser observada a evolução do NDRE ao longo do ciclo cultural, obtida pelo processamento das imagens do Sentinel-2. Registrou-se um valor máximo de 0,82 e um valor mínimo de 0,04. À semelhança do NDVI e NDMI, durante o mês de maio, a metade direita do pivot destacou-se com valores de NDRE superiores atingindo em 23 de junho uma tendência para a uniformidade de valores, mas ainda com algumas manchas de valores baixo na parte inferior do pivot (**Figura 28**).

**Figura 28**

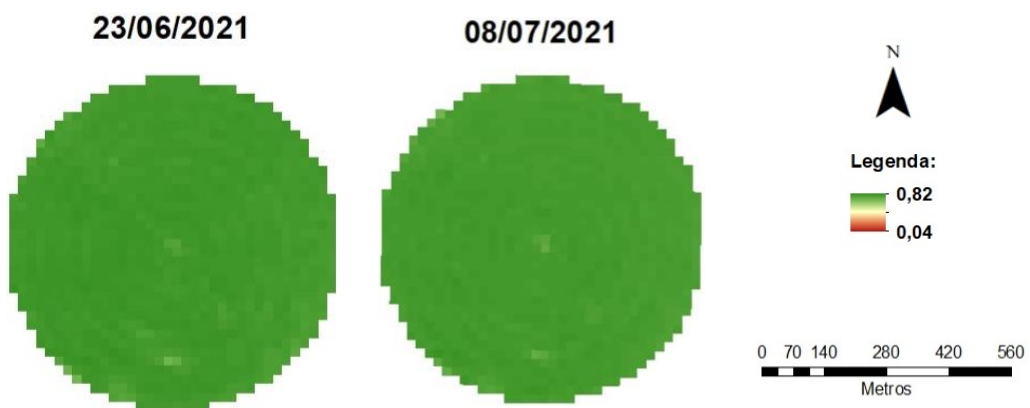
*NDRE: Evolução durante o mês de maio até 23 de junho.*



Entre 23 de junho e 8 de julho (**Figura 29**) não existiram grandes diferenças entre imagens.

**Figura 29**

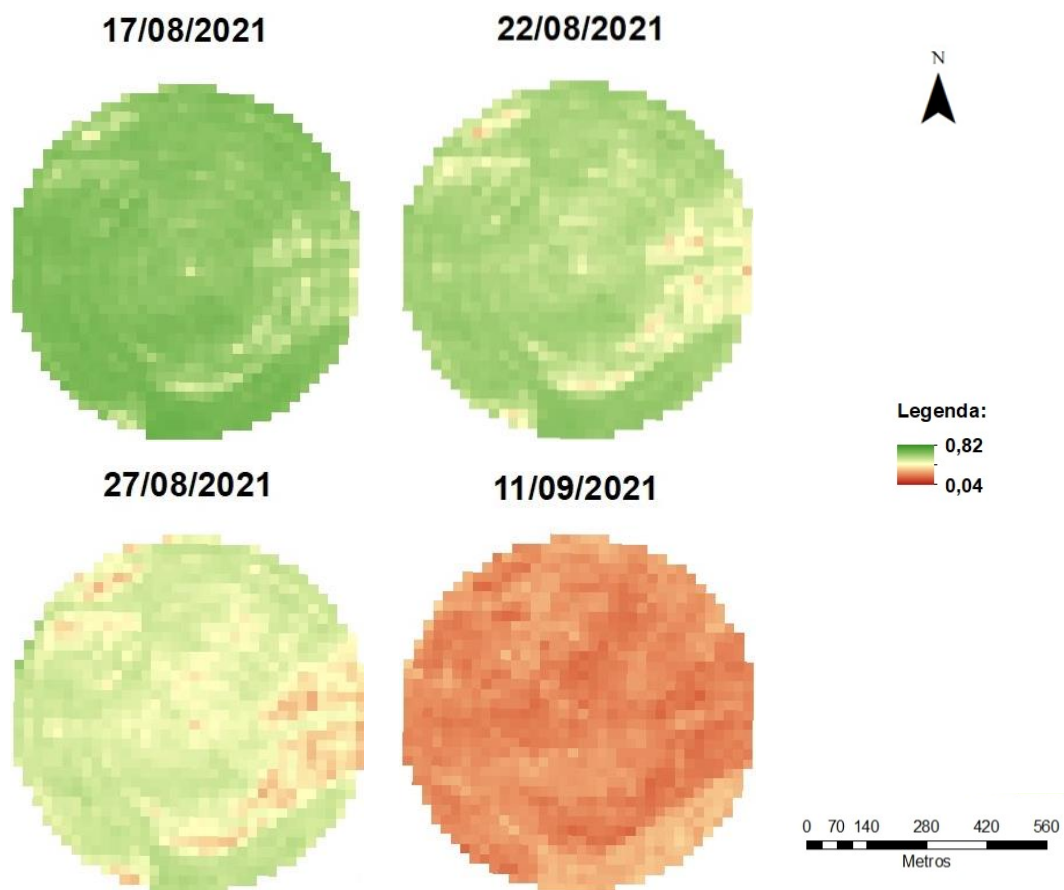
*NDRE: Evolução entre 23 de junho e 8 de julho.*



A partir deste dia até à colheita a cor verde começou a diminuir notando-se mais na parte inferior direita e em algumas umas manchas na parte superior esquerda do pivot caracterizadas pela diminuição de NDRE (**Figura 30**).

**Figura 30**

*NDRE: Evolução a partir de dia 17 de agosto.*



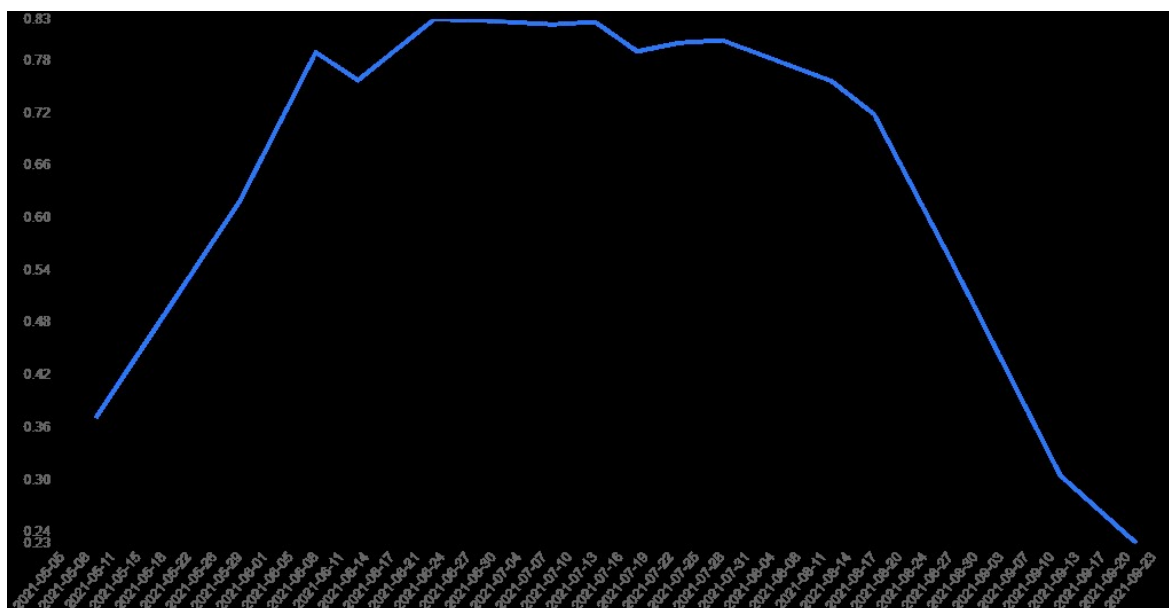
## 4.4 Granular Link

### 4.4.1 Plano Avançado – Sentinel+

De acordo com os valores obtidos de NDVI pelo plano Avançado (**Figura 31**) da aplicação Granular Link, os valores médios começaram por volta de 0,36 aumentando gradualmente até valores próximos de 0,78 (8 de junho), onde ocorreu um decréscimo até valores próximos de 0,75 (13 de junho). A partir desde dia, surgiu um aumento e uma estabilização a 0,83 de NDVI até 13 de julho onde houve uma diminuição até atingir valores de 0,78. Após esta diminuição, ocorreu um ligeiro aumento até 28 de julho e de seguida um decréscimo até à colheita.

### Figura 31

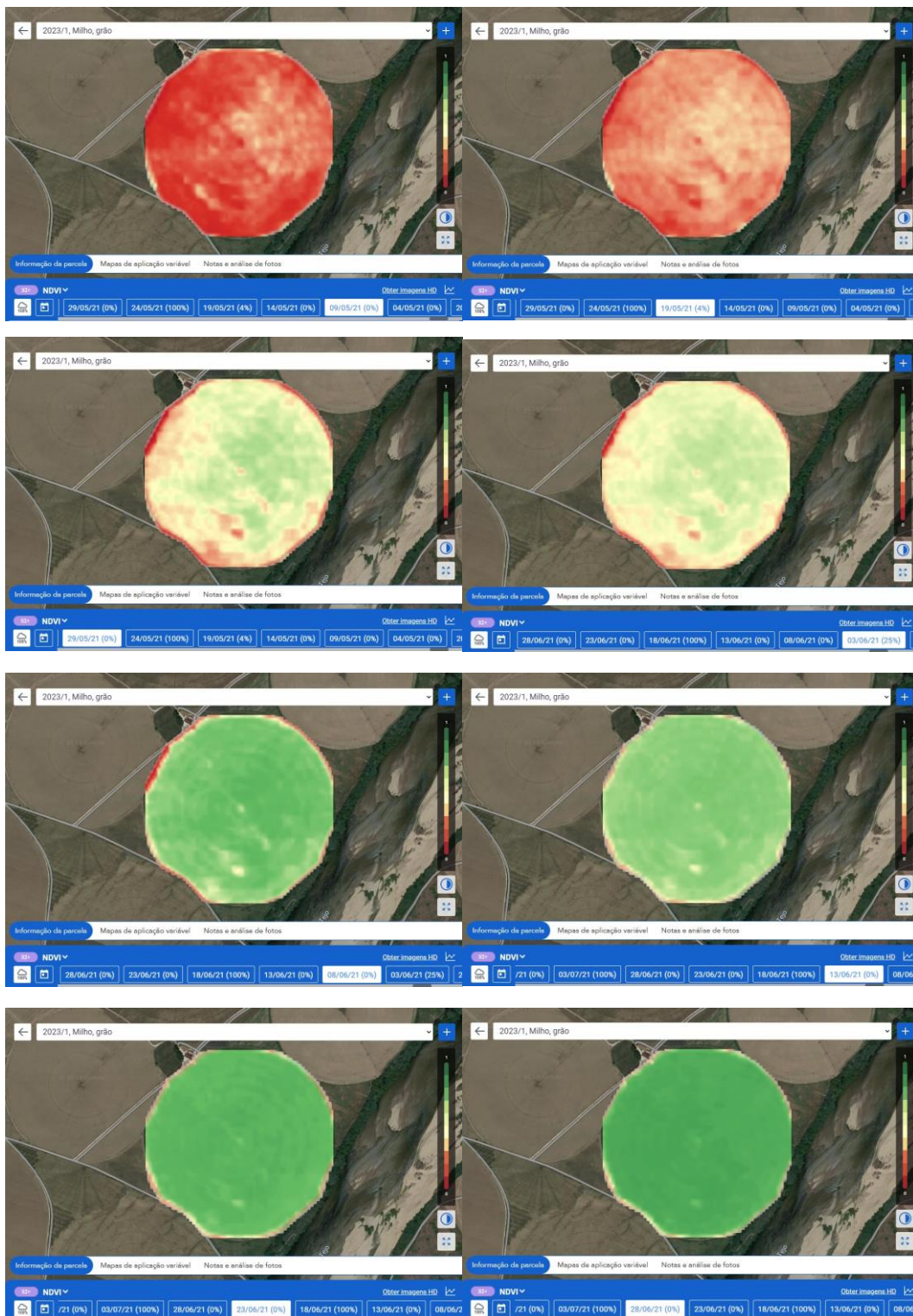
*Evolução dos valores de NDVI médio durante o ciclo cultural, segundo o plano Avançado da aplicação Granular Link.*



A seguir à sementeira, as imagens do plano Avançado (**Figura 32,33 e 34**) demonstraram um desenvolvimento inicial maior na parte direita do pivot até atingir uma certa uniformidade, mas com alguma manchas de menor desenvolvimento na parte inferior. Após atingir o pico de NDVI, notou-se, na imagem, uma cor verde mais clara na parte direita do pivot (18 de julho), indicando menor NDVI. A partir deste dia, a diferença entre a parte direita e esquerda do pivot, tornou-se mais evidente.

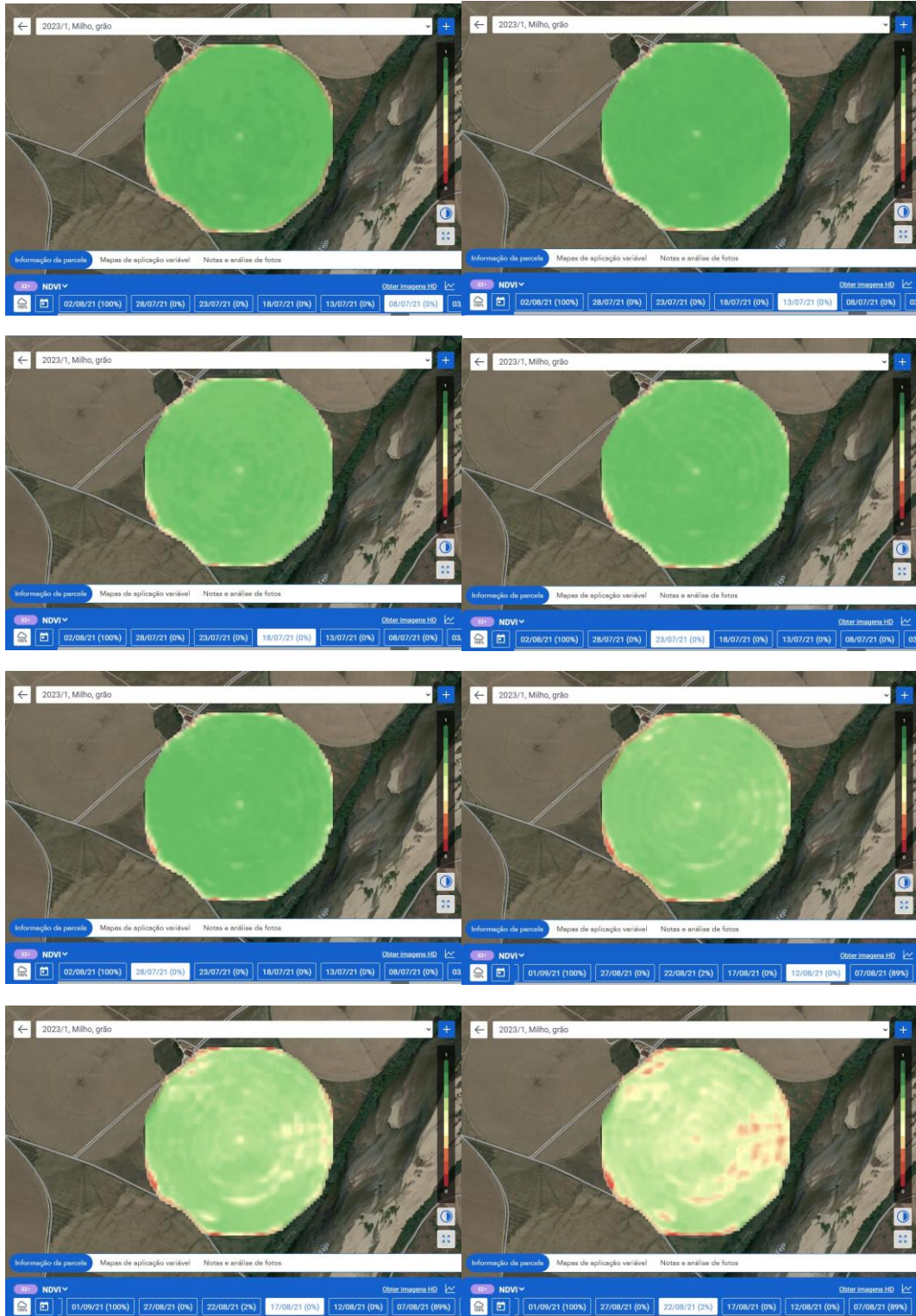
**Figura 32**

*NDVI segundo o plano Avançado do Granular Link ao longo do ciclo cultural (9 de maio – 28 de junho).*



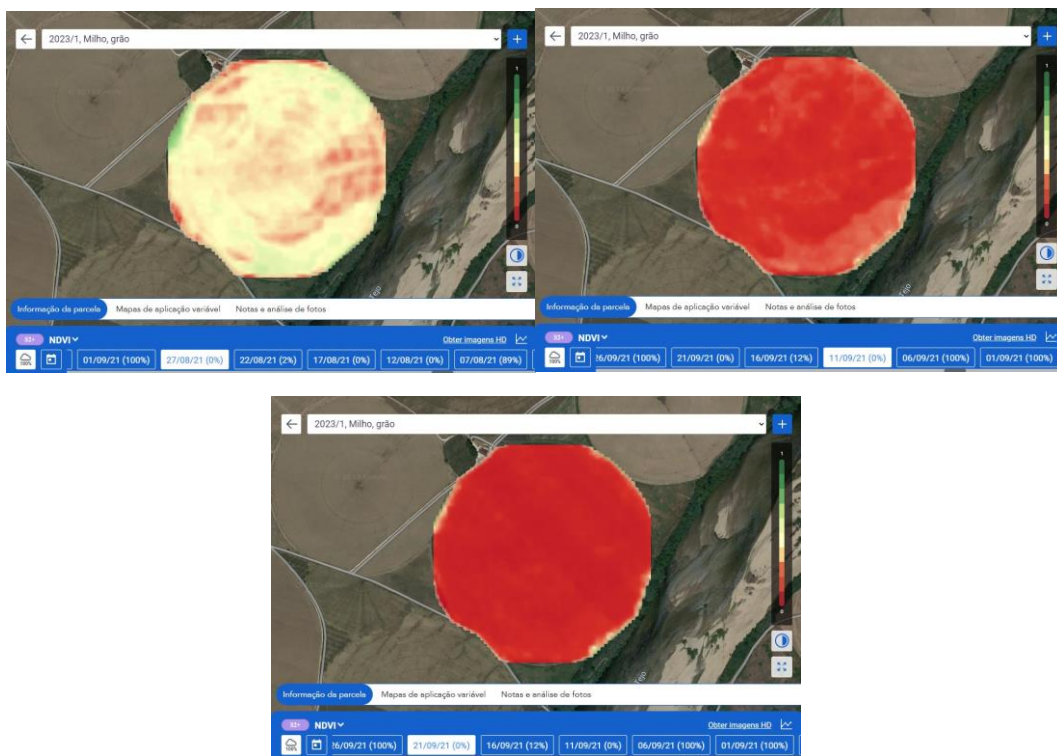
**Figura 33**

*NDVI segundo o plano Avançado do Granular Link ao longo do ciclo cultural (8 de julho – 22 de agosto).*



**Figura 34**

*NDVI segundo o plano Avançado do Granular Link ao longo do ciclo cultural (27 de agosto – 21 de setembro).*



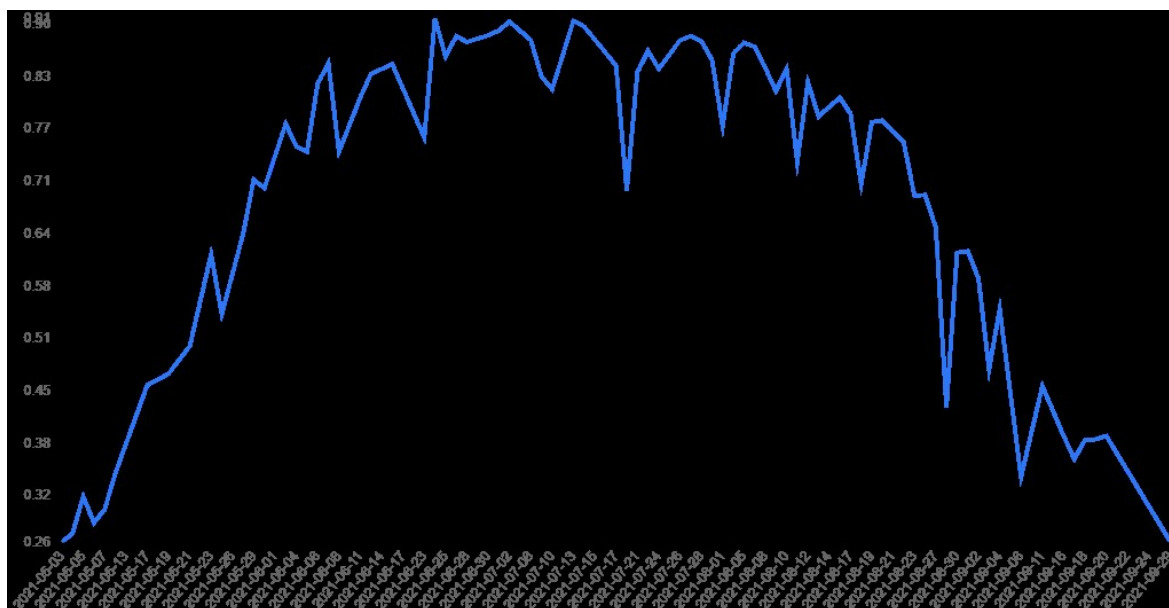
#### 4.4.2 Plano *Premium* - PlanetHD

Pela análise do gráfico de tendência da **Figura 35**, após a emergência da cultura registou-se um valor médio de NDVI próximo de 0,26 seguido de um aumento gradual, mas com alguns decréscimos (6, 25 e 30 de maio, 4, 5, 8 e 23 de junho), até chegar a um máximo de 0,91. Destes decréscimos, o dia 30 de maio e no intervalo entre 11 e 17 de junho, segundo a aplicação, apresentou-se sem nuvens, mas a confirmação através da cor verdadeira (**Anexos 3**) mostrou interferência por nuvens. Destaca-se ainda que estas oscilações são consequência de uma análise diária do PlanetHD.

Entre 24 de junho e 13 de julho, notou-se uma estabilização do NDVI médio, a rondar os 0,91, atingindo o máximo durante este período. A seguir a dia 13 de julho, ocorreu gradualmente um decréscimo dos valores médios até à colheita.

#### **Figura 35**

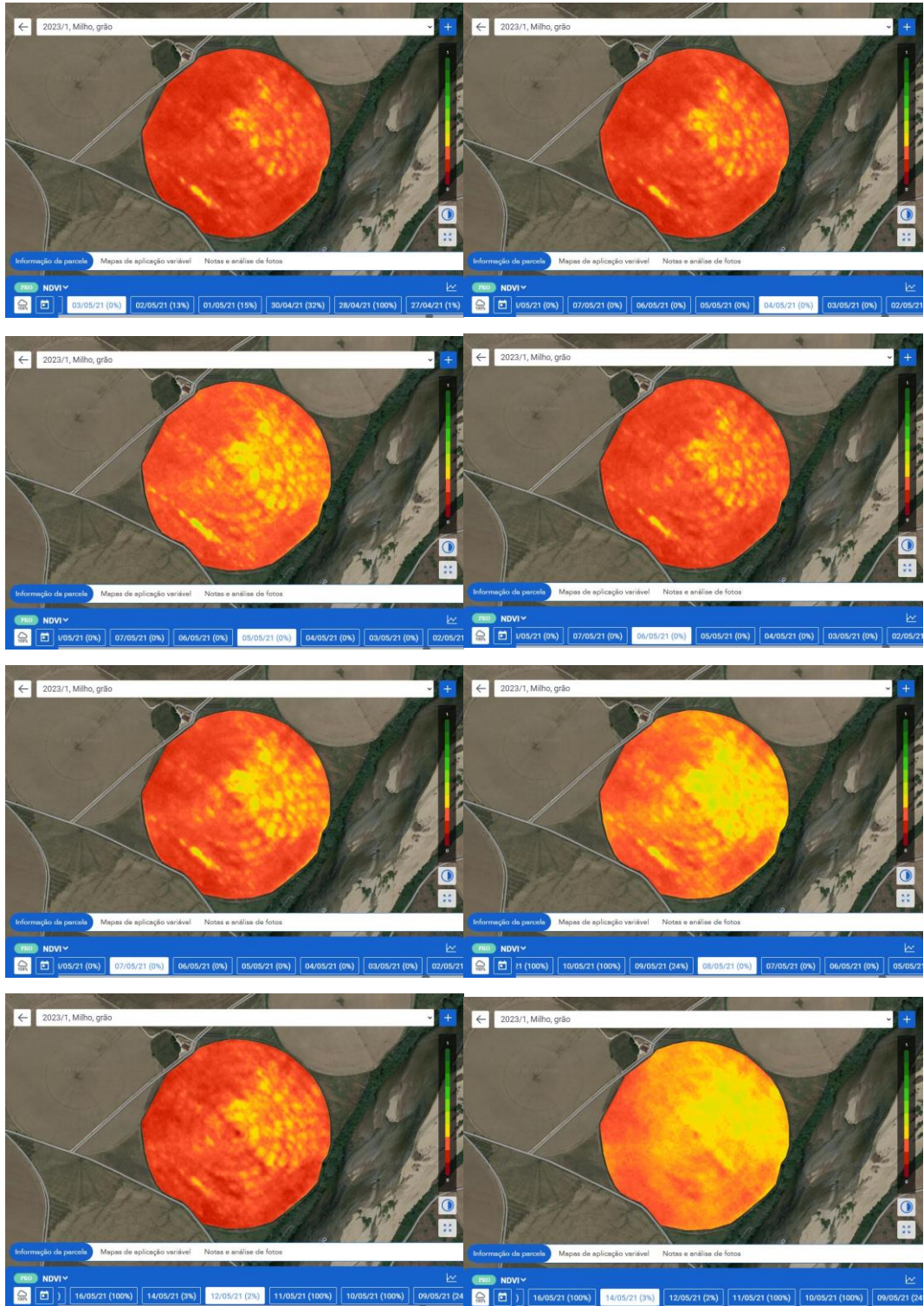
*Evolução dos valores de NDVI médio durante o ciclo cultural, segundo o plano Premium da aplicação Granular Link.*



Segundo as **Figura 36 a 45**, a seguir à sementeira a parte direita do pivot, destacou-se mais uma vez, com valores de NDVI superiores. Esta tendência manteve-se até dia 24 de junho, onde os valores atingiram um máximo passando a existir uma uniformidade (cor verde) em todo o pivot. A partir do dia 28 de julho até à colheita, a metade inferior do pivot começou a destacar-se com valores mais baixos.

