



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

---

## **ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

### **Utilidade agronómica dos índices NDVI e NDWI obtidos por imagens dos satélites Sentinel-2: estudos de caso nas culturas de Trigo, Brócolo e Arroz**

Francisco José Mendonça Marques

Professor Doutor José Rafael Marques da Silva

**Mestrado em Engenharia Agronómica**

Dissertação

Évora, 2018



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

---

## **ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

### **Utilidade agronómica dos índices NDVI e NDWI obtidos por imagens dos satélites Sentinel-2: estudos de caso nas culturas de Trigo, Brócolo e Arroz**

Francisco José Mendonça Marques

Professor Doutor José Rafael Marques da Silva

**Mestrado em Engenharia Agronómica**

Dissertação

Évora, 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Um sincero agradecimento a todos os que me acompanharam durante o meu percurso académico.

Ao Professor José Rafael pelo acompanhamento dado ao longo desta dissertação e pelos conselhos que seguramente me fizeram pensar de outra forma.

À Agroinsider e ao projecto "INNOACE" pelo apoio e fornecimento de todos os dados indispensáveis à realização desta tese.

Pela preciosa ajuda, constante motivação, disponibilidade para trocar ideias e dicas valiosas, um enorme agradecimento ao Luís Paixão.

Ao Cláudio Santos, Diogo Varregoso, Luís Machado e Mariana Machado pelo facto de cada um, à sua maneira, terem contribuído para a realização desta dissertação.

E finalmente, à minha família, quero demonstrar a minha inestimável gratidão pelo constante apoio incondicional, que sem dúvida alguma me permitiu atingir patamares mais altos.

## **RESUMO**

Este estudo analisa a potencial utilidade agronómica dos satélites Sentinel-2 nas culturas do Trigo, Brócolo e Arroz, através de técnicas de detecção remota, recorrendo aos índices NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e NDWI (Índice de Diferença Normalizada da Água). Para as culturas do Trigo e do Brócolo, instaladas na zona de Évora, recorreu-se a imagens de satélite (NDVI e NDWI), em tempo real, para auxiliar na identificação de áreas com maior e menor desenvolvimento vegetativo. Efectuaram-se ainda medições no campo, ao nível da fisiologia das plantas, bem como da sua capacidade produtiva. A cultura do arroz, instalada na zona de Coruche, foi estudada através do histórico de imagens NDVI e NDWI. Os resultados permitiram relacionar nos casos das culturas cerealíferas, diferentes padrões de clorofila com condições edáficas distintas, explicando os distintos níveis de produtividade. No caso do brócolo foi possível associar padrões de desenvolvimento a factores edafo-climáticos e culturais.

**PALAVRAS-CHAVE:** NDVI, NDWI, Sentinel-2

# **Agronomic utility of NDVI and NDWI indices obtained through Sentinel-2 satellite images: study cases in Wheat, Broccoli and Rice Crops**

## **ABSTRACT**

This study analyzes the potential agronomic utility of Sentinel-2 satellites in Wheat, Broccoli and Rice crops through remote sensing techniques using NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index) indices. Wheat and Broccoli crops (Évora area), satellite images (NDVI and NDWI) were used in real time to help identify areas with higher and lower vegetative development. In these crops, measurements were also made in the field, at physiology plant level, as well as productive capacity level. Rice crop (Coruche area) was studied through NDVI and NDWI images historical. The results allowed to associate different chlorophyll patterns with distinct soil conditions in Rice and Wheat crops, explaining the different yield levels. In Broccoli, the use of Sentinel-2 helped in establishing a relation between crop development, climatic and soil-related factors and farming procedures.

**KEYWORDS:** NDVI, NDWI, Sentinel-2

# ÍNDICE

|  |     |
|--|-----|
| AGRADECIMENTOS.....  | i   |
| RESUMO .....   | ii  |
| ABSTRACT.....  | iii |
| ÍNDICE .....   | iv  |
| ÍNDICE DE EQUAÇÕES.....  | vi  |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....   | vi  |
| ÍNDICE DE QUADROS.....   | x   |
| LISTA DE SIGLAS .....  | xi  |
| <