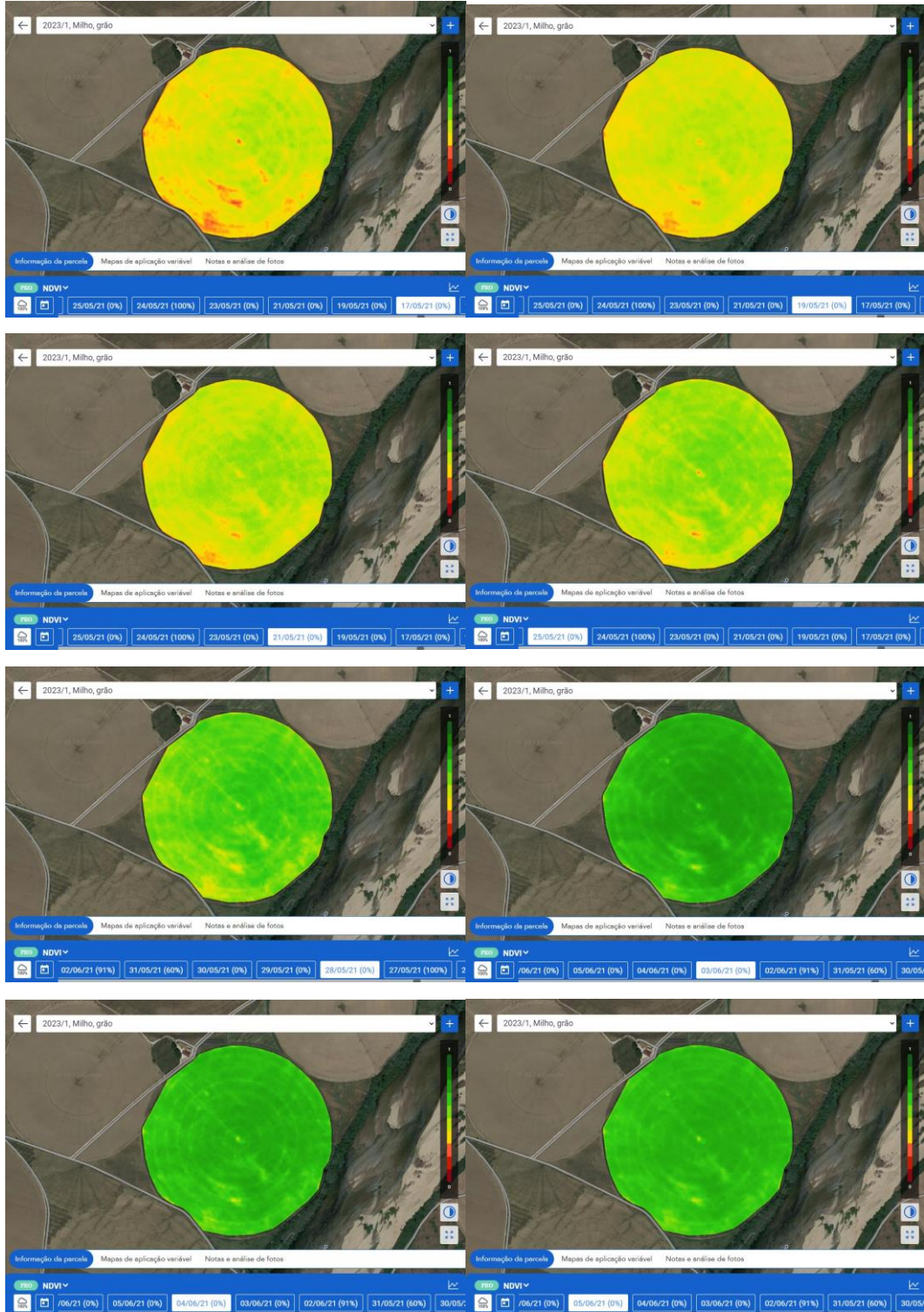
**Figura 36**

*NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (3 de maio – 14 de maio).*



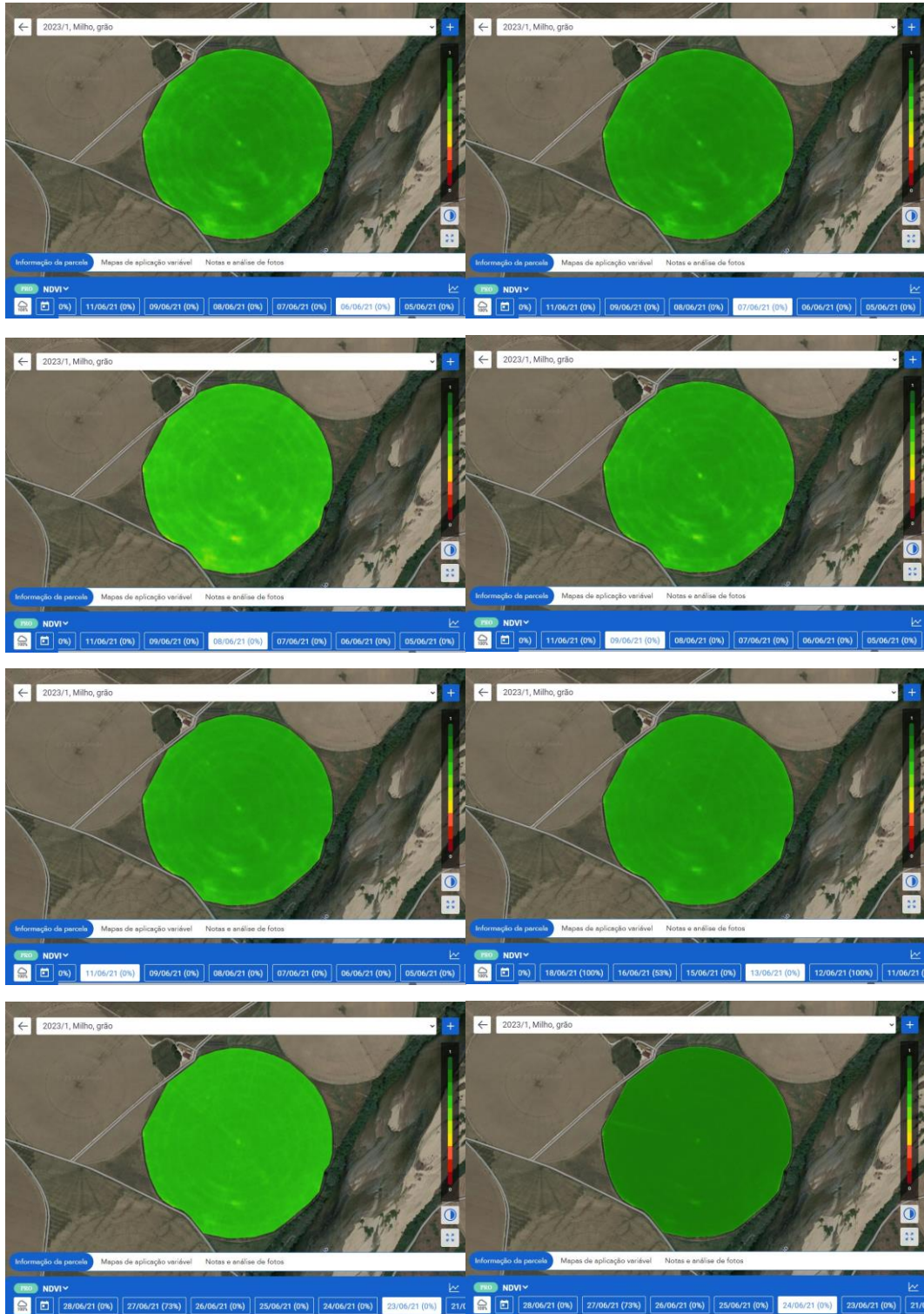
**Figura 37**

*NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (17 de maio – 5 de junho).*



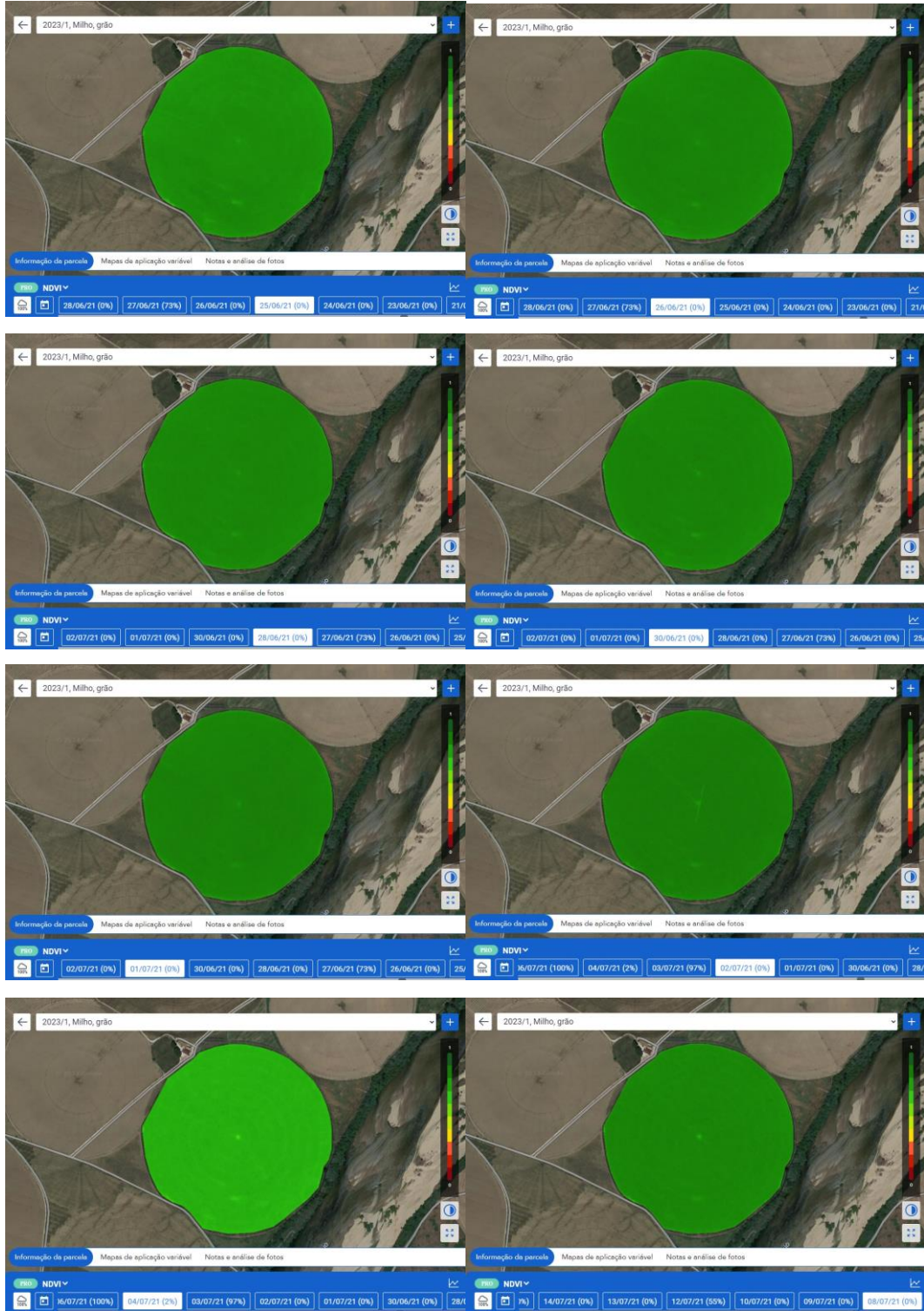
**Figura 38**

*NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (6 de junho – 24 de junho).*



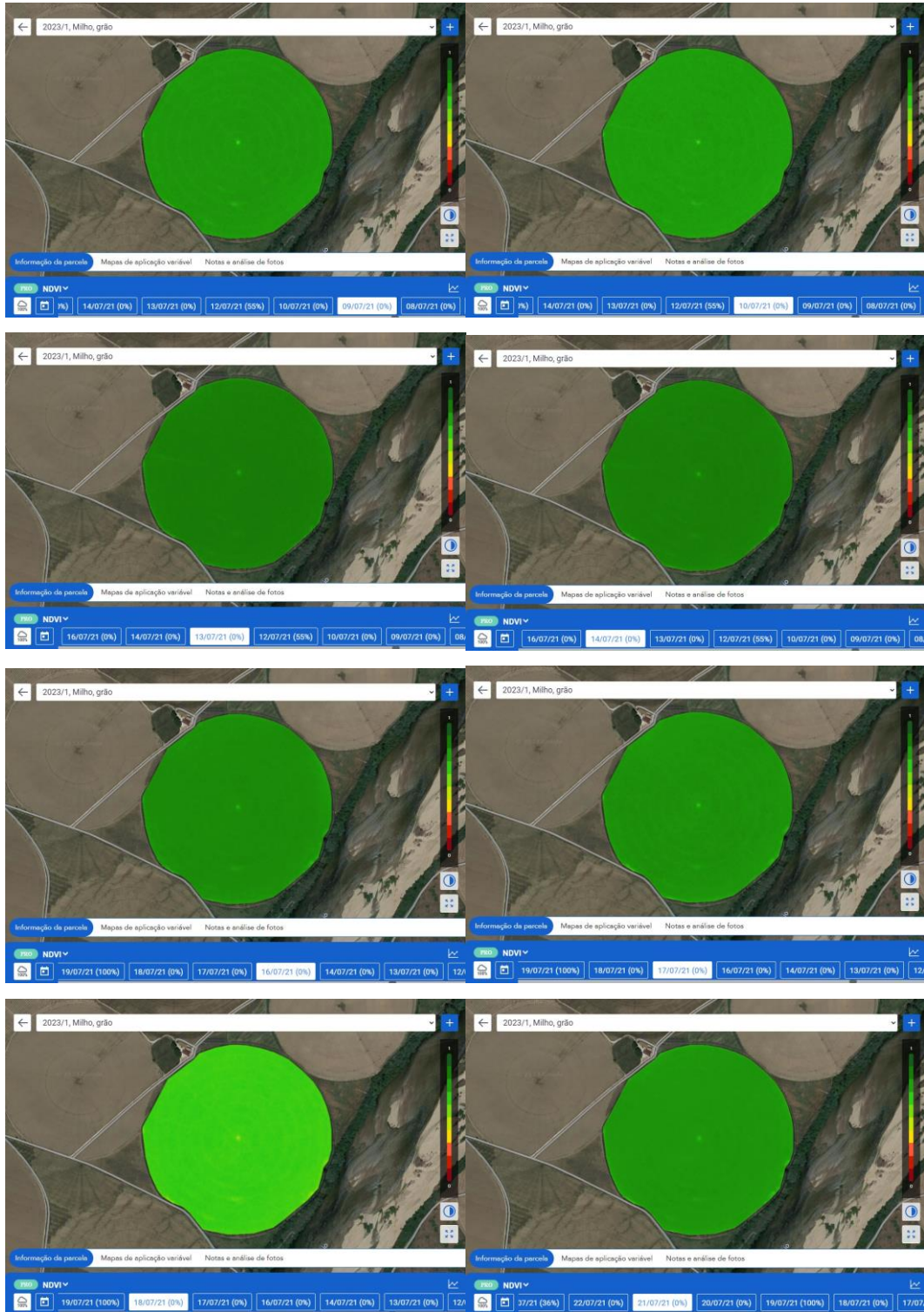
**Figura 39**

*NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (25 de junho – 8 de julho).*



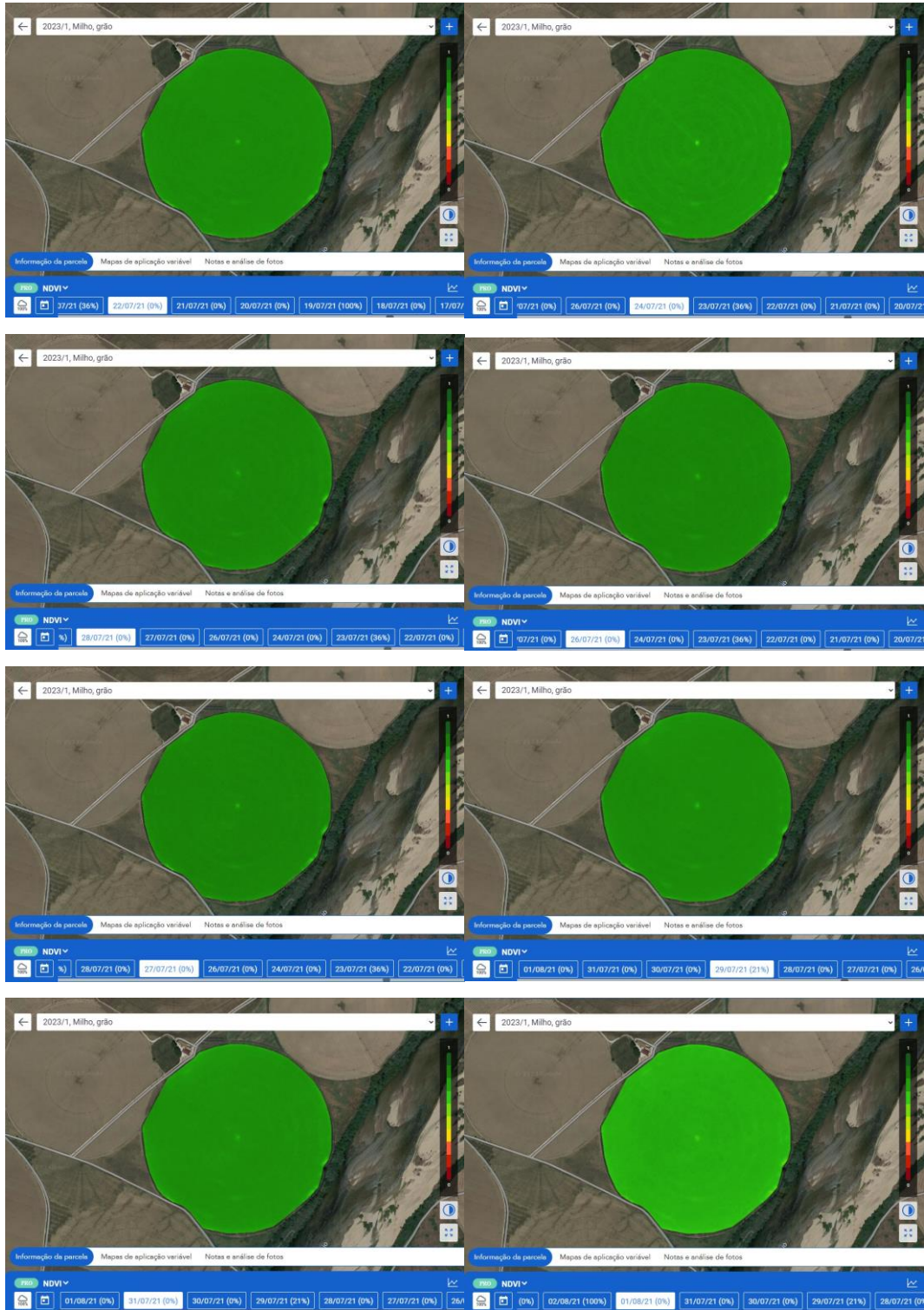
**Figura 40**

*NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (9 de julho – 21 de julho).*



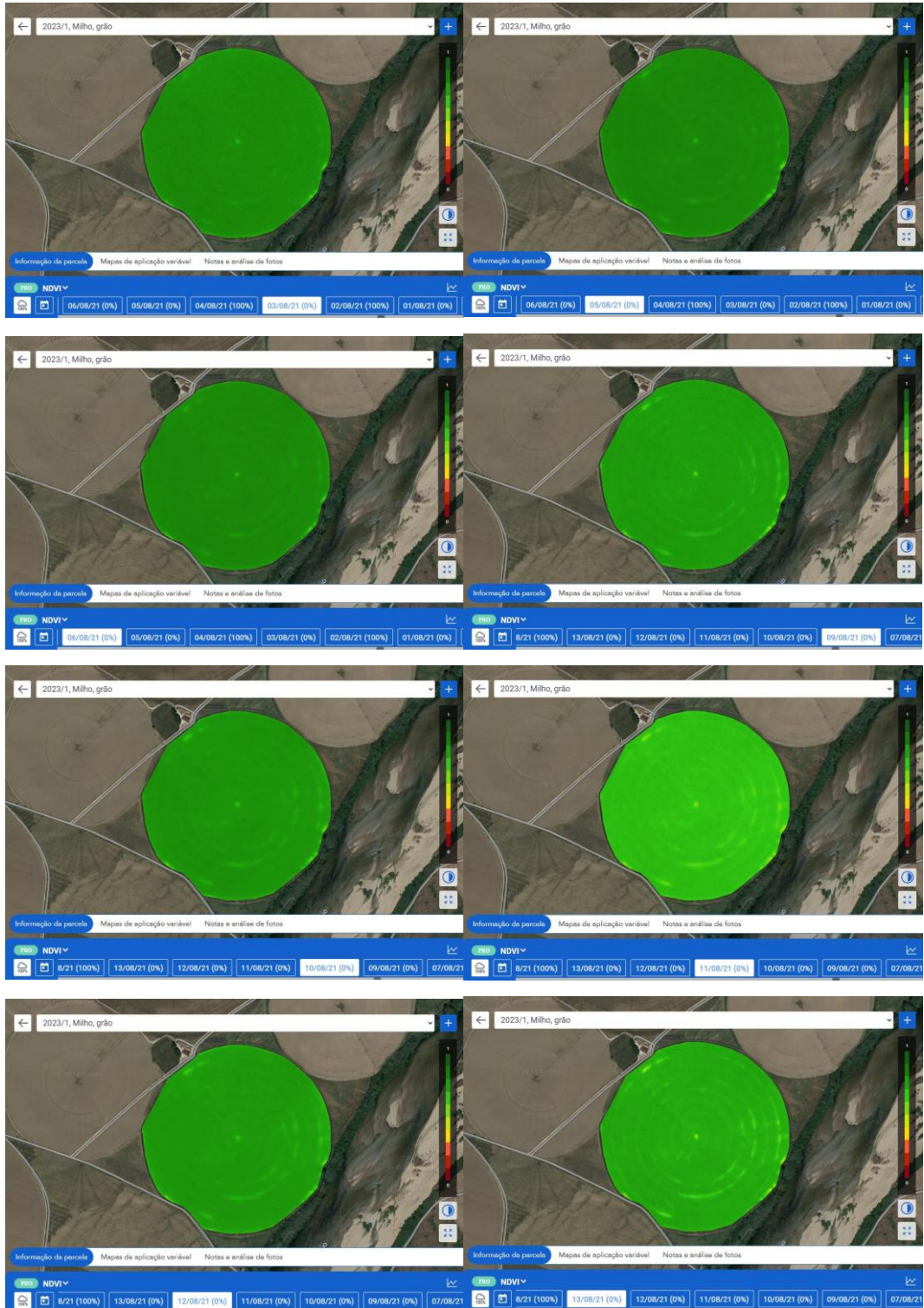
**Figura 41**

*NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (22 de julho – 1 de agosto).*



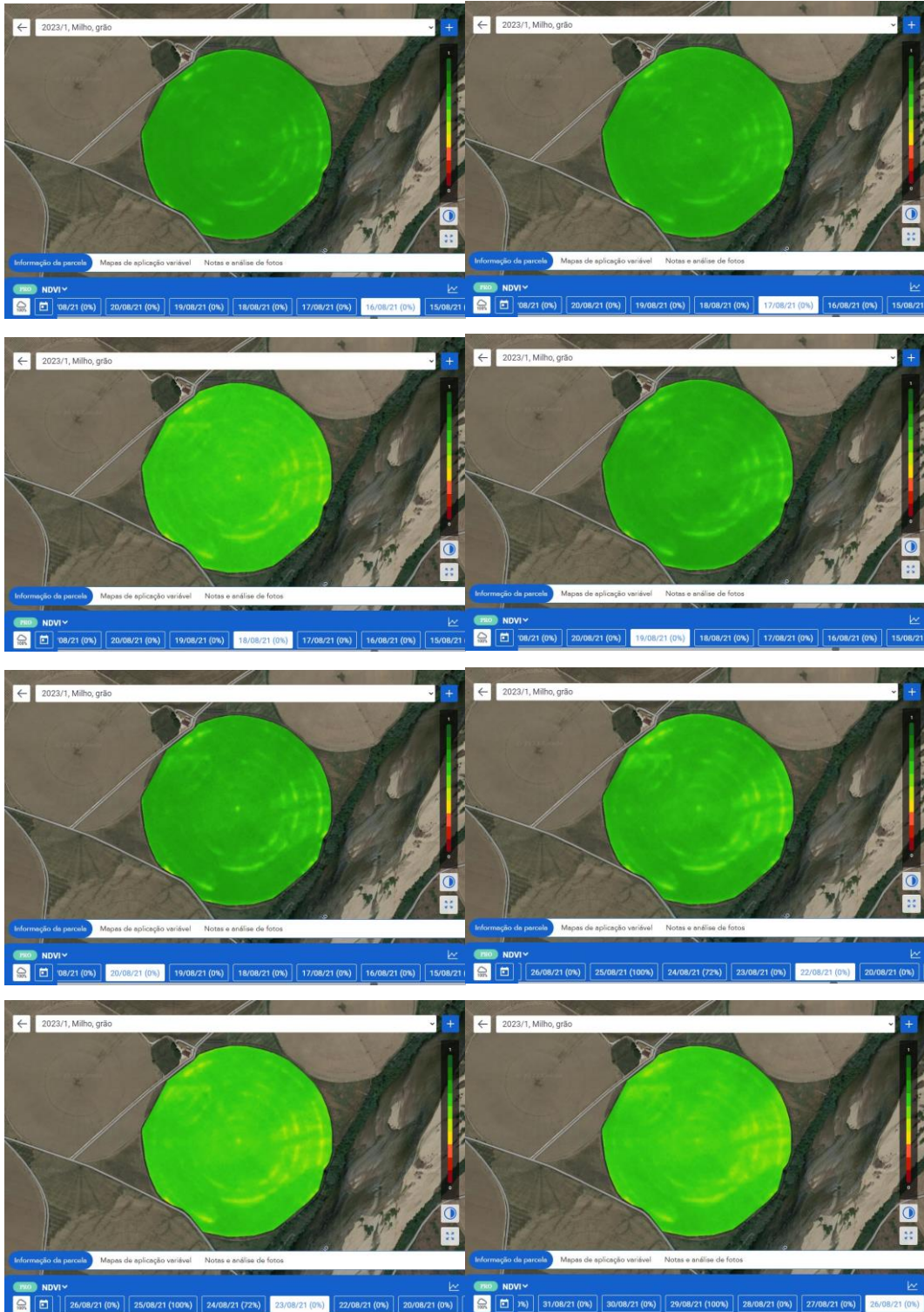
**Figura 42**

*NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (3 de agosto – 13 de agosto).*



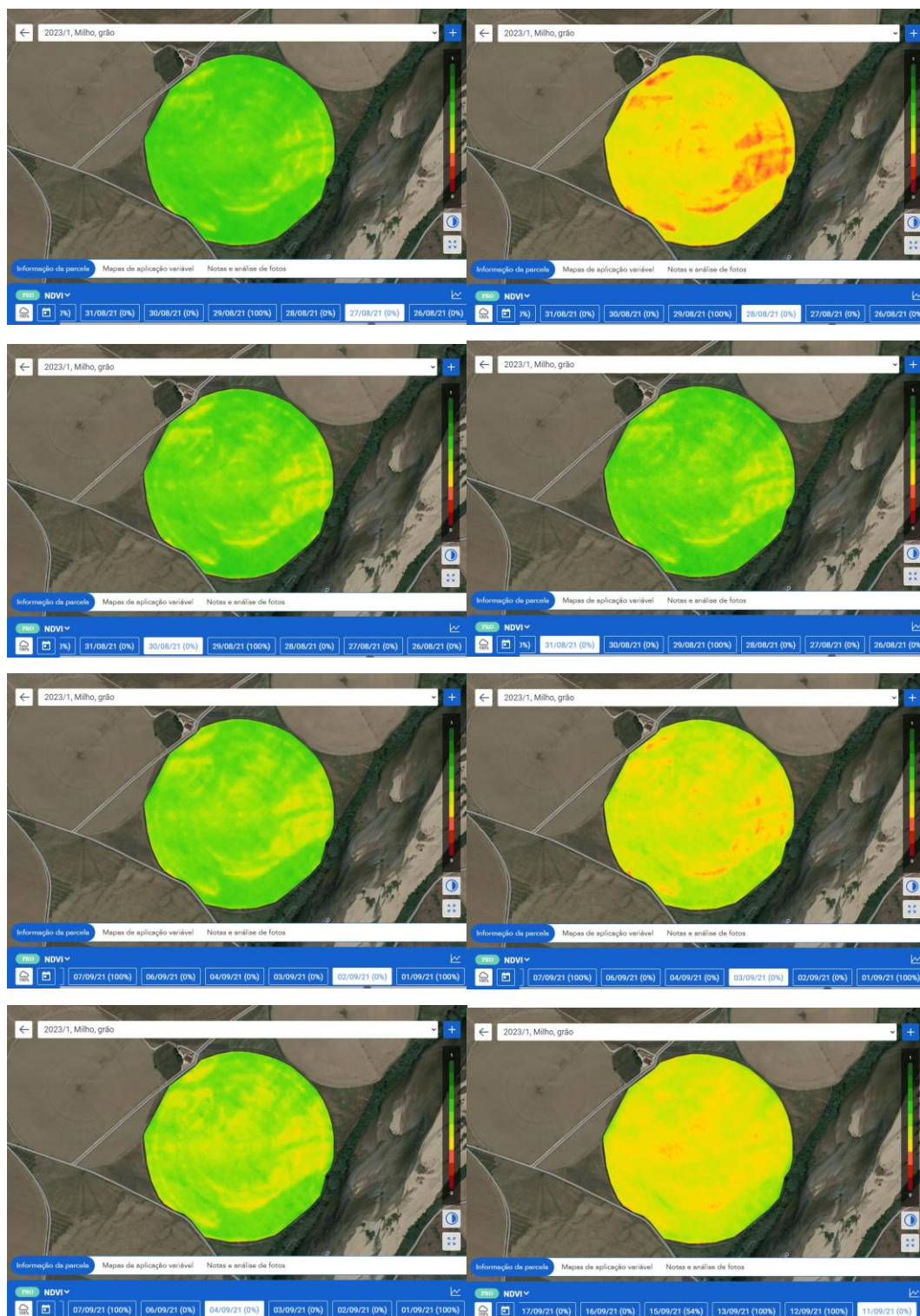
**Figura 43**

*NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (16 de agosto – 26 de agosto).*



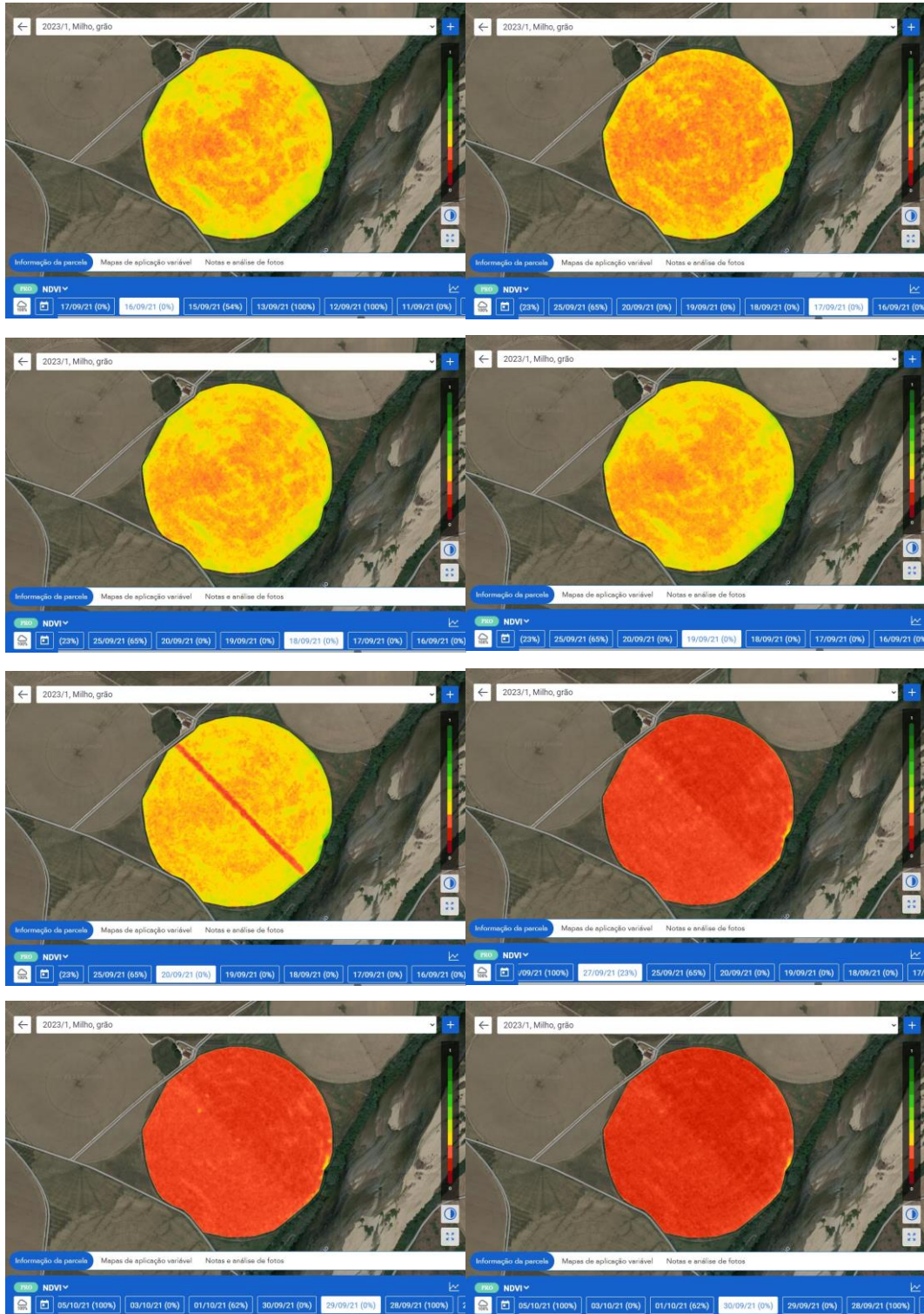
**Figura 44**

*NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (27 de agosto – 11 de setembro).*



**Figura 45**

*NDVI segundo o plano Premium do Granular Link ao longo do ciclo cultural (16 de setembro – 30 de setembro).*



## 4.5 Produtividade

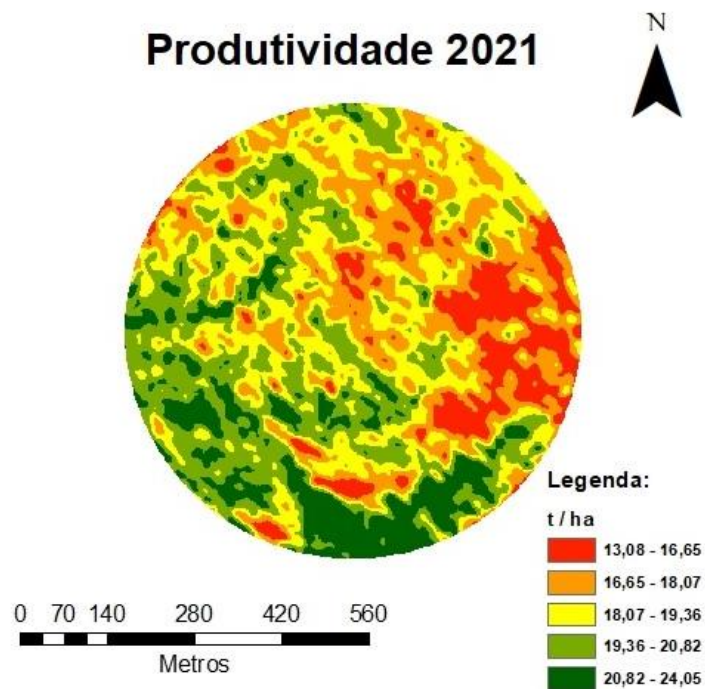
Os dados obtidos a partir da ceifeira debulhadora permitiram analisar a variabilidade espacial da produtividade na parcela (**Figura 46**).

A análise exploratória de dados evidenciou uma produtividade média de 18,78 t/ha, com um desvio padrão de 1,72 t/ha, tendo como mínimo e máximo 13,08 t/ha e 24,05 t/ha, respetivamente.

Embora os valores de produtividade sejam altos verifica-se alguma variabilidade espacial. A parte direita do pivot, destacou-se com valores mais baixos de produtividade enquanto a parte inferior apresentou valores mais altos.

**Figura 46**

*Mapa de produtividade da Pivot Grande.*



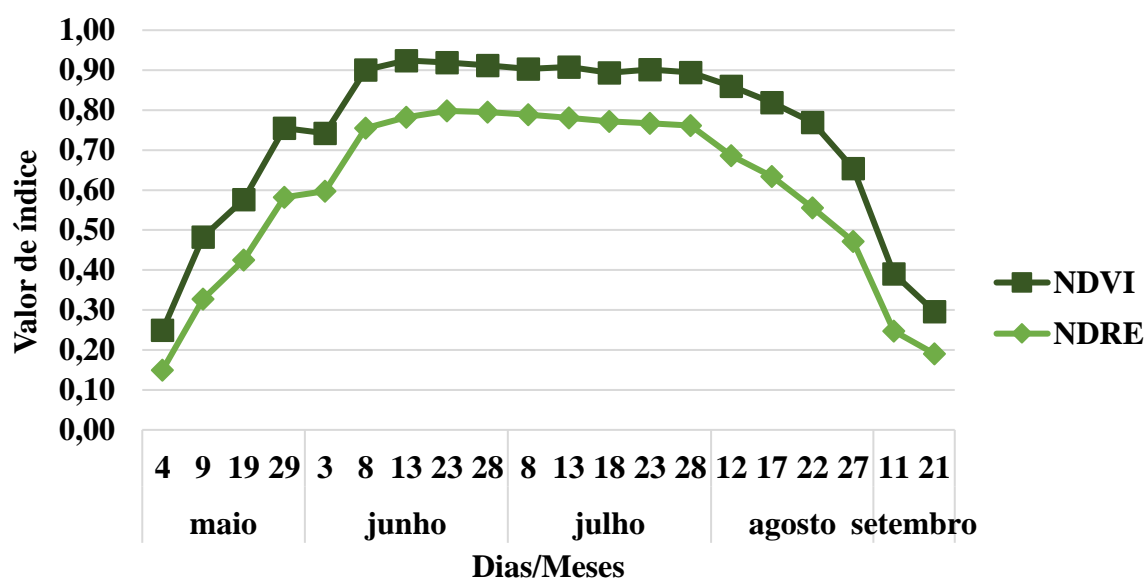
## 5. Discussão

### 5.1 Comparação entre NDVI, NDMI e NDRE

Pela análise da **Figura 47**, foi possível identificar duas fases de desenvolvimento ao longo da evolução dos dois índices, NDVI e NDRE. A primeira fase de desenvolvimento vegetativo, entre os dias 4 de maio e 13 de junho e uma segunda fase reprodutiva entre os dias 13 de junho e 27 de agosto. Comparando os valores médios destes índices ao longo do ciclo cultural, verificou-se que os valores de NDVI foram sempre superiores em relação aos valores médios de NDRE. De notar que em relação à data de 3 de junho os valores de NDVI, em média, decresceram 0,2 enquanto os valores de NDRE aumentaram, em média, 0,2. Isto pode ser explicado pelas conclusões de Li et al. (2014), em que durante as fases V6 (6 folhas) e V12 (12 folhas), o NDRE consegue detetar melhor as concentrações de azoto e clorofila.

**Figura 47**

*Evolução comparativa dos valores médios de NDVI com os valores médios de NDRE, ao longo do ciclo cultural.*



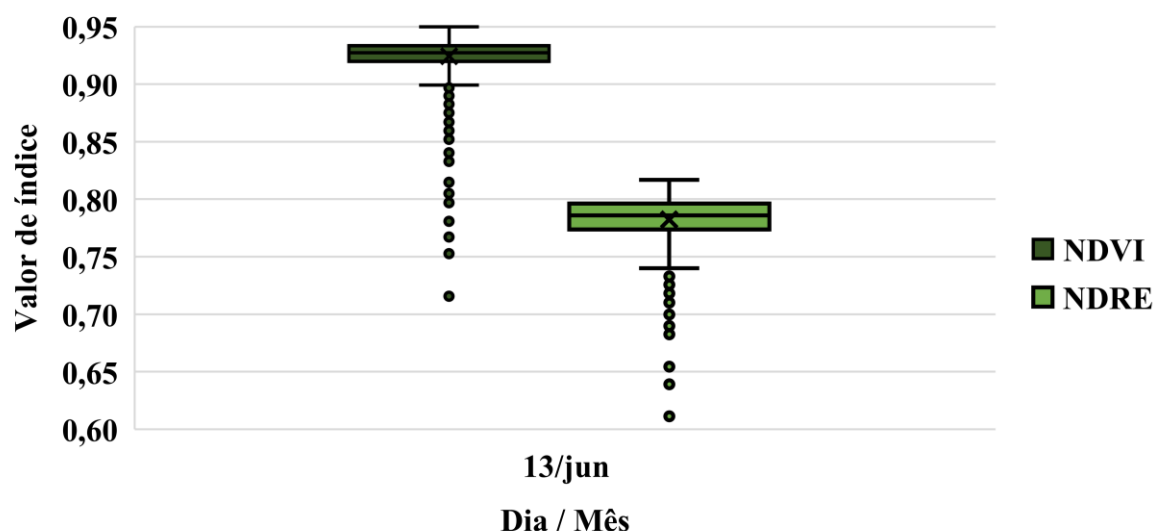
De acordo com a bibliografia descrita anteriormente, as principais diferenças entre NDVI e NDRE encontram-se nas fases tardias de ciclo cultural e por isso foram seleccionadas 3 datas (13 de junho, 13 de julho, 17 de agosto) para a comparação (**Figura 48,49 e 50**).

Na análise seguinte não foram considerados os valores atípicos (*outliers*) evidenciados nas figuras. Estes valores podem ser resultado da presença de irregularidades como rodado e parte central da rampa rotativa.

A **Figura 48** representa a variação de valores calculados de NDVI e NDRE no pivot Parcela Grande, para a data de 13 de junho, que caracteriza o início da fase reprodutiva da cultura. Segundo Y. Gao et al. (2015) e Jensen (2009) é a partir desta fase que o NDVI começa a saturar, ou seja, os valores ficam muito próximos de 1 e torna-se difícil a diferenciação. A variação de valores de NDVI encontra-se entre 0,9 e 0,95, ao contrário do NDRE em que os valores variam entre 0,75 e 0,83, não considerando os valores atípicos. Constatou-se que a amplitude de valores foi maior no NDRE, observando-se uma ligeira assimetria.

**Figura 48**

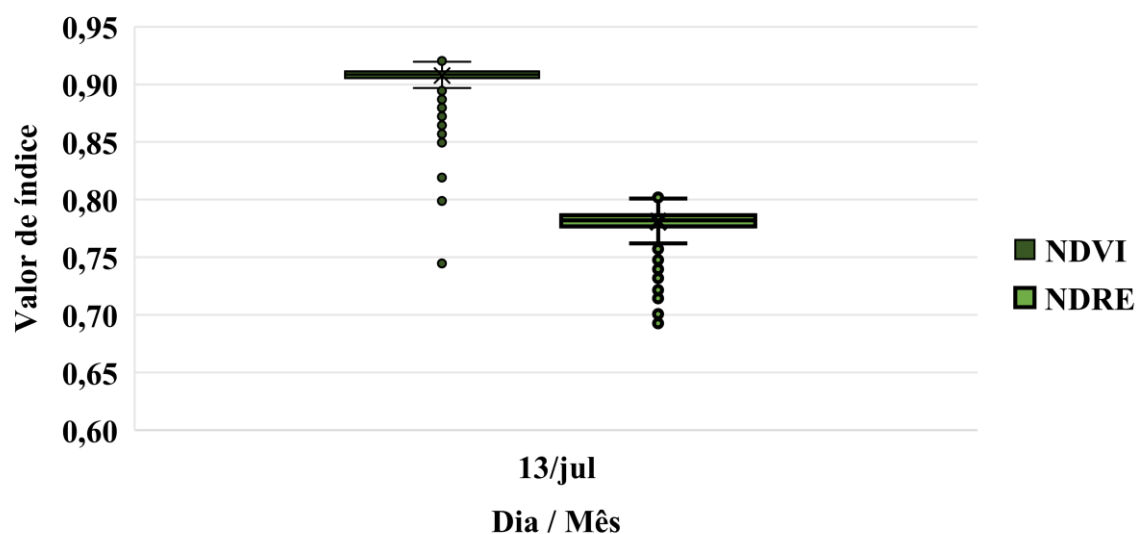
*Comparação de valores de NDVI e NDRE a 13 de junho de 2021.*



Pela análise da **Figura 49**, no início da maturação fisiológica da cultura, os valores obtidos aproximam-se muito dos valores médios, mas o NDRE evidencia uma diferenciação ligeiramente maior quando comparado com o NDVI.

**Figura 49**

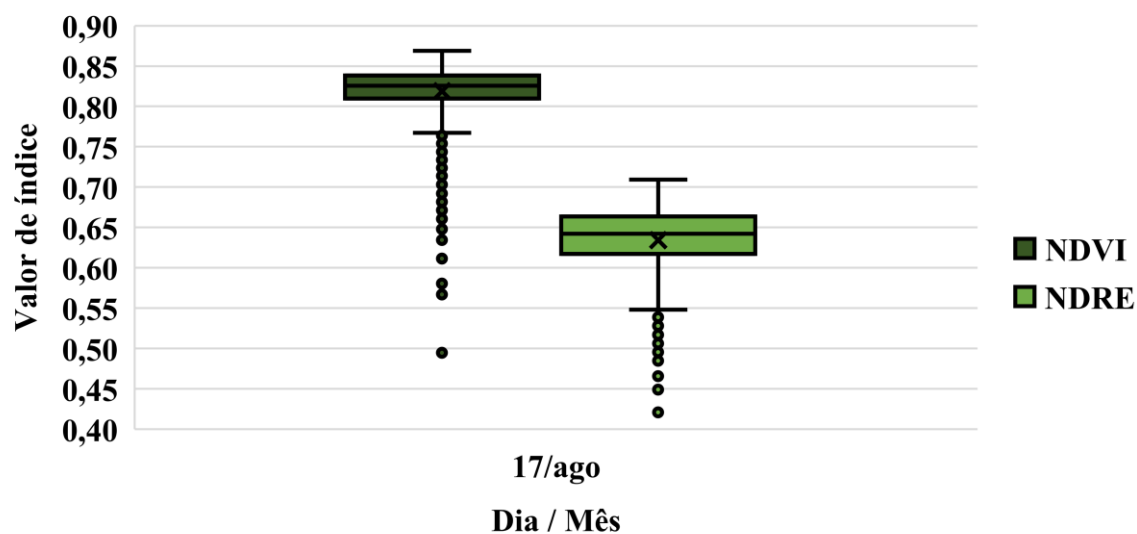
*Comparação de valores de NDVI e NDRE a 13 de julho de 2021.*



A 17 de agosto (**Figura 50**), verifica-se a mesma tendência observadas nas duas datas anteriores, mas com uma diminuição dos valores médios. O valor mínimo do NDVI aproxima-se do valor máximo do NDRE e verifica-se um aumento da amplitude dos valores, nos dois índices.

**Figura 50**

*Comparação de valores de NDVI e NDRE a 17 de agosto de 2021.*

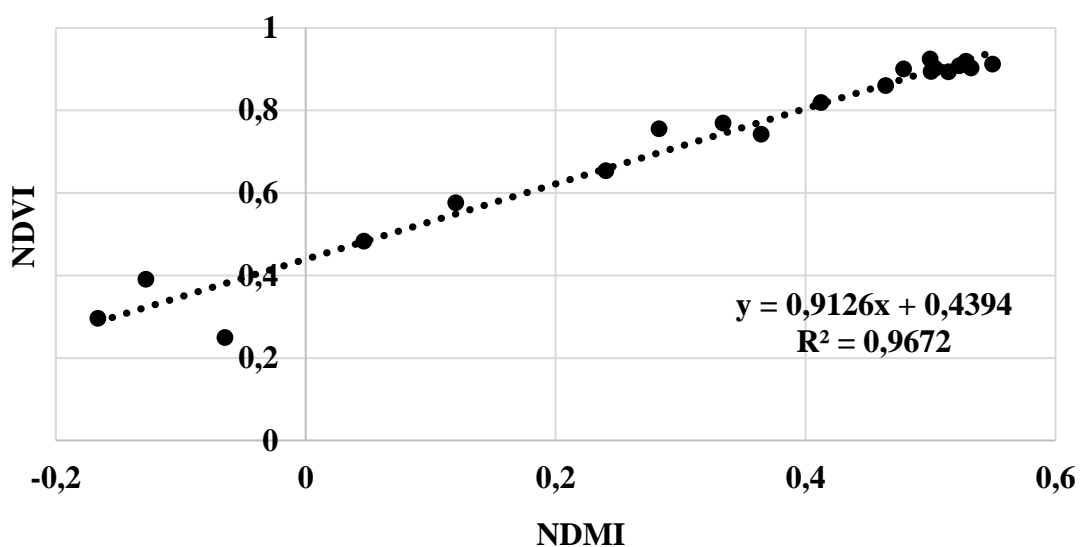


O NDMI é um indicador das mudanças que ocorrem na biomassa e na avaliação do stress hídrico da vegetação. Comparar os resultados deste índice com o NDVI e o NDRE permite uma melhor compreensão do processo produtivo.

Na **Figura 51** verifica-se que a regressão linear entre o NDVI e o NDMI evidencia ser significativa, apresentando um *p-value* de  $8,37 \times 10^{-15}$  (*p-value* < 0,05). A regressão apresenta um alto coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,9672$ ), ou seja, 96,7% dos valores de NDVI são explicados através da regressão. Por conseguinte, o coeficiente de correlação entre as duas variáveis mostrou ser positivo e muito forte ( $R = 0,9834$ ), (**Anexo 5**).

**Figura 51**

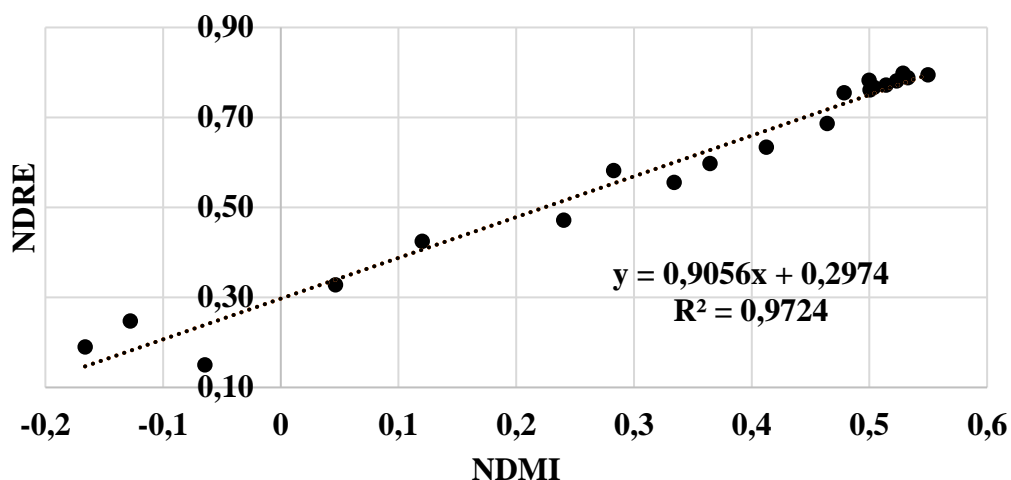
*Correlação entre NDVI e NDMI.*



A regressão entre NDRE e NDMI (**Figura 52**), mostra um maior valor de coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,9724$ ) que a regressão anterior indicando que a variação total explicada pela regressão foi de 97,2%. O teste de significância revela uma relação significativa entre as duas variáveis com um *p-value* de  $1,78 \times 10^{-15}$  (*p-value* < 0,05). O coeficiente de correlação é de 0,9861 e expressa uma correlação positiva muito forte entre o NDRE e o NDMI, ou seja, podemos obter bons resultados para estimativas de NDRE em função do NDMI.

**Figura 52**

*Correlação entre NDRE e NDMI.*



Em resumo, as duas equações obtidas e respectivos coeficientes, mostram fortes correlações do NDMI com o NDVI e NDRE e embora os valores sejam bastante semelhantes, são mais altos na correlação do NDMI com o NDRE.

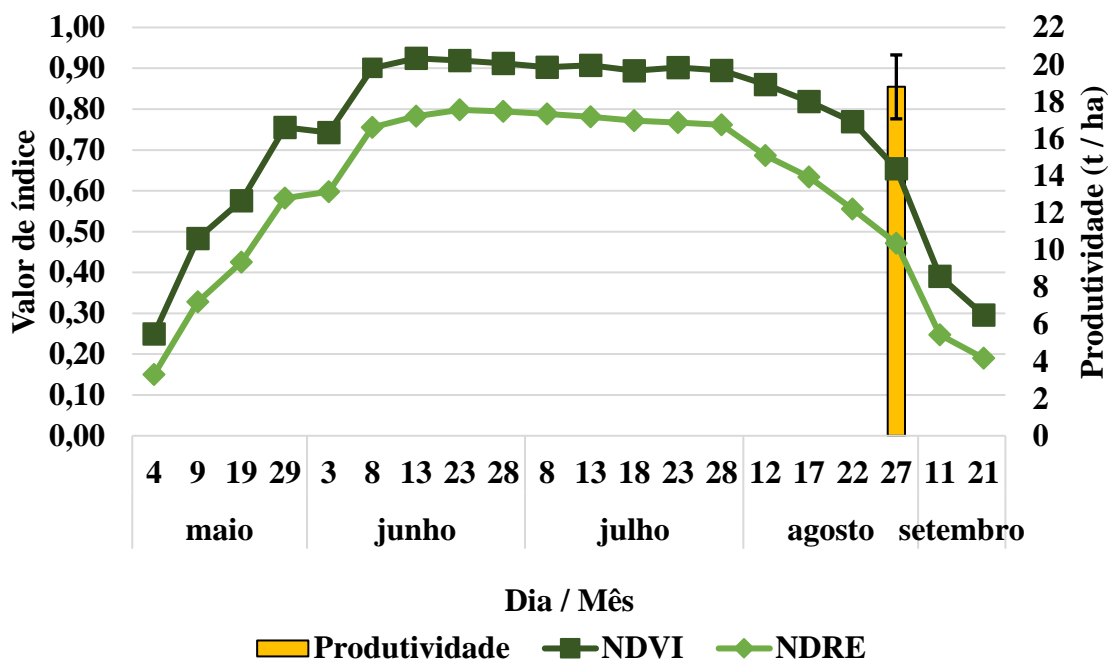
## 5.2 Comparação de índices de vegetação com a produtividade

No início do desenvolvimento da cultura, notou-se uma diferença nos valores dos índices, NDVI e NDRE, registando a parte direita da Parcela Pivot Grande valores mais elevados. Esta diferença refletiu-se na produtividade, que nessa área apresentou valores mais baixos. Assim sendo, um maior desenvolvimento vegetativo na parte direita resultou numa entrada na maturação fisiológica e em senescência mais cedo que nas restantes áreas do pivot, provocando um certo desequilíbrio no mapa de produtividade.

A média de produtividade do pivot é bastante alta (18,78t/ha). No entanto, esta média poderia atingir valores mais elevados se a parte direita da parcela fosse uniforme com o restante do pivot. Esta variabilidade espacial está de acordo com a forte relação da produtividade com os valores de NDVI e NDRE. (**Figura 53**).

**Figura 53**

*Comparação NDVI, NDRE e produtividade.*



### 5.3 Comparação do processamento e análise de imagens obtidas pelos dois métodos

Em termos de processamento de imagens, notaram-se várias diferenças entre os métodos estudados.

Em relação à forma em como se obtêm as imagens dos índices em estudo, o NDVI era comum aos dois métodos, existe uma clara facilidade de obtenção da imagem que queremos analisar por parte do Granular Link em relação ao processamento das imagens provenientes do Sentinel-2, não só em termos de tempo de processamento, mas também na acessibilidade das mesmas. A partir de dois ou três cliques é possível a visualização do índice que pretendemos estudar ao contrário das imagens do Sentinel-2 em que é preciso descarregar e efetuar cálculos para a zona em estudo. No caso da delimitação da parcela em estudo, a aplicação apresentou uma forma bastante simples de delimitação, em que é preciso apenas indicar o concelho onde está inserida e com uma rápida procura da mesma é possível delimitá-la, ao contrário das imagens de satélite em que, devido à quantidade de dados presente nesta, torna difícil e morosa a delimitação. Na verificação da obstrução por nuvens, a aplicação ofereceu a possibilidade de selecionar imagens conforme a percentagem de obstrução. No entanto, após a verificação de todas as imagens de cor verdadeira (**Anexo 2 e**

3), existiram alguns casos em que a aplicação não identificou a obstrução, principalmente quando eram as sombras de nuvens. Ocorreram outros casos em que as imagens não estavam totalmente disponíveis, ou seja, não renderizou a imagem total e aparecia cortada.

No que respeita à obtenção de dados, para estudos em que é preciso aprofundar, o Granular Link, por enquanto, encontra-se em desvantagem pois apenas permite a visualização das imagens de índices e de um gráfico de tendência em que não é possível, ainda, a sua manipulação. Pelo contrário nas imagens do Sentinel-2 é possível a manipulação total das imagens e dos dados fornecidos por elas. No entanto, para a gestão diária do empresário agrícola, a aplicação Granular Link traz inúmeras vantagens, entre outras, uma rápida visualização de diversos índices, acompanhar o desenvolvimento da cultura, retirar conclusão de forma célere e tomar decisões, atempadamente.

Relativamente aos valores obtidos pelos índices, comparando o NDVI do Sentinel-2 com o do plano Avançado (Sentinel+), **Figura 18** e **Figura 31**, as linhas de tendências aparentam ser diferentes, resultado da utilização de diferentes escalas. Na realidade são semelhantes em termos da sua tendência. Em relação aos valores médios obtidos, estes diferem, devido ao recálculo da resolução espacial, de 5m x 5m para 3m x 3m. No caso do plano *Premium* (PlanetHD), notou-se que os valores médios se aproximaram mais dos valores médios de NDVI do Sentinel-2, mas como a amostra de imagens é maior, verificaram-se mais alterações na linha de tendência. Esta amostra de imagens do plano *Premium* oferece a possibilidade de o agricultor acompanhar a sua cultura quase diariamente, permitindo um período de atuação, muito mais rápido em relação às imagens obtidas através do Sentinel-2 que são disponibilizadas de 5 em 5 dias.

A respeito da disponibilidade dos planos Avançado e *Premium*, estes são acessíveis a agricultores com afiliação ao grupo CORTEVA Agriscience. No entanto, reforça-se que, no caso de não existir esta afiliação, o plano Básico está disponível a todos os agricultores e as observações que se podem fazer a partir das imagens do Sentinel-2 são iguais às que se fazem neste plano.

## 6. Conclusões

A introdução de novas ferramentas na Agricultura de Precisão, permite ao agricultor desenvolver uma vasta gama de técnicas culturais que permitem ter uma evolução sustentável ao longo do tempo. Estas ferramentas quando introduzidas no sistema agrícola necessitam de ser testadas e calibradas de forma a realizar um trabalho com rigor e adequado a esse sistema.

O NDVI, sendo uns dos índices de vegetação mais utilizados no setor agrícola, todavia apresenta certas limitações que podem ser resolvidas com o auxílio de outros índices. Neste estudo foi demonstrado que o NDRE pode ser uma solução para a saturação do NDVI em fases de desenvolvimento mais tardias da cultura do milho (principalmente na fase reprodutiva), em que o NDRE não satura e consegue diferenciar melhor as classes de vegetação. Também foi constatado que o NDMI tem uma relação muito forte com os dois índices e que pode salientar certas variações nos níveis de vegetação.

Em relação à produtividade obtida e à sua relação com os índices estudados, ficou provado que as diferenças de valores dos índices (NDVI e NDRE) que existiram no início do ciclo cultural, na Parcela Grande, refletiram-se nos valores de produtividade.

Comparando os métodos utilizados para o processamento e análise de imagens, concluiu-se que existem bastantes benefícios para o agricultor na utilização da aplicação Granular Link em relação ao método “tradicional” (via Sentinel-2). A rapidez e facilidade de obtenção de imagens, através da aplicação Granular link, permite ao empresário agrícola tomar decisões e atuar de forma atempada. No entanto, em alguns estudos é necessária uma maior manipulação de dados o que, por enquanto, só é possível através do download direto dessas imagens.

Em trabalhos futuros, será desafiante acompanhar a parcela tanto ao nível dos valores de NDVI, NDRE e produtividade, a fim de estudar melhor a relação entre eles e construir um modelo de previsão de produtividade, como acompanhar as diferentes fases de desenvolvimento da cultura e o seu relacionamento com os valores de NDVI e NDRE, tal como outros índices. Em relação às diferenças de produtividade que foram encontradas na parcela, propõe-se um estudo da condutividade elétrica aparente do solo, que permita conhecer melhor a variabilidade espacial da textura, de forma a atuar e contribuir para a mitigação dessas diferenças.

## 7. Referências Bibliográficas

- Agência Europeia Espacial (ESA). (2022). *Sentinel-2*. Sentinel Online. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- Aggarwal, S. (2004). *Principles of Remote Sensing* (M. Sivakumar, P. Roy, K. Harmsen, & S. Saha, Eds.; pp. 23–38). Organização Meteorológica Mundial (WMO). [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=5088#.Y7\\_gyHbP270](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=5088#.Y7_gyHbP270)
- Alberto. (2022). *Measuring moisture: Normalized Difference Moisture Index (NDMI) Sentinel-2 2022*. <https://geovisualization.net/2022/07/14/measuring-moisture-normalized-difference-moisture-index-ndmi-sentinel-2-2022/>
- Blackmore, S. (1999). Remedial Correction of Yield Map Data. *Precision Agriculture*, 1(1), 53–66. <https://doi.org/10.1023/A:1009969601387>
- Braga, R. (2009). *Viticultura de Precisão*. Associação dos Jovens Agricultores de Portugal.
- Cardoso, J. V. C. (1965). *Carta de Solos de Portugal: classificação e caraterização dos solos de Portugal. 1 - A Sul do rio Tejo*. Secretaria de Estado da Agricultura. Serviço de Reconhecimento e de Ordenamento Agrário – Lisboa, SROA.
- Cavalcante, A. (2016). *ANÁLISE QUALITATIVA DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) EXTRAÍDO A PARTIR DE IMAGENS RAPIDEYE E UTILIZANDO-SE DE SOFTWARE LIVRE-ESTUDO DE CASO MUNICÍPIO DE SÃO MIGUEL DOS CAMPOS/AL*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28241.43363>
- Chbagro. (2020, Julho 2). *NDVI E NDRE: O QUE SÃO, SUAS DIFERENÇAS E QUANDO UTILIZÁ-LOS*. <https://blog.chbagro.com.br/ndvi-e-ndre-o-que-sao-suas-diferencas-e-quando-utiliza-los>
- Cherlinka, V.-E. O. S. (2019). *NDVI FAQ: All you need to know about NDVI*. <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>.
- Coelho, J. C., Silva, L. M., Tristany, M., Neto, M. C., & Pinto, P. A. (2003). Agricultura de Precisão. Em J. P. C. Coelho & J. R. M. Silva (Eds.), *Inovação e Tecnologia na Formação Agrícola*. Associação dos Jovens Agricultores de Portugal.
- Corteva agriscience. (sem data). *Granular Link*. Obtido 2 de Agosto de 2023, de <https://www.corteva.es/agronomia-y-servicios/granular-link.html>
- Costa, L., Nunes, L., & Ampatzidis, Y. (2020). A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and*

- Electronics in Agriculture*, 172, 105334.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105334>
- eoPortal. (2022). *Landsat-9*.
- Falcão, J. M. M. A. C. (2019). *Utilização de imagens de satélite para a otimização produtiva do olival superintensivo (cv. Arbosana)* [Universidade de Lisboa].  
<http://hdl.handle.net/10400.5/21286>
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.  
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gao, Y., Walker, J. P., Allahmoradi, M., Monerris, A., Ryu, D., & Jackson, T. J. (2015). Optical Sensing of Vegetation Water Content: A Synthesis Study. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(4), 1456–1464.  
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2398034>
- GISRSStudy. (2023). *Remote Sensing (RS)*. <https://gisrsstudy.com/remote-sensing/>
- Gitelson, A., & Merzlyak, M. N. (1994). Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 22(3), 247–252.  
[https://doi.org/10.1016/1011-1344\(93\)06963-4](https://doi.org/10.1016/1011-1344(93)06963-4)
- Grifo, A., Palma, R., Ferreira, A., & Palminha, A. (2022). Delimitação de áreas diferenciadas: caso de estudo na cultura do milho. *IV Congresso Nacional das Escolas Superiores Agrárias*, 54.
- Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA). (2023). *Normais Climatológicas*.  
<https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>
- Jensen, J. R. (2009). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2nd Edition). Pearson Education India.
- Lechner, A. M., Foody, G. M., & Boyd, D. S. (2020). Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management. *One Earth*, 2(5), 405–412.  
<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001>
- Li, F., Miao, Y., Feng, G., Yuan, F., Yue, S., Gao, X., Liu, Y., Liu, B., Ustin, S. L., & Chen, X. (2014). Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research*, 157, 111–123.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.018>

- Masek, J. G., Wulder, M. A., Markham, B., McCorkel, J., Crawford, C. J., Storey, J., & Jenstrom, D. T. (2020). Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity. *Remote Sensing of Environment*, 248, 111968. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111968>
- McFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Menegatti, L. A. A., & Molin, J. P. (2003). Metodologia para identificação e caracterização de erros em mapas de produtividade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(2), 367–374. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000200031>
- Mimić, G., Živaljević, B., Blagojević, D., Pejak, B., & Brdar, S. (2022). Quantifying the Effects of Drought Using the Crop Moisture Stress as an Indicator of Maize and Sunflower Yield Reduction in Serbia. *Atmosphere*, 13(11), 1880. <https://doi.org/10.3390/atmos13111880>
- Moreira, P. (2020). *Integração de técnicas de deteção remota em sistemas de informação geográfica para mapeamento espáciotemporal da produção de vinho na Região Demarcada do Douro* [Universidade do Porto]. <https://hdl.handle.net/10216/132188>
- Naguib, N. S., & Daliman, S. (2022). Analysis of NDVI and NDRE Indices Using Satellite Images for Crop Identification at Kelantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1102(1), 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1102/1/012054>
- NASA. (2023). *Landsat 8*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Panek, E., & Gozdowski, D. (2020). Analysis of relationship between cereal yield and NDVI for selected regions of Central Europe based on MODIS satellite data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100286. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100286>
- Pereira, J. F. S. (2019). *Análise técnico-económica da produção de milho, na Lezíria Grande de Vila Franca de Xira. Comparação de sistemas de rega: canhão de rega e pivot* [Universidade de Lisboa.Instituto Superior de Agronomia]. <http://hdl.handle.net/10400.5/19459>
- Planet. (2023). *Our Constellation*. <https://www.planet.com/our-constellations/>

- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1973). *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation*. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19730017588/downloads/19730017588.pdf>
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D., & Harlan, J. (1974). *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750020419>
- Sader, S. A., Bertrand, M., & Wilson, E. H. (2003). Satellite Change Detection of Forest Harvest Patterns on an Industrial Forest Landscape. Em *Forest Science: Vol. 49(3)* (pp. 341–353).
- Sentinel Online, & ESA. (sem data). *Sentinel Missions*. Obtido 18 de Julho de 2023, de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>
- Sharifi, A. (2020). Using Sentinel-2 Data to Predict Nitrogen Uptake in Maize Crop. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 2656–2662. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2998638>
- Simbahan, G. C., Dobermann, A., & Ping, J. L. (2004). Screening Yield Monitor Data Improves Grain Yield Maps. *Agronomy Journal*, 96(4), 1091–1102. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1091>
- Sousa, A., & Silva, J. (2011). *Fundamentos Teóricos de Detecção Remota* (p. 57). Universidade de Évora. <http://hdl.handle.net/10174/4822>
- The European space Agency. (sem data). *PlanetScope. Earth online*. Obtido 26 de Junho de 2023, de <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope#data-section>
- Tucker, C. J. (1979). *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*. *Remote sensing of Environment: Vol. 8(2)* (pp. 127–150). <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19780024582/downloads/19780024582.pdf>
- União Europeia (UE). (2015). *Copernicus - Europe's eyes on Earth*. <https://doi.org/10.2873/93104>
- United States Geological Survey (USGS). (2013). *Landsat 8 band designations for the Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. <https://www.usgs.gov/media/images/landsat-8-band-designations>
- Wilson, E. H., & Sader, S. A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 385–396. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00318-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00318-2)

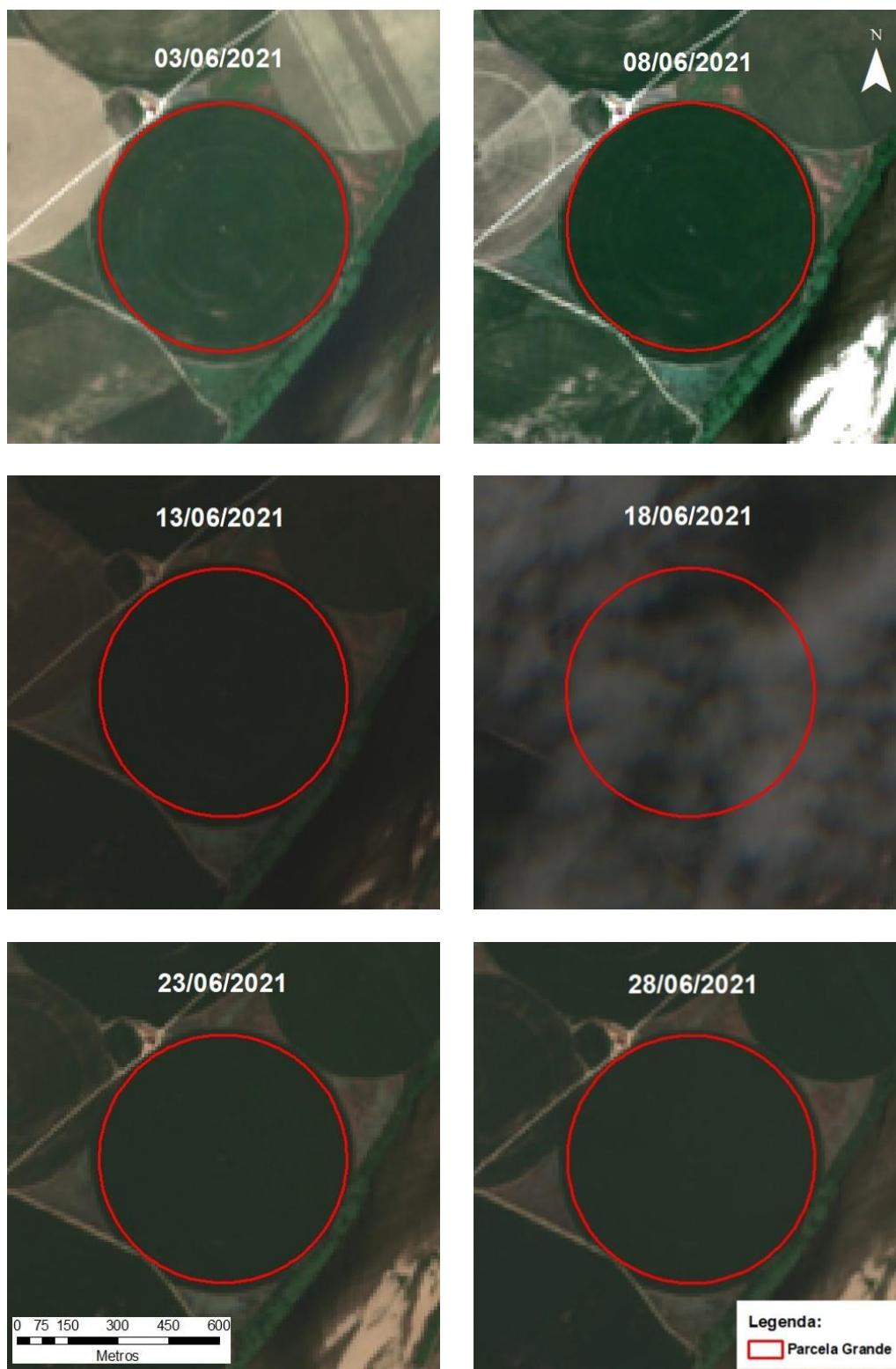
- Xu, H. R., Ying, Y. B., Fu, X. P., & Zhu, S. P. (2007). Near-infrared Spectroscopy in detecting Leaf Miner Damage on Tomato Leaf. *Biosystems Engineering*, *96*(4), 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.01.008>
- ZAGOLSKI, F., PINEL, V., ROMIER, J., ALCAYDE, D., FONTANARI, J., GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P., GIORDANO, G., MARTY, G., MOUGIN, E., & JOFFRE, R. (1996). Forest canopy chemistry with high spectral resolution remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, *17*(6), 1107–1128. <https://doi.org/10.1080/01431169608949073>
- Zhang, K., Ge, X., Shen, P., Li, W., Liu, X., Cao, Q., Zhu, Y., Cao, W., & Tian, Y. (2019). Predicting Rice Grain Yield Based on Dynamic Changes in Vegetation Indexes during Early to Mid-Growth Stages. *Remote Sensing*, *11*(4), 387. <https://doi.org/10.3390/rs11040387>

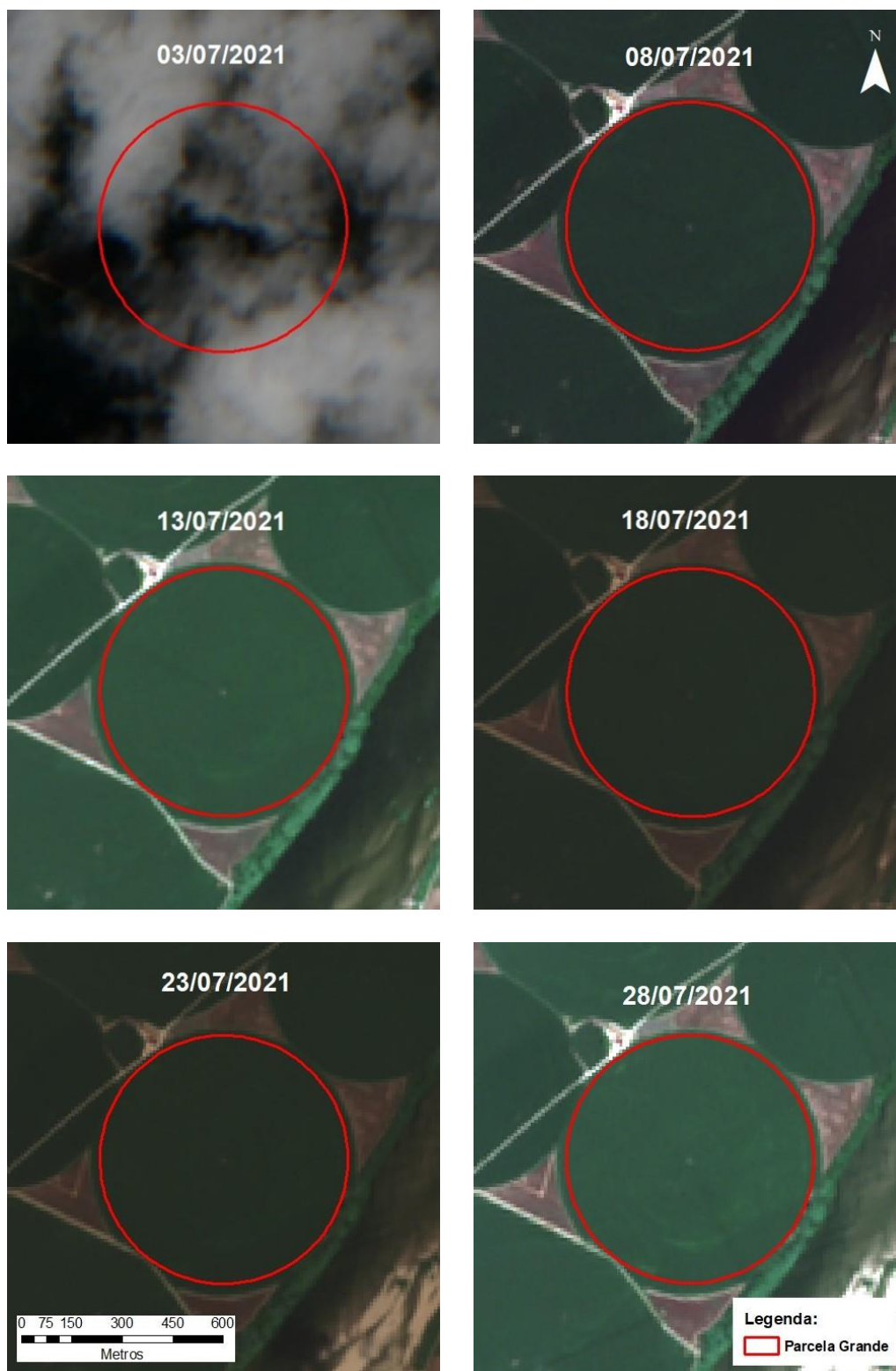
## Anexos

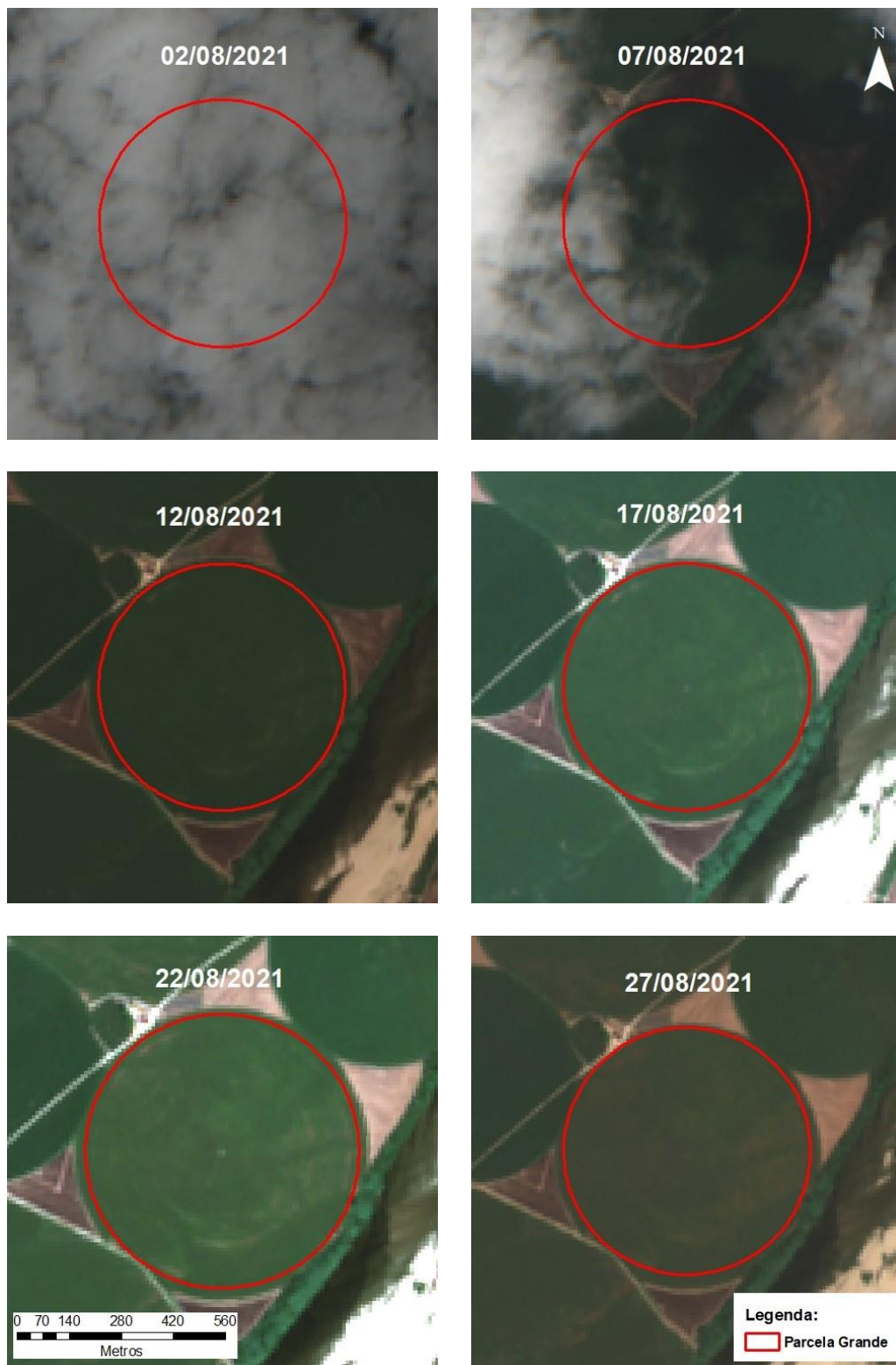
### Anexo 1

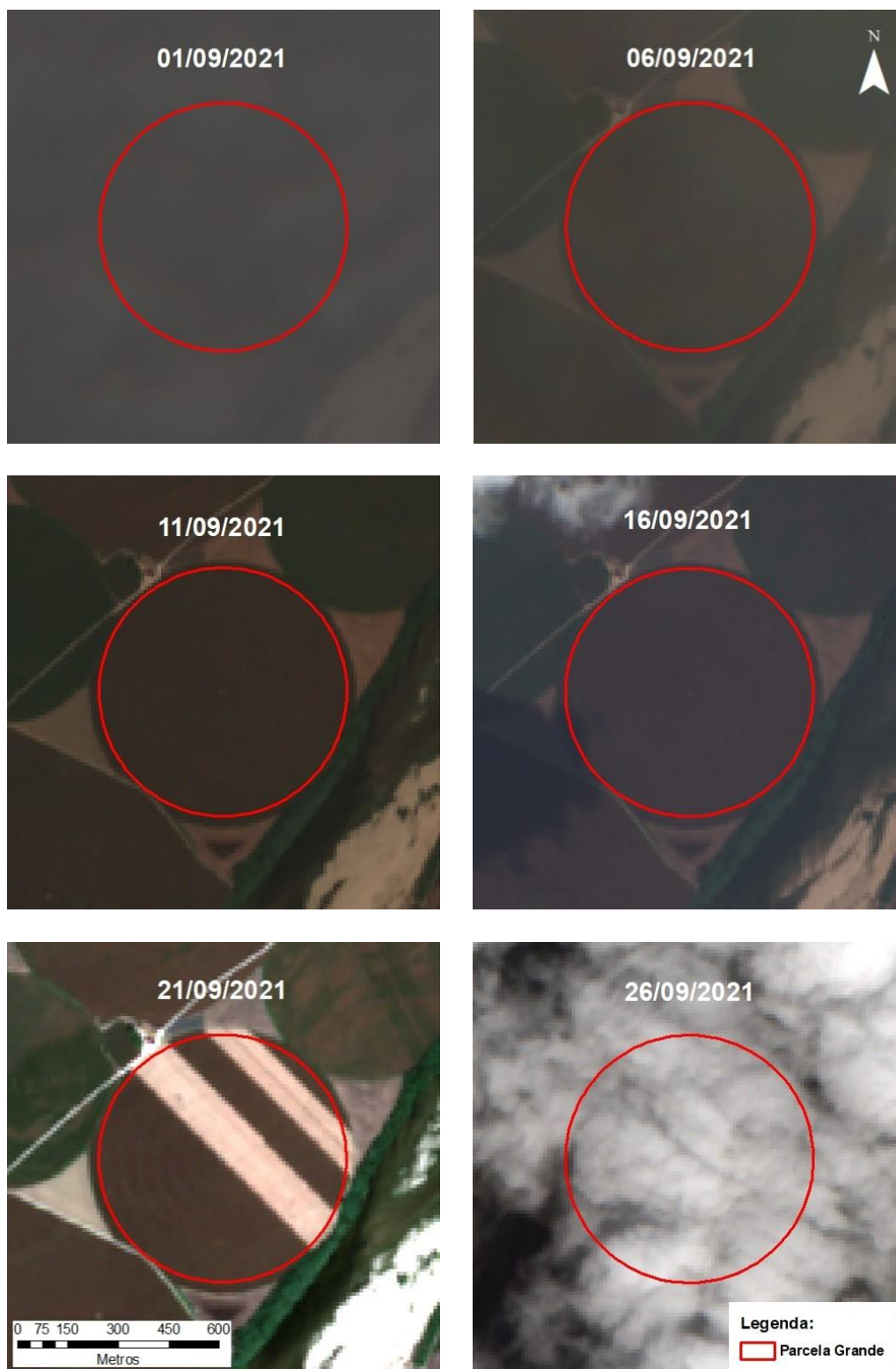
#### Cor Verdadeira - Sentinel-2





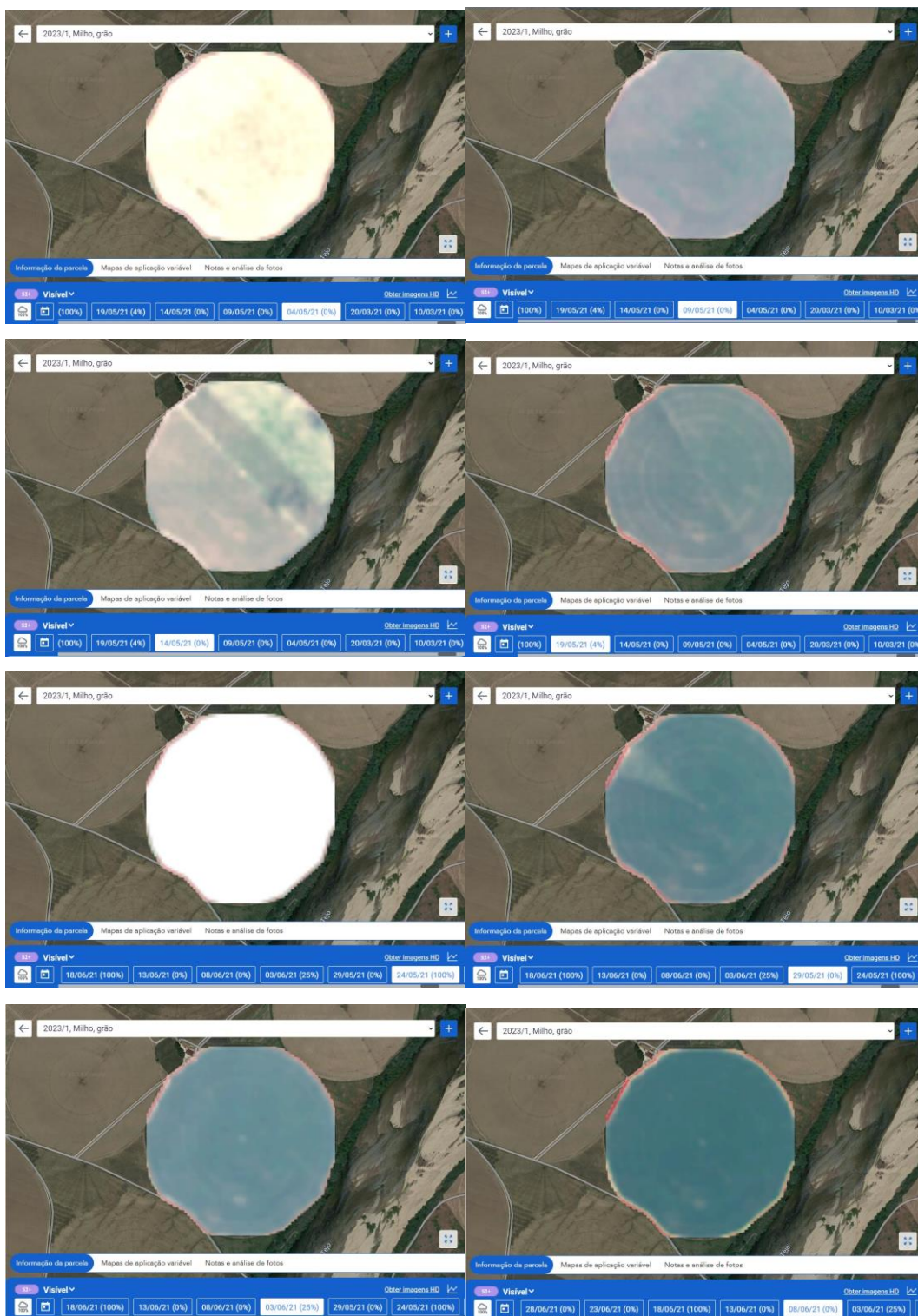


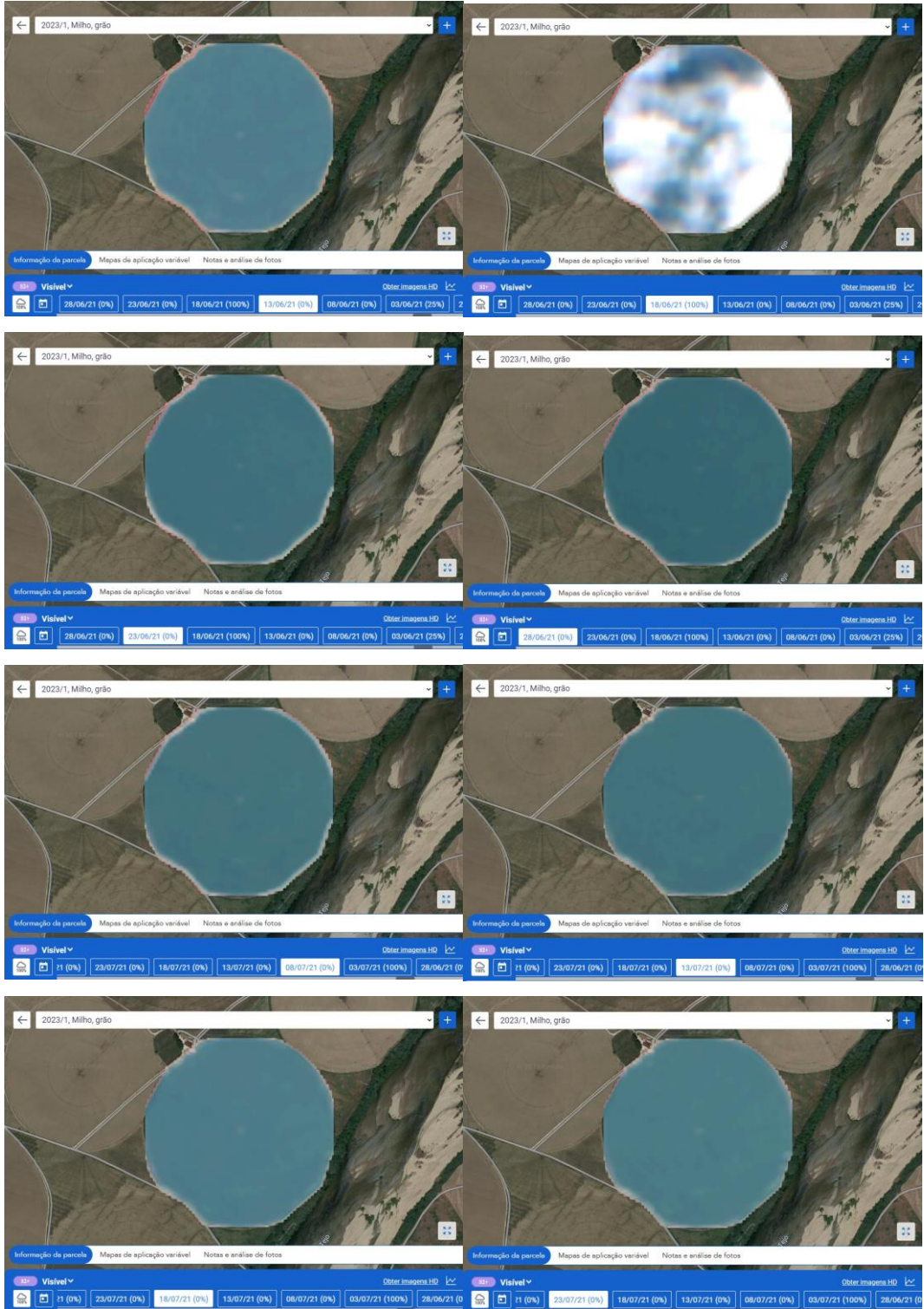


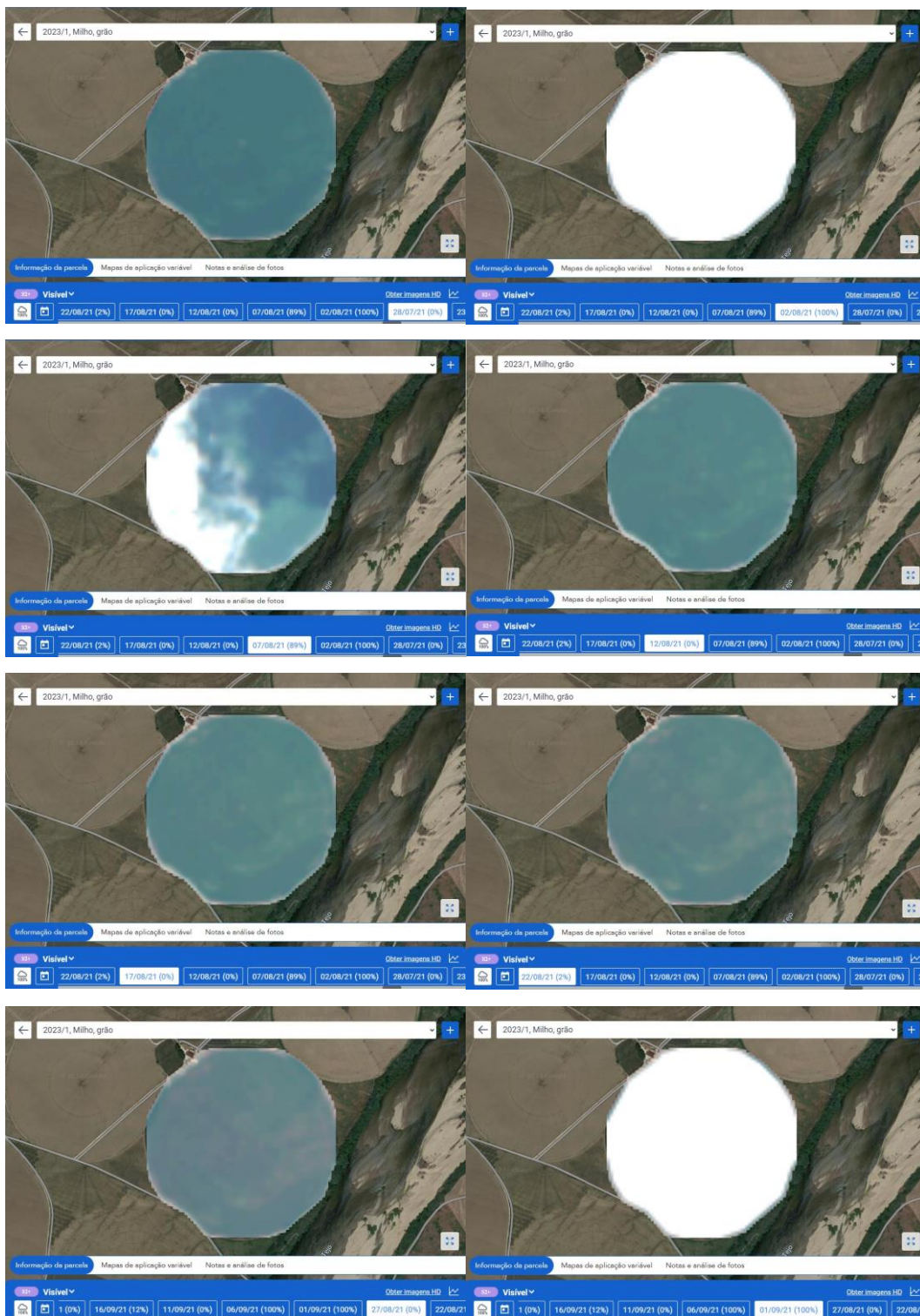


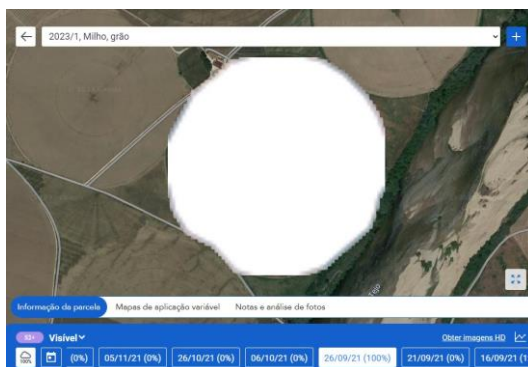
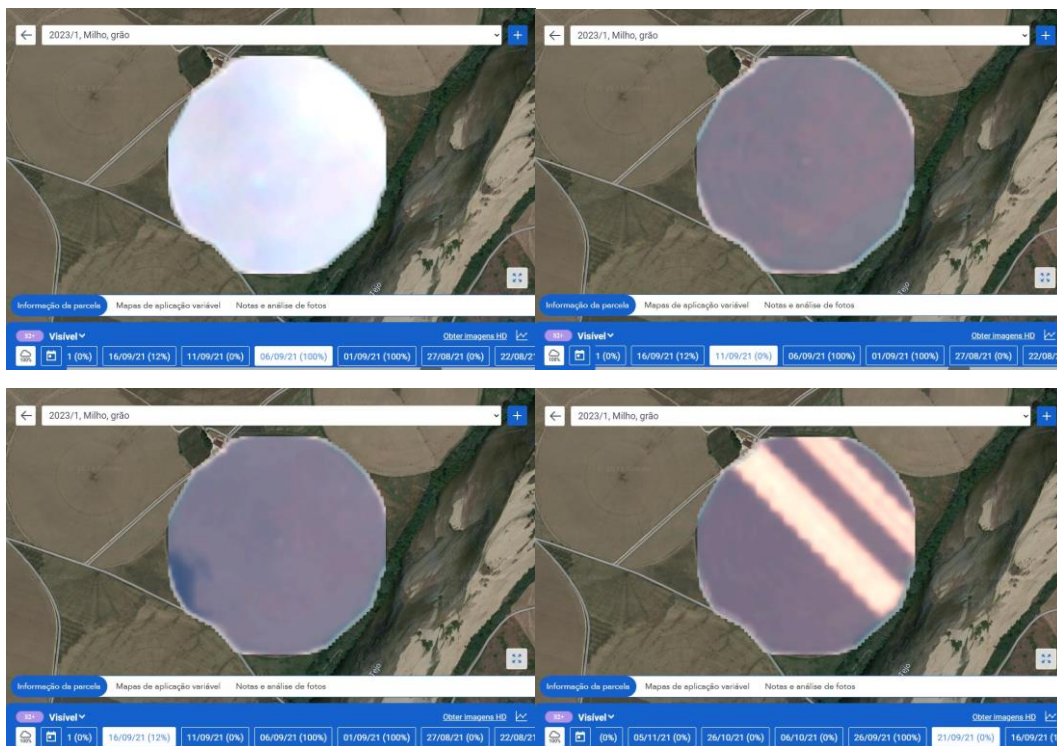
## Anexo 2

### Cor Verdadeira – Plano Avançado



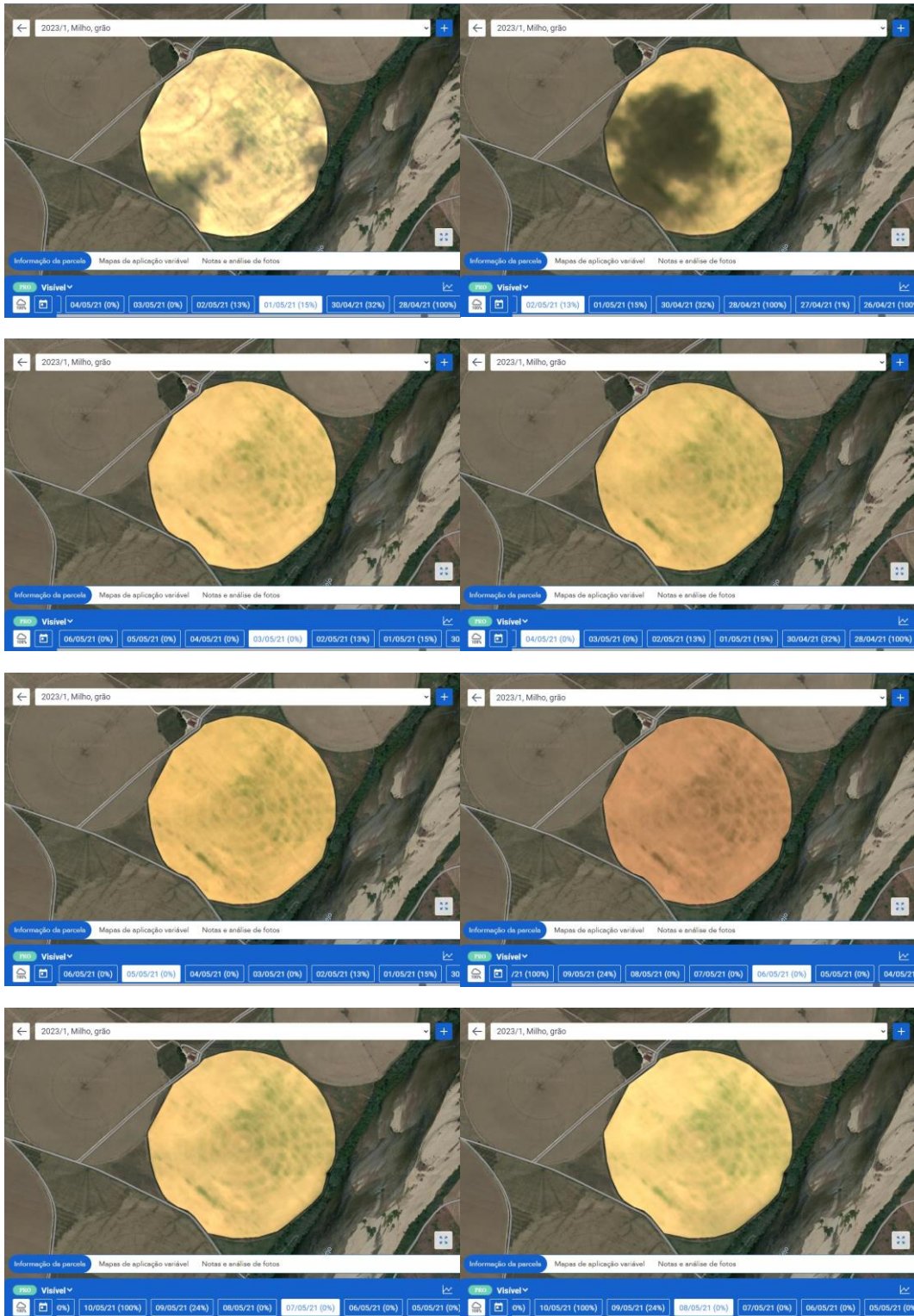


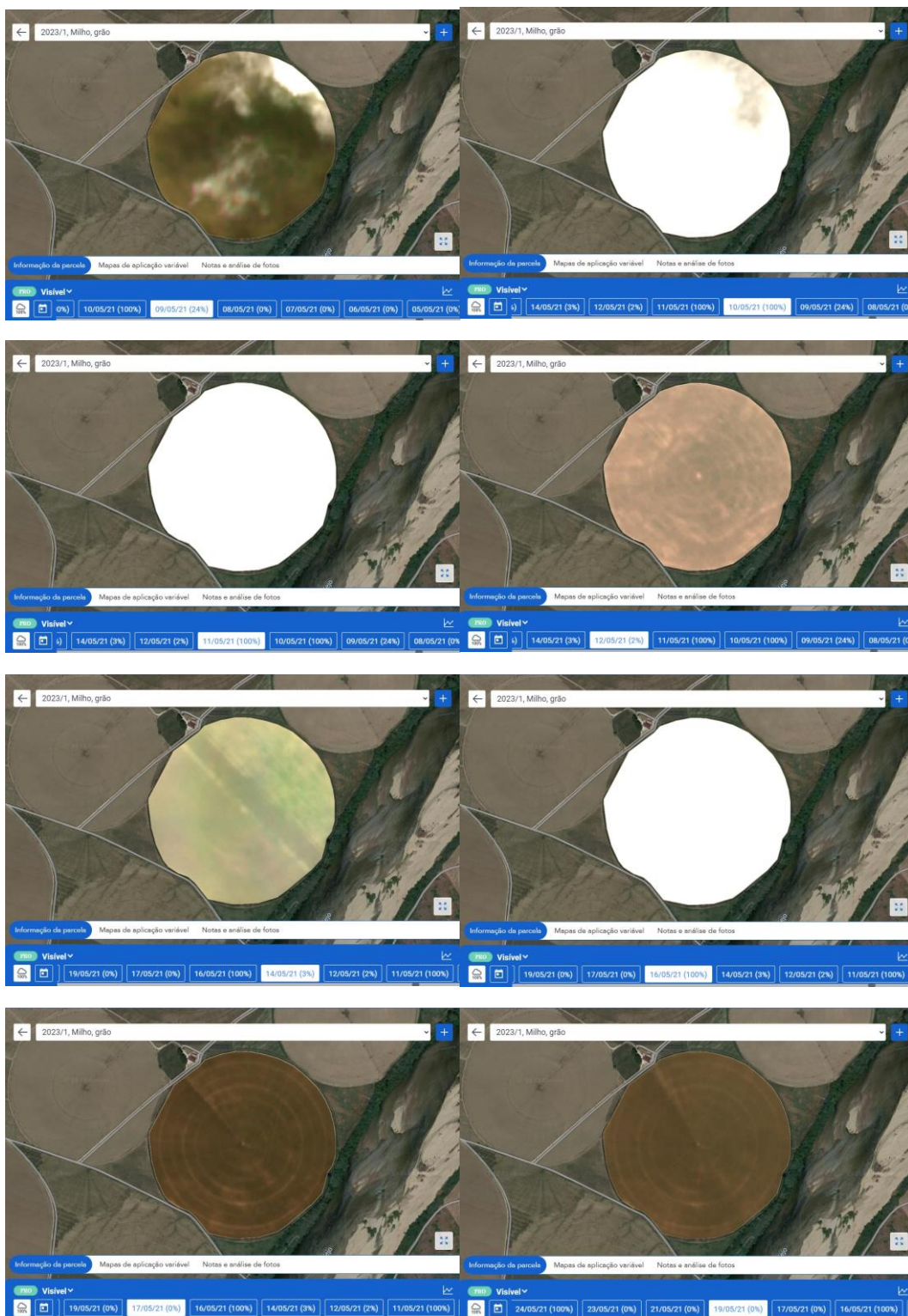


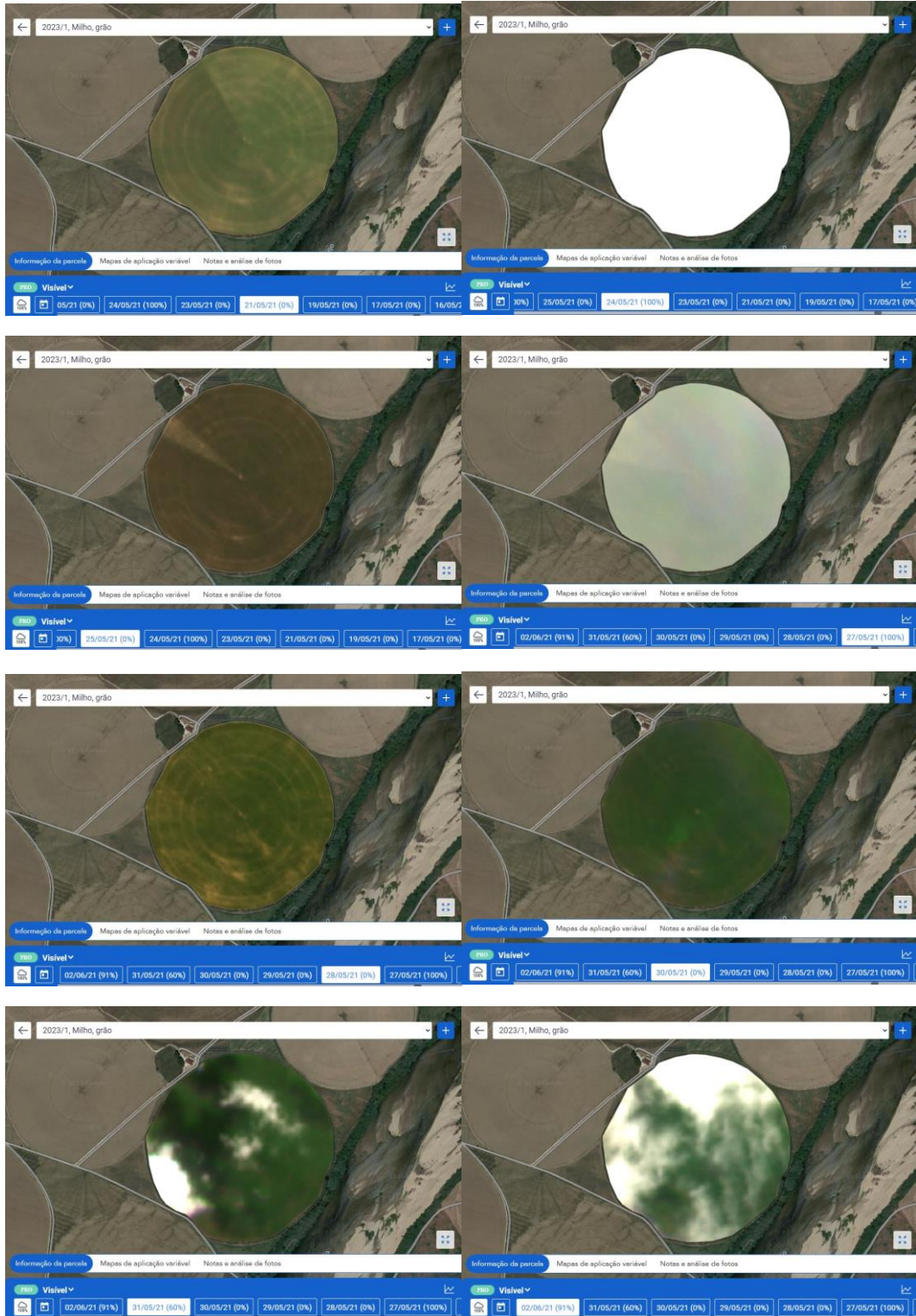


**Anexo 3**

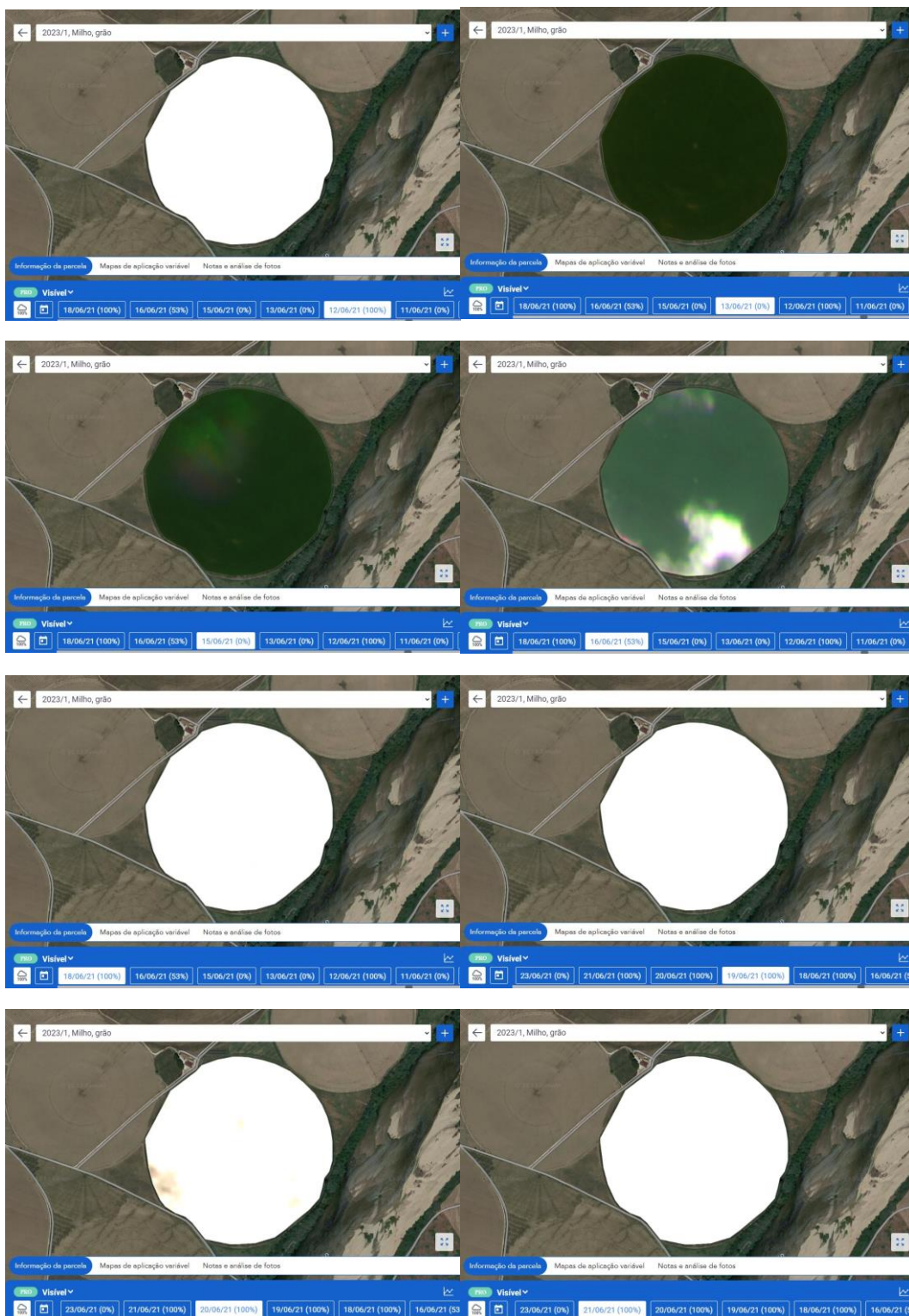
**Cor Verdadeira - Plano Premium**

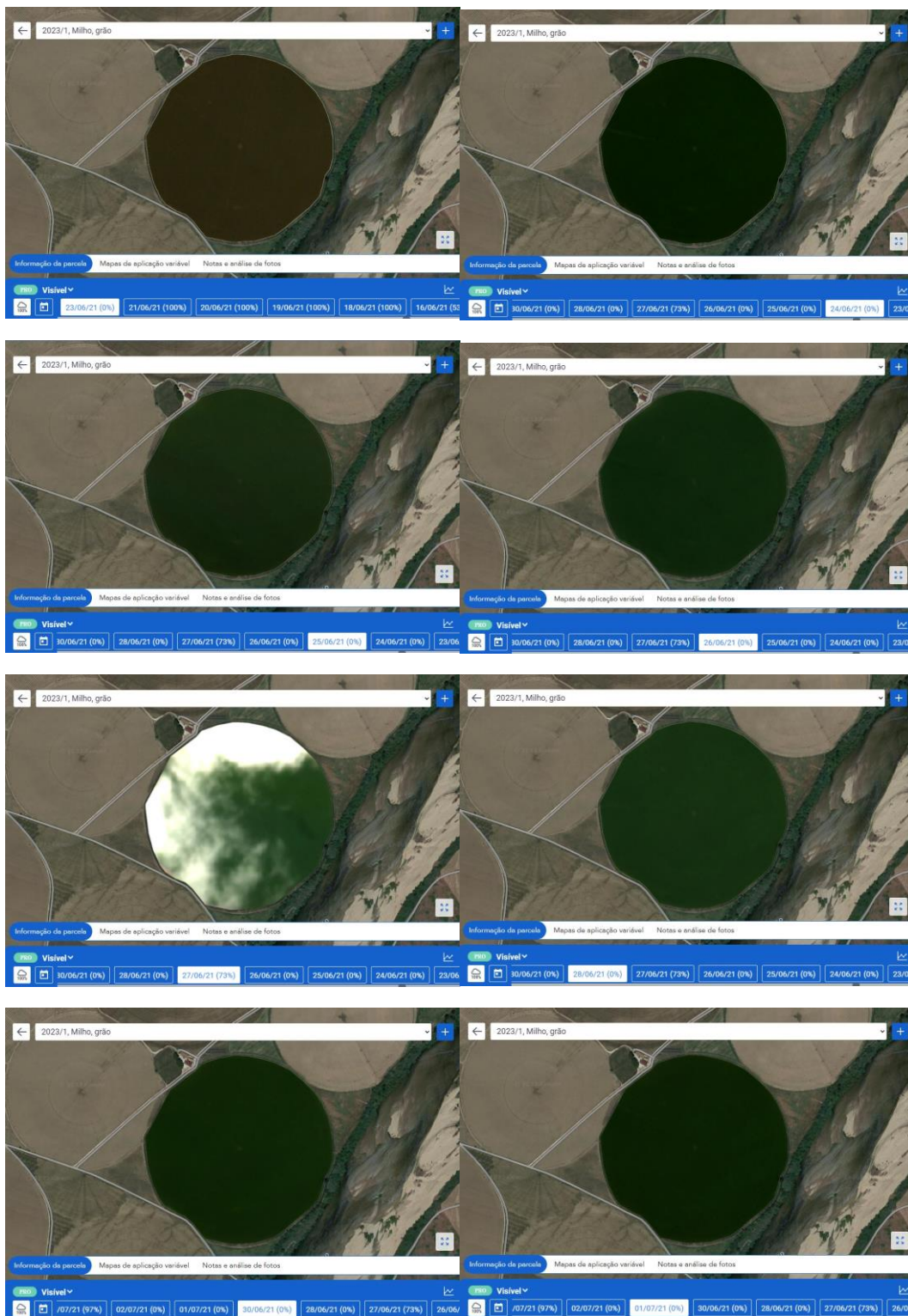


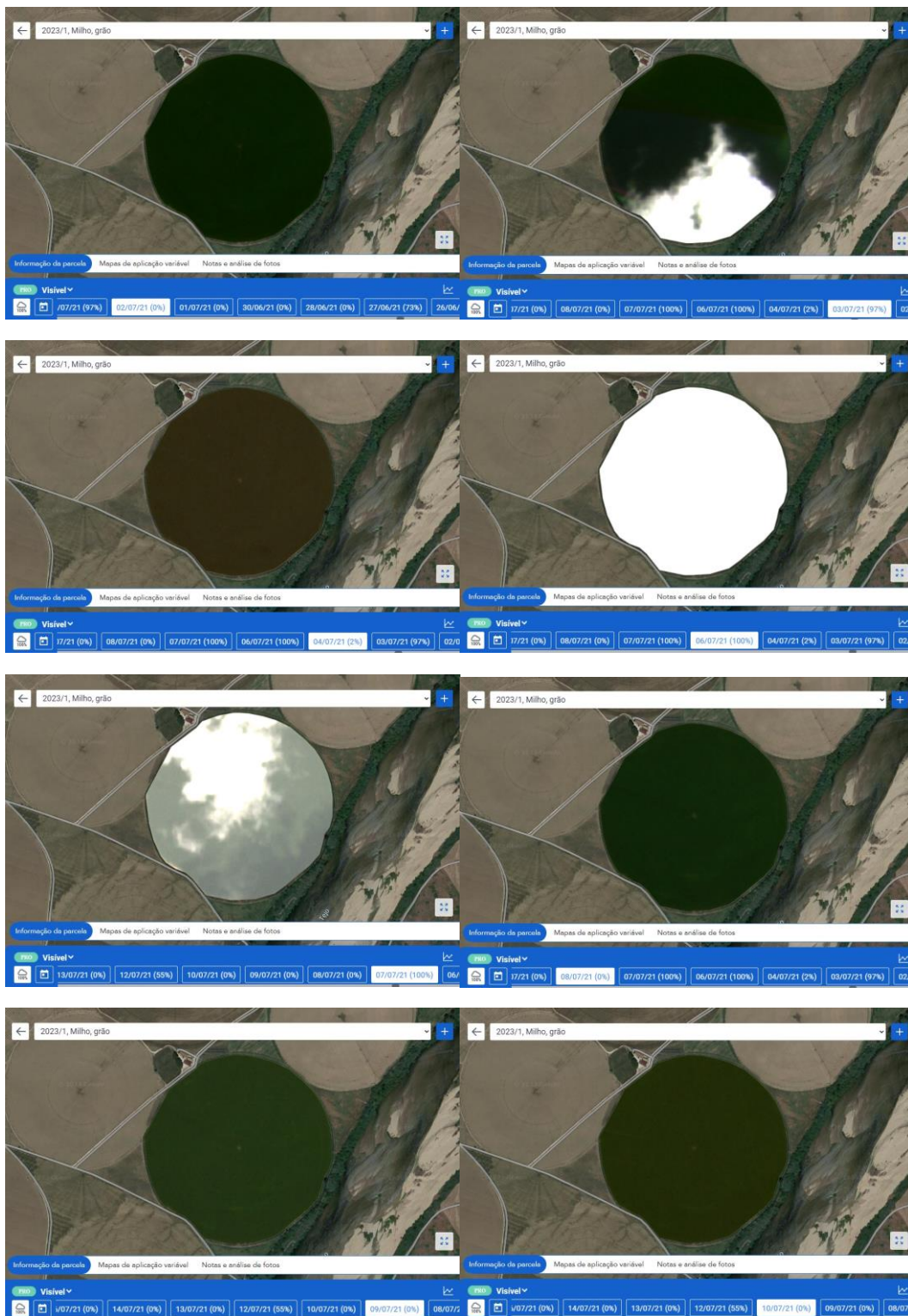


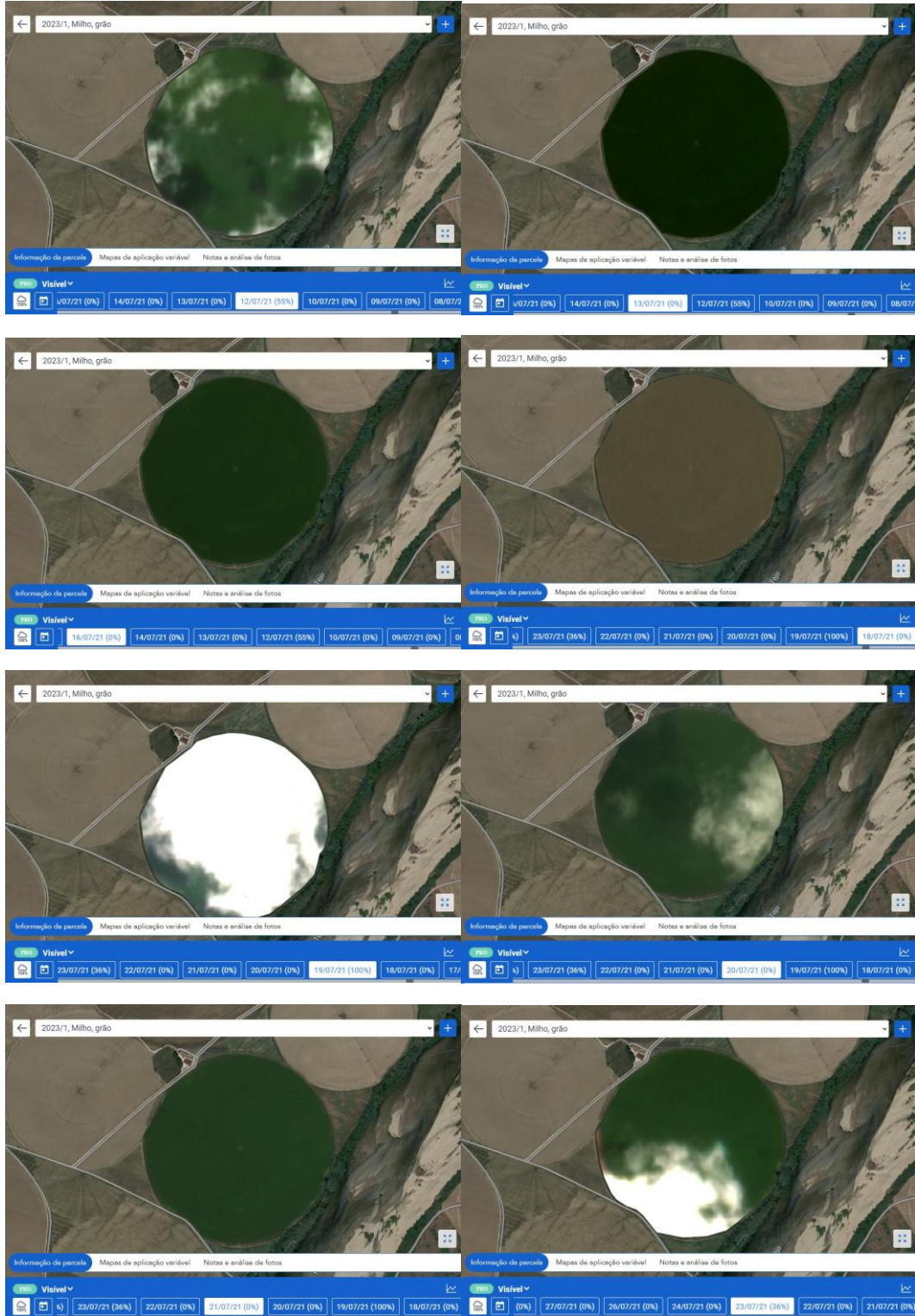




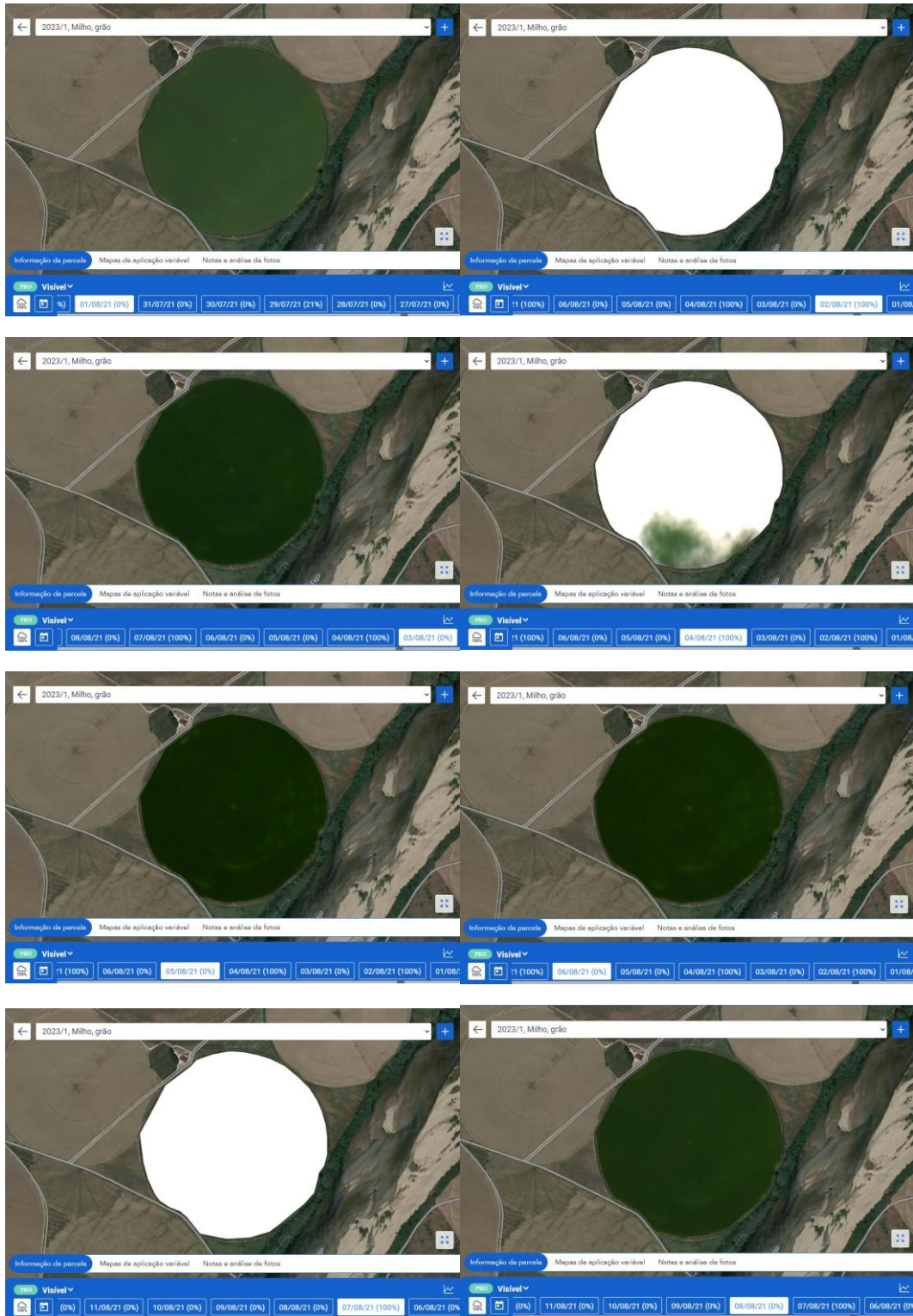


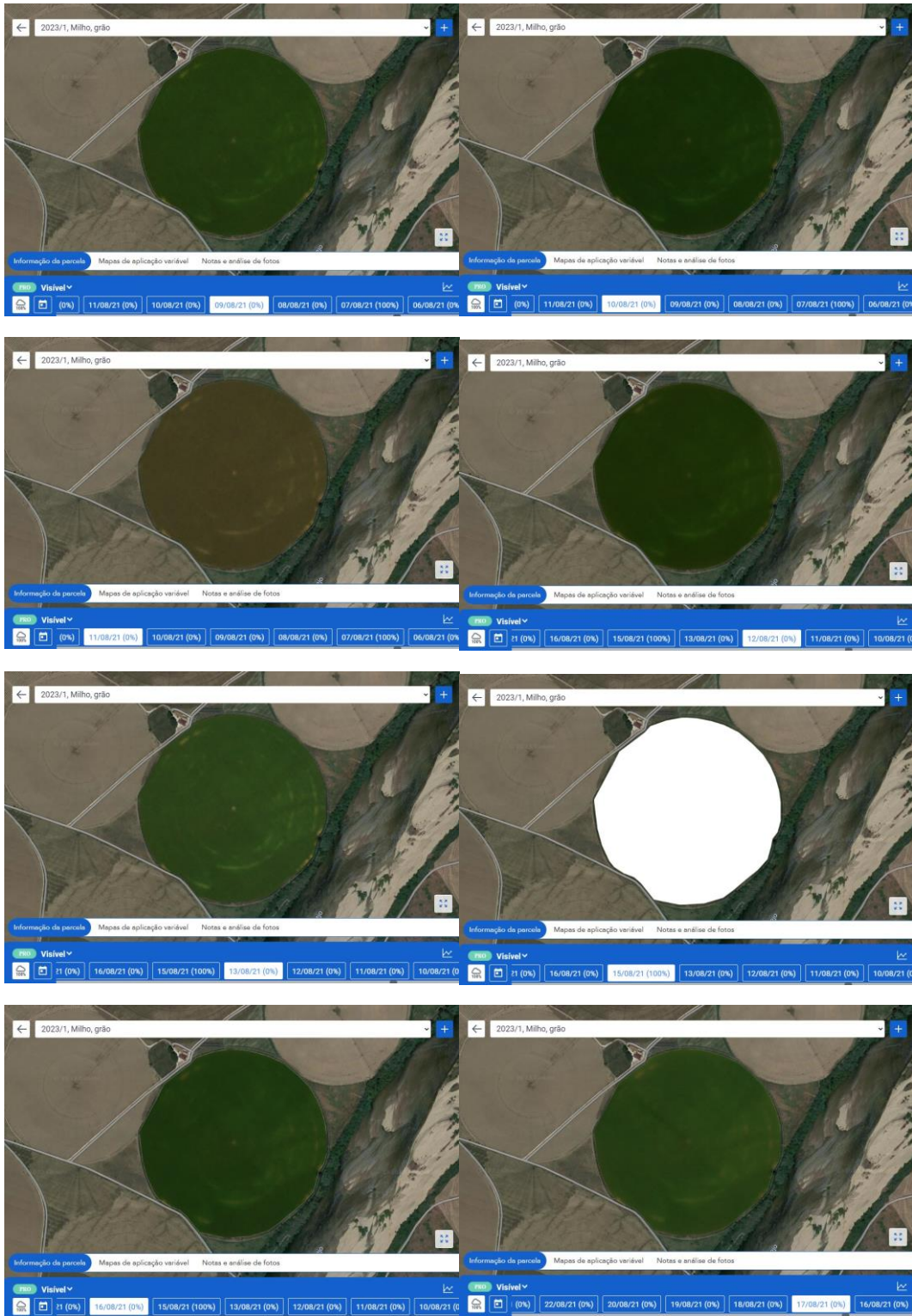


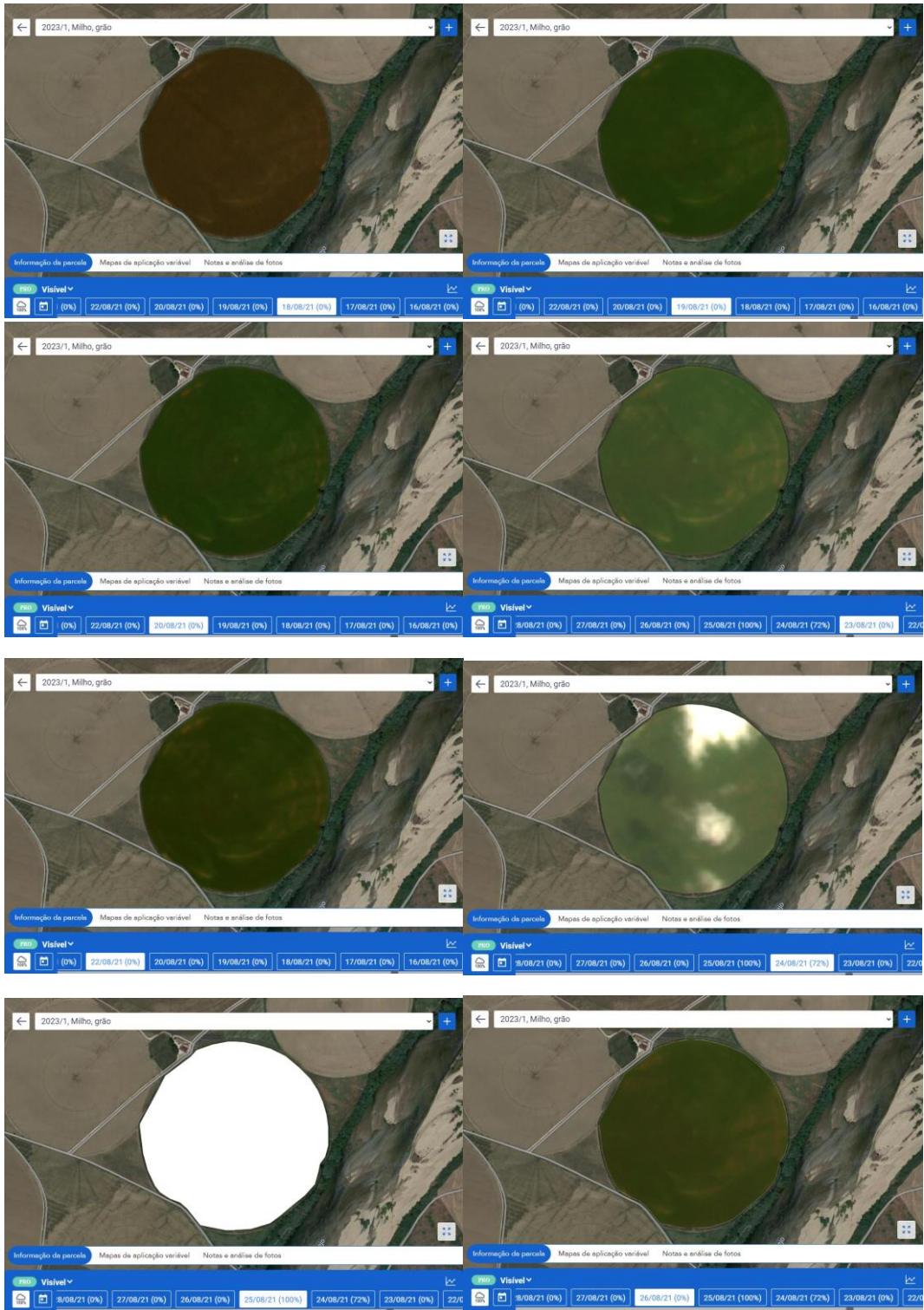


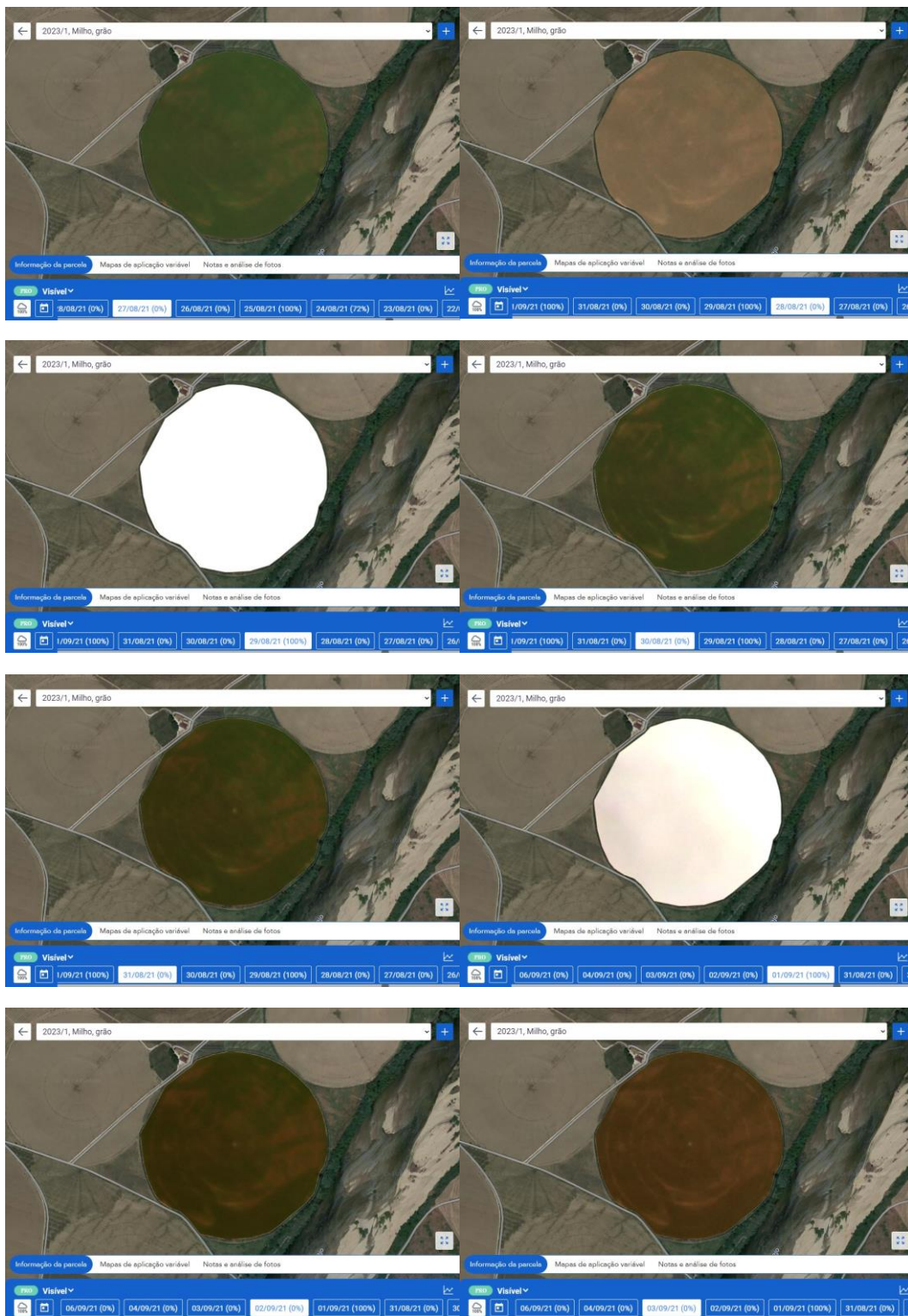


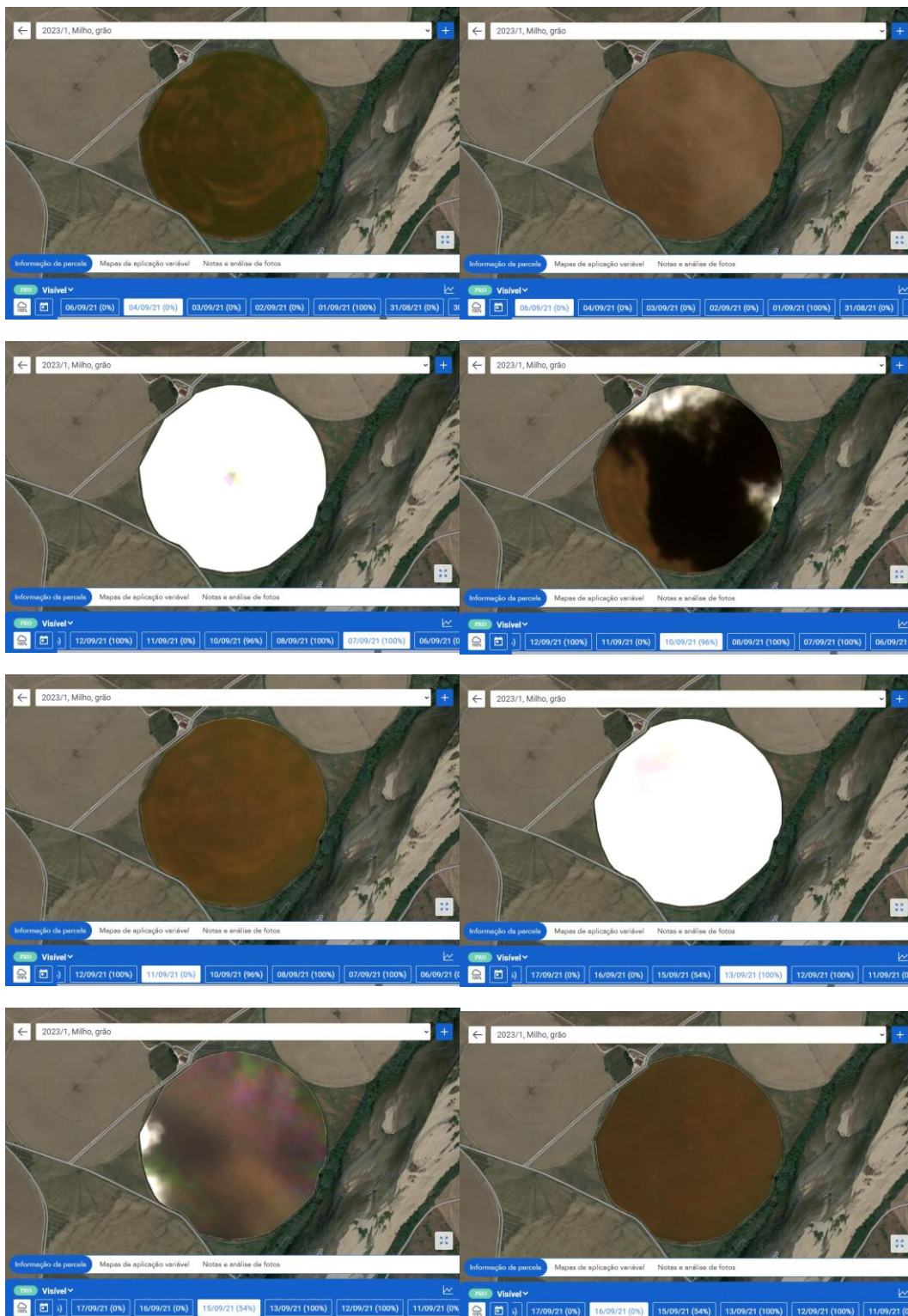


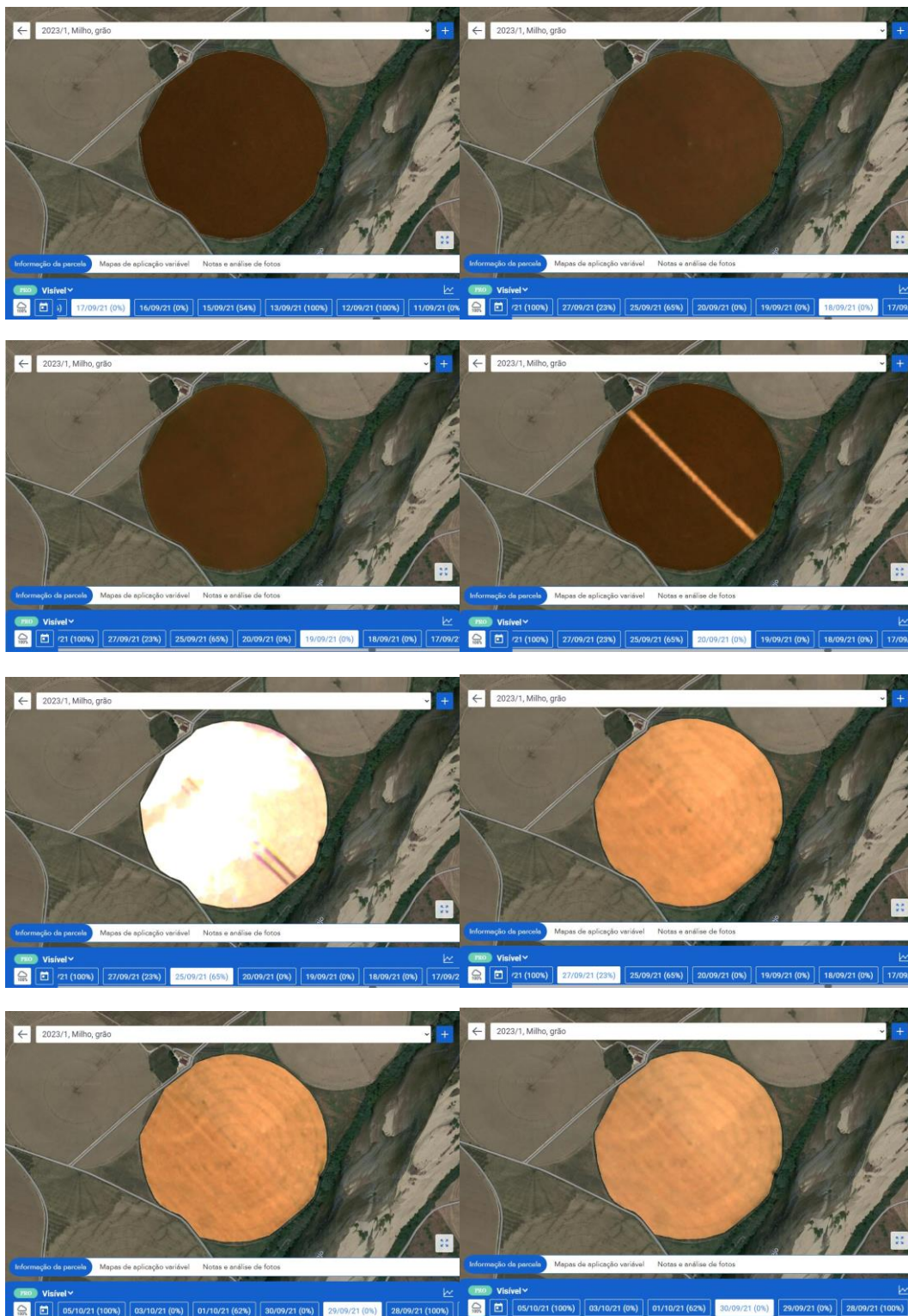






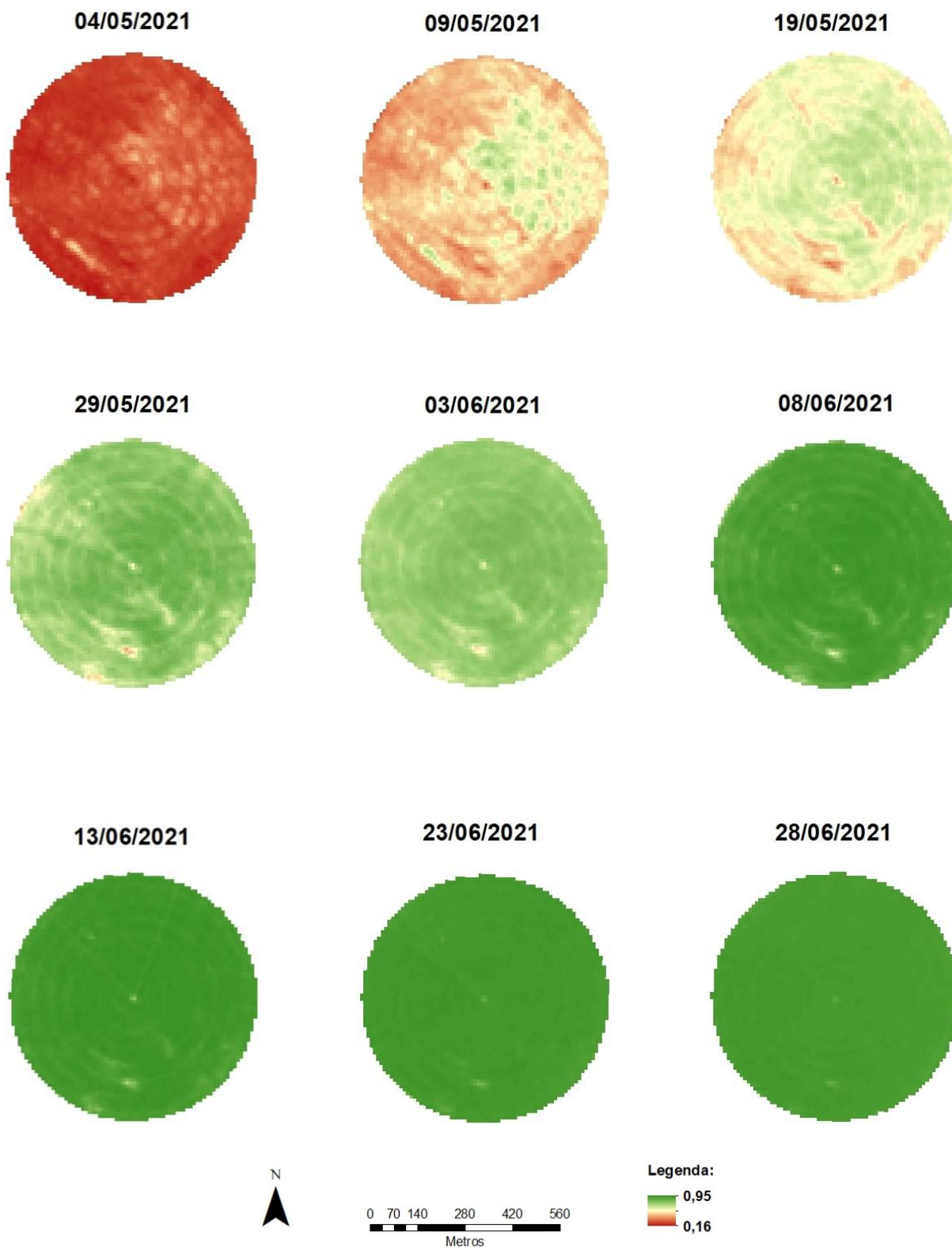






**Anexo 4**

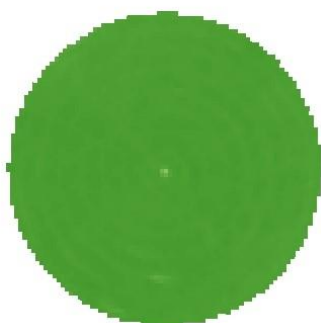
**NDVI ao longo do ciclo cultural (4 de maio – 28 de junho).**



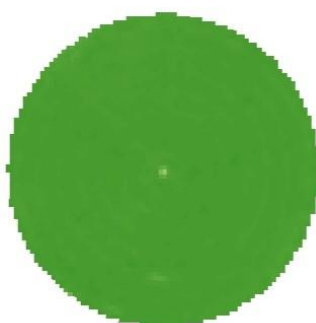
1:  
5  
6

NDVI ao longo do ciclo cultural 8 de julho – 27 de agosto)

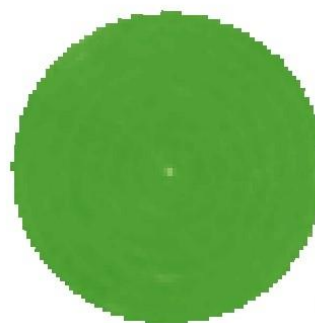
08/07/2021



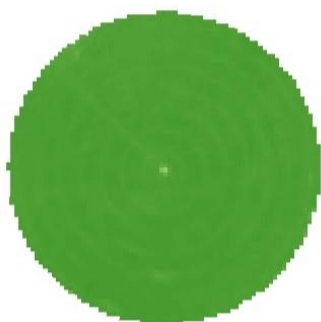
13/07/2021



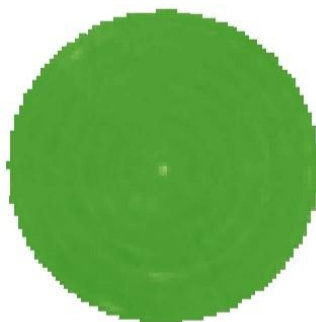
18/07/2021



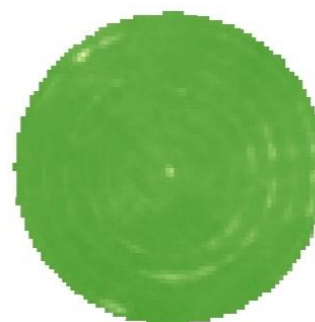
23/07/2021



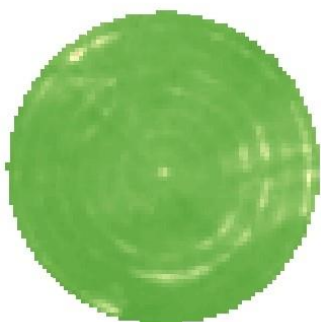
28/07/2021



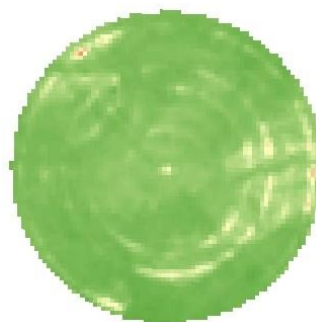
12/08/2021



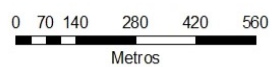
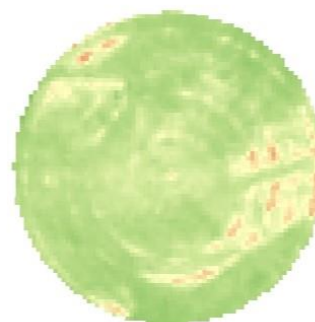
17/08/2021



22/08/2021



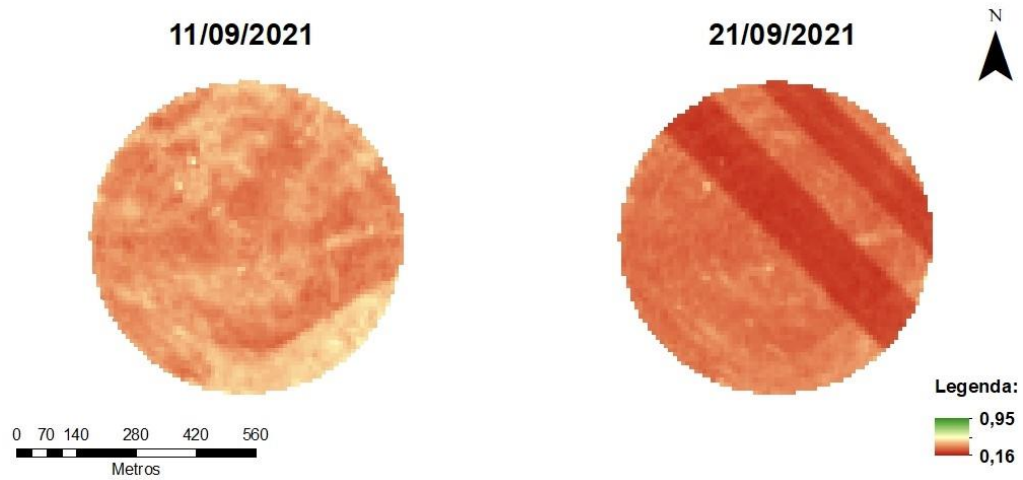
27/08/2021



Legenda:



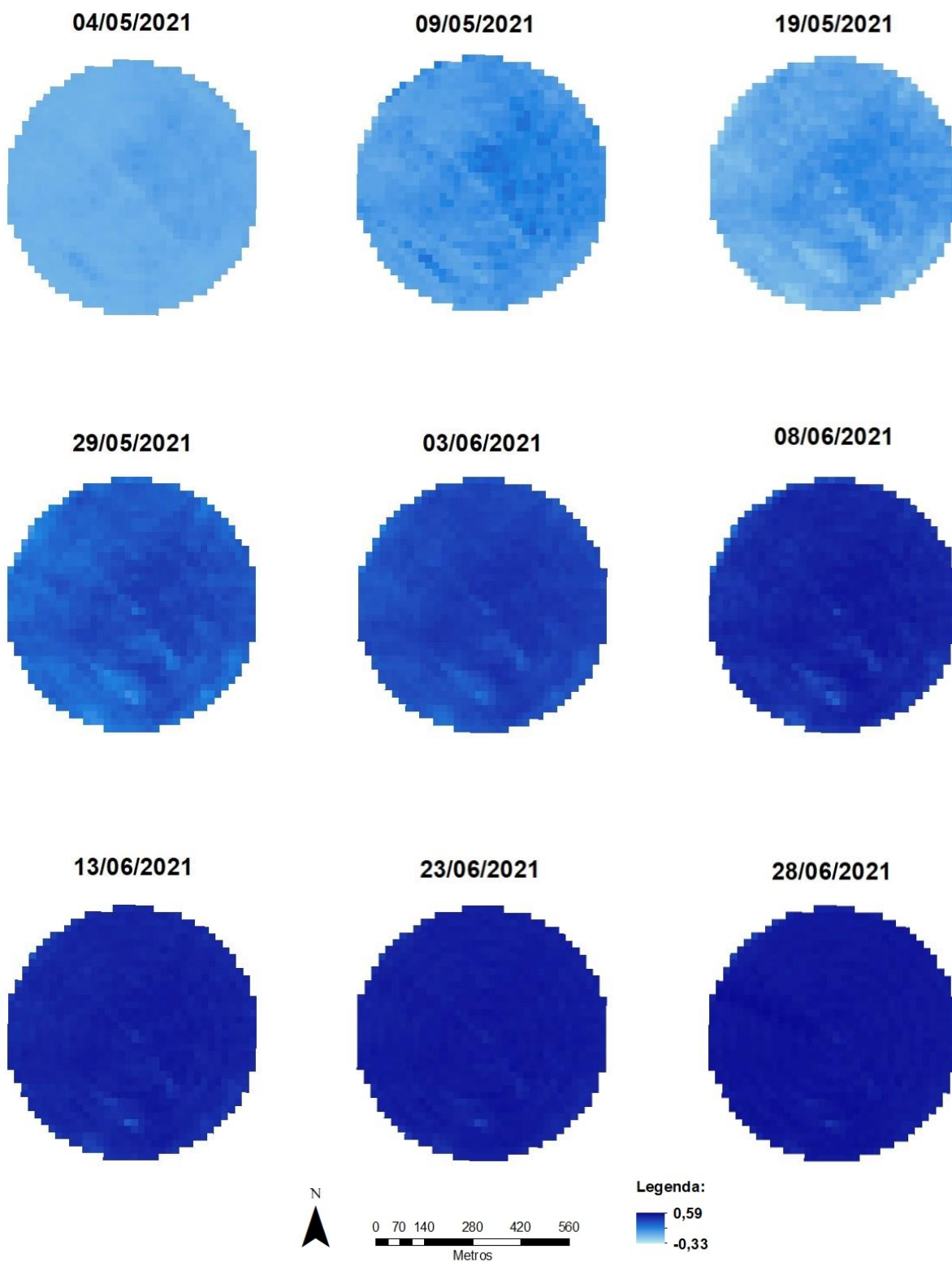
**NDVI ao longo do ciclo cultural (11 de setembro – 21 de setembro)**



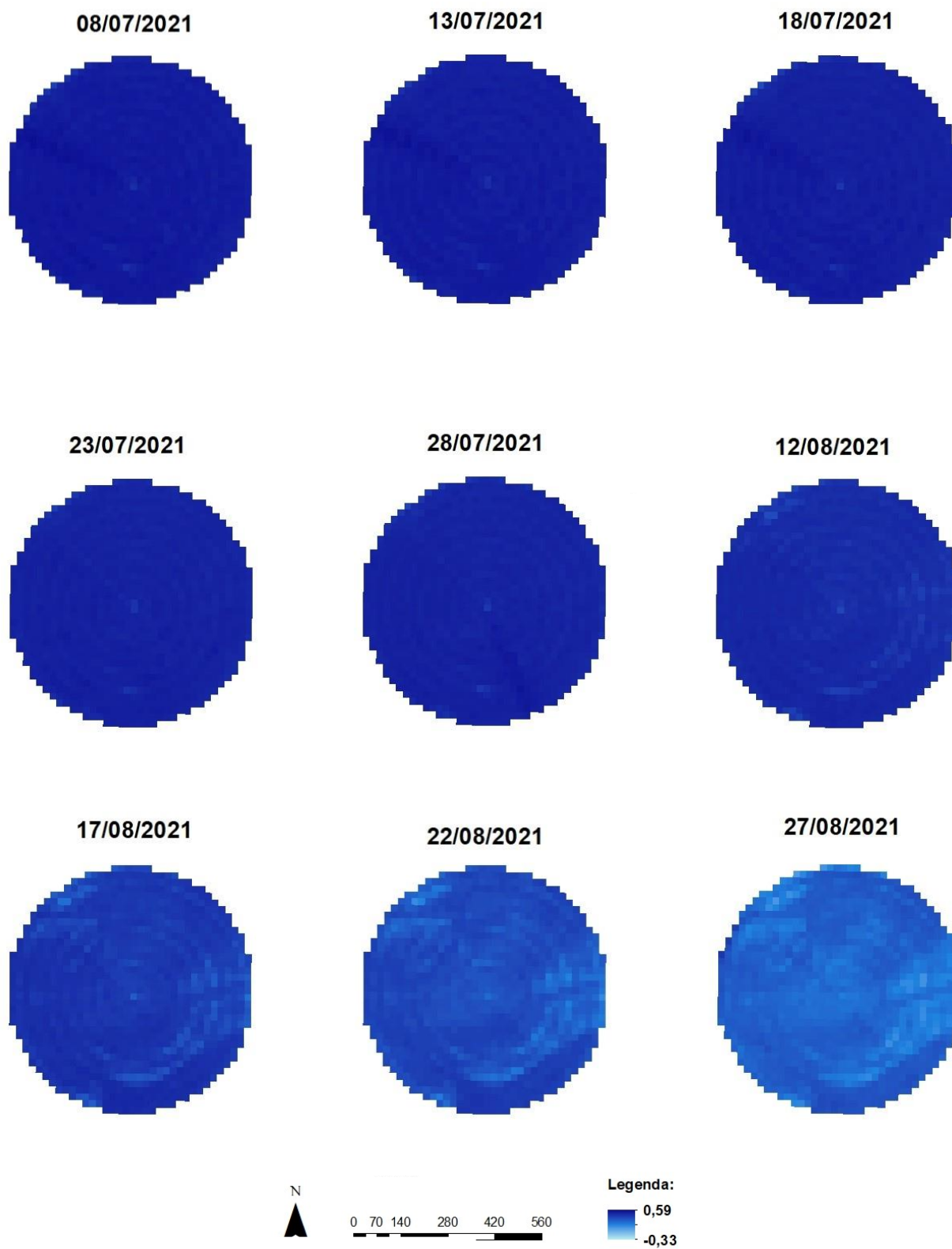
**Resultados do índice NDVI obtidos através do Sentinel-2**

<b>NDVI</b>					
<b>2021</b>		<b>Média</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>maio</b>	<b>4</b>	0.25	0.16	0.50	0.05
	<b>9</b>	0.48	0.27	0.74	0.08
	<b>19</b>	0.58	0.32	0.70	0.06
	<b>29</b>	0.76	0.43	0.86	0.06
<b>junho</b>	<b>3</b>	0.74	0.47	0.81	0.04
	<b>8</b>	0.90	0.59	0.94	0.03
	<b>13</b>	0.92	0.72	0.95	0.02
	<b>23</b>	0.92	0.81	0.93	0.01
	<b>28</b>	0.91	0.85	0.93	0.01
<b>julho</b>	<b>8</b>	0.90	0.77	0.92	0.01
	<b>13</b>	0.91	0.74	0.92	0.01
	<b>18</b>	0.89	0.75	0.92	0.01
	<b>23</b>	0.90	0.75	0.92	0.01
	<b>28</b>	0.89	0.75	0.91	0.01
<b>agosto</b>	<b>12</b>	0.86	0.61	0.89	0.02
	<b>17</b>	0.82	0.49	0.87	0.03
	<b>22</b>	0.77	0.39	0.85	0.05
	<b>27</b>	0.65	0.41	0.77	0.05
<b>setembro</b>	<b>11</b>	0.39	0.29	0.55	0.05
	<b>21</b>	0.30	0.20	0.53	0.05
<b>Valores Limites</b>			0.16	0.95	0.22

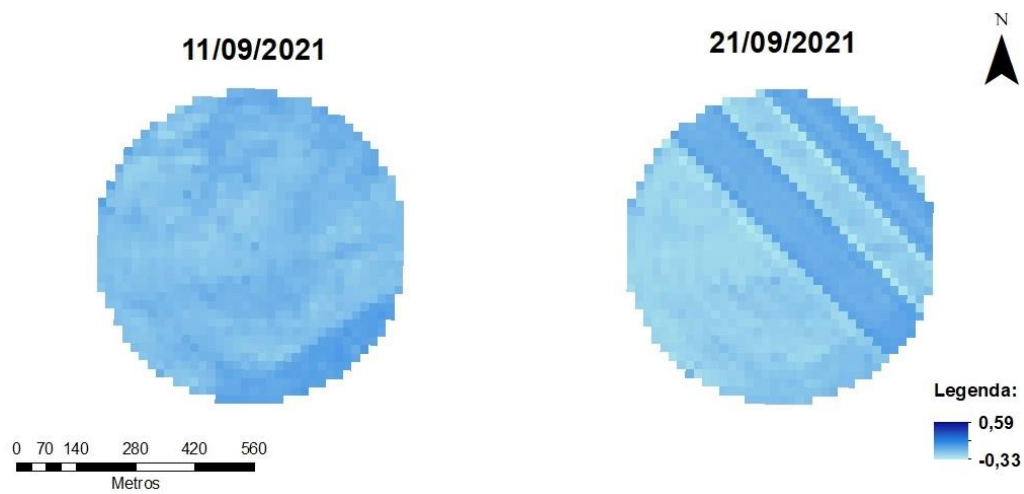
**NDMI ao longo do ciclo cultural (4 de maio – 28 de junho)**



**NDMI ao longo do ciclo cultural (8 de julho – 27 de agosto)**



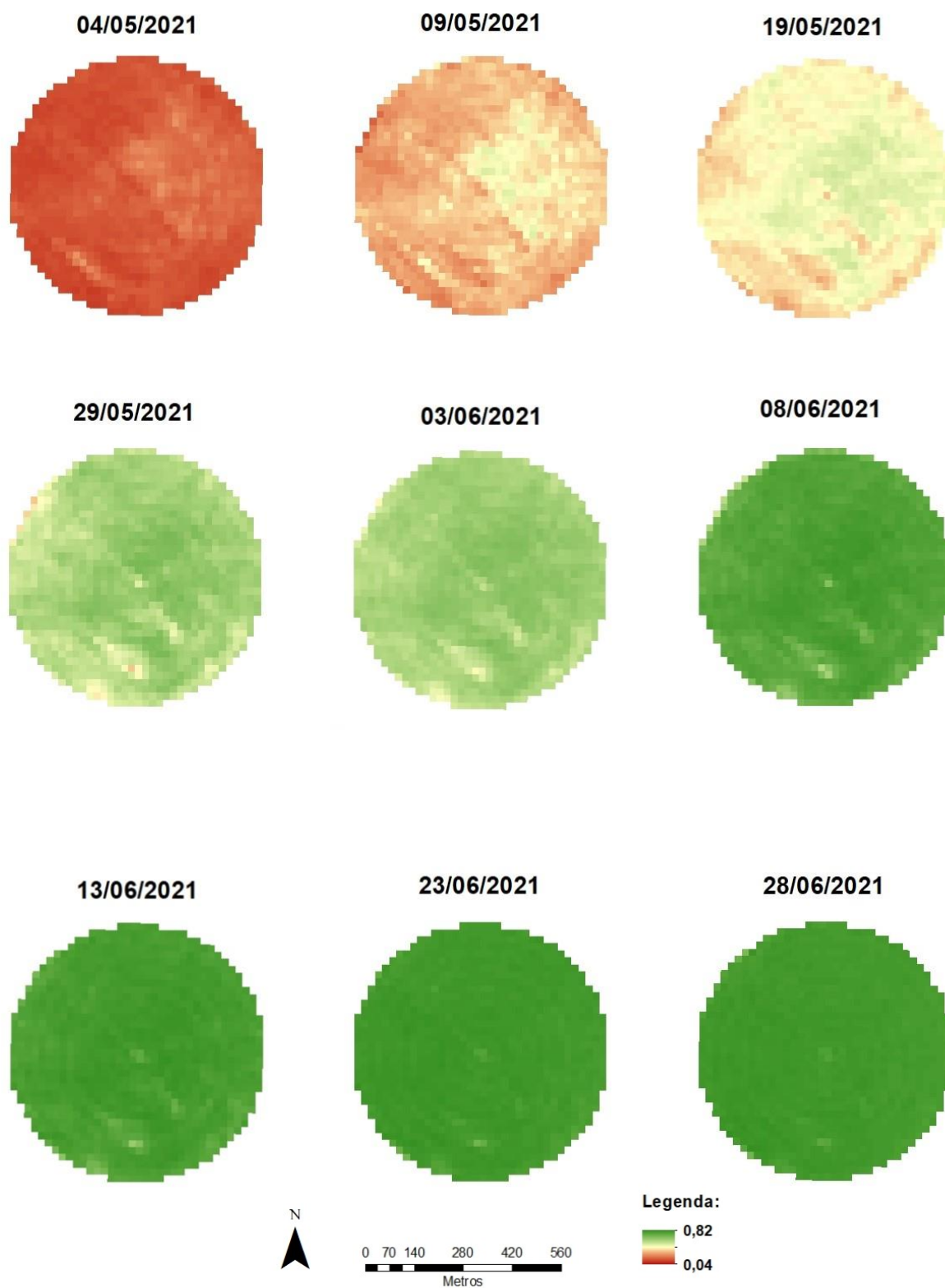
NDMI ao longo do ciclo cultural (11 de setembro – 21 de setembro)



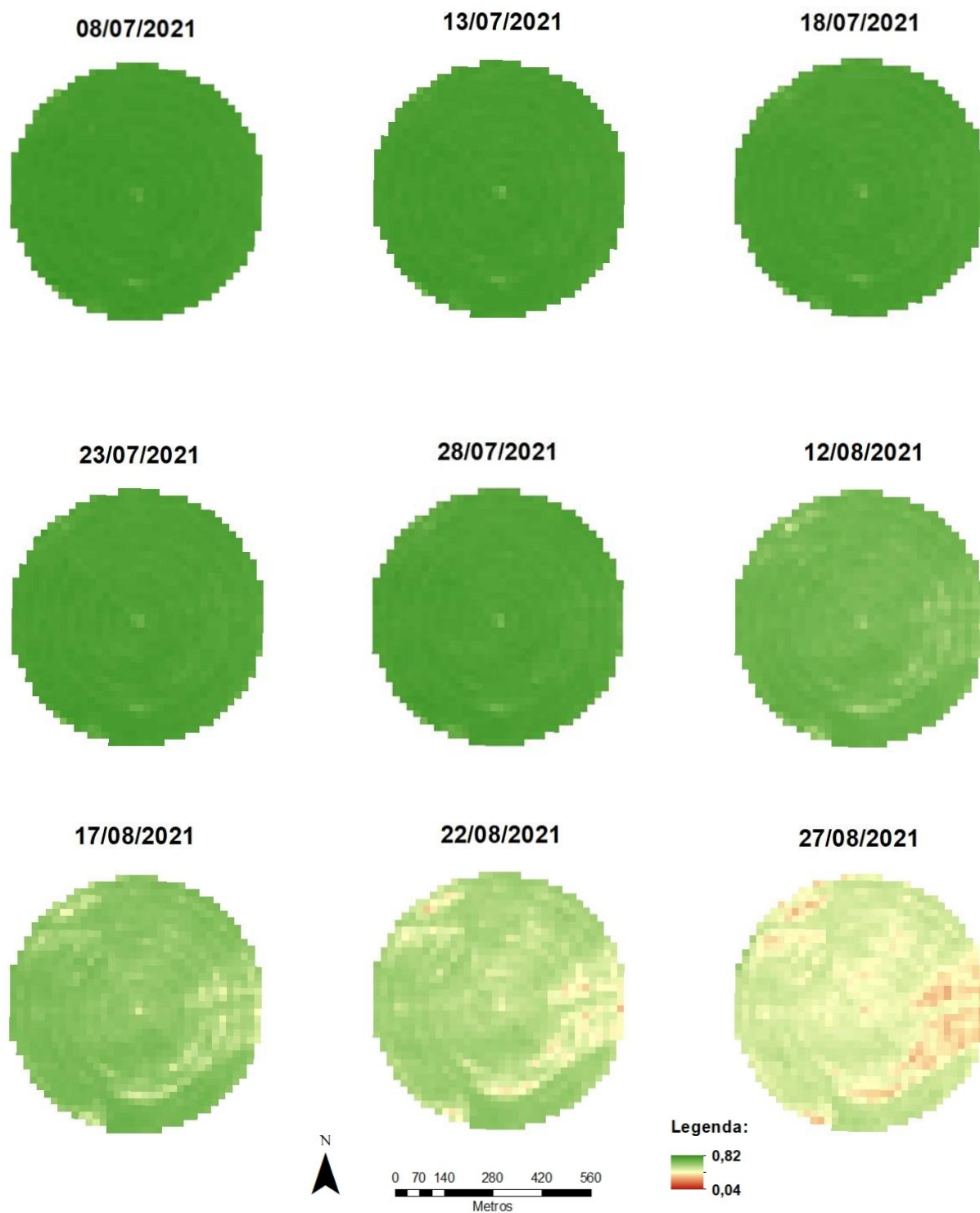
**Resultados do índice NDMI obtidos através do Sentinel-2**

		<b>NDMI</b>			
<b>2021</b>		<b>Média</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>maio</b>	<b>4</b>	-0.06	-0.11	0.02	0.02
	<b>9</b>	0.05	-0.12	0.22	0.06
	<b>19</b>	0.12	-0.07	0.24	0.05
	<b>29</b>	0.28	0.02	0.41	0.06
<b>junho</b>	<b>3</b>	0.36	0.13	0.45	0.05
	<b>8</b>	0.48	0.20	0.55	0.05
	<b>13</b>	0.50	0.28	0.55	0.03
	<b>23</b>	0.53	0.38	0.57	0.02
	<b>28</b>	0.55	0.39	0.59	0.02
<b>julho</b>	<b>8</b>	0.53	0.38	0.57	0.02
	<b>13</b>	0.52	0.41	0.57	0.01
	<b>18</b>	0.51	0.34	0.56	0.02
	<b>23</b>	0.50	0.40	0.53	0.01
	<b>28</b>	0.50	0.36	0.56	0.02
<b>agosto</b>	<b>12</b>	0.46	0.33	0.51	0.02
	<b>17</b>	0.41	0.19	0.48	0.04
	<b>22</b>	0.33	0.08	0.44	0.05
	<b>27</b>	0.24	0.01	0.41	0.06
<b>setembro</b>	<b>11</b>	-0.13	-0.24	0.02	0.05
	<b>21</b>	-0.17	-0.33	0.00	0.08
<b>Valores Limites</b>			-0.33	0.59	0.24

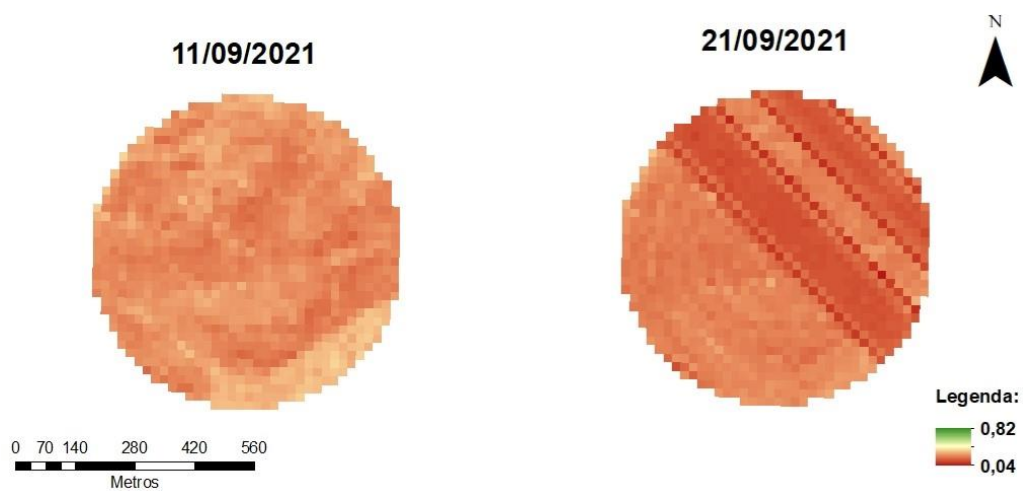
**NDRE ao longo do ciclo cultural (4 de maio – 28 de junho)**



**NDRE ao longo do ciclo cultural (8 de julho – 27 de agosto)**



**NDRE ao longo do ciclo cultural (11 de setembro – 21 de setembro)**



**Resultados do índice NDRE obtidos através do Sentinel-2**

<b>NDRE</b>					
<b>2021</b>		<b>Média</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>maio</b>	<b>4</b>	0.15	0.09	0.26	0.03
	<b>9</b>	0.33	0.14	0.49	0.06
	<b>19</b>	0.42	0.27	0.52	0.04
	<b>29</b>	0.58	0.33	0.68	0.05
<b>junho</b>	<b>3</b>	0.60	0.42	0.67	0.04
	<b>8</b>	0.75	0.51	0.80	0.03
	<b>13</b>	0.78	0.61	0.82	0.02
	<b>23</b>	0.80	0.69	0.82	0.01
	<b>28</b>	0.79	0.68	0.82	0.01
<b>julho</b>	<b>8</b>	0.79	0.69	0.81	0.01
	<b>13</b>	0.78	0.69	0.80	0.01
	<b>18</b>	0.77	0.67	0.79	0.01
	<b>23</b>	0.77	0.67	0.79	0.01
	<b>28</b>	0.76	0.67	0.79	0.01
<b>agosto</b>	<b>12</b>	0.69	0.52	0.74	0.03
	<b>17</b>	0.63	0.42	0.71	0.04
	<b>22</b>	0.56	0.32	0.65	0.05
	<b>27</b>	0.47	0.29	0.61	0.05
<b>setembro</b>	<b>11</b>	0.25	0.16	0.36	0.04
	<b>21</b>	0.19	0.04	0.34	0.05
<b>Valores Limites</b>			0.04	0.82	0.22

**Anexo 5**
**Teste de Significância da Regressão NDVI/NDMI**

<b>Estatística de regressão</b>	
<b>R múltiplo</b>	0,983441
<b>Quadrado de R</b>	0,967156
<b>Quadrado de R ajustado</b>	0,965331
<b>Erro-padrão</b>	0,041233
<b>Observações</b>	20

<b>ANOVA</b>					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>
<b>Regressão</b>	1	0,901165	0,901165	530,0464	8,37E-15
<b>Residual</b>	18	0,030603	0,0017		
<b>Total</b>	19	0,931768			

	<b>Coeficientes</b>	<b>Erro-padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor P</b>	<b>95% inferior</b>	<b>95% superior</b>	<b>Inferior 95,0%</b>	<b>Superior 95,0%</b>
<b>Interceptar</b>	0,439376	0,015899	27,6351	3,41E-16	0,405973	0,472779	0,405973	0,472779
<b>Variável X 1</b>	0,912623	0,03964	23,02274	8,37E-15	0,829342	0,995903	0,829342	0,995903

**Teste de Significância da Regressão NDRE/NDMI**

<b>Estatística de regressão</b>	
<b>R múltiplo</b>	0,98609
<b>Quadrado de R</b>	0,97237
<b>Quadrado de R ajustado</b>	0,97084
<b>Erro-padrão</b>	0,04075
<b>Observações</b>	20

<b>ANOVA</b>					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>
<b>Regressão</b>	1	1,052094	1,052094	633,5247	1,76E-15
<b>Residual</b>	18	0,029893	0,001661		
<b>Total</b>	19	1,081987			

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro-padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor P</b>	<b>95% inferior</b>	<b>95% superior</b>	<b>Inferior 95,0%</b>	<b>Superior 95,0%</b>
<b>Intercetar</b>	-0,31026	0,026899	-11,5342	9,52E-10	-0,36678	-0,25375	-0,36678	-0,25375
<b>Variável X 1</b>	1,073758	0,04266	25,16992	1,76E-15	0,984132	1,163384	0,984132	1,163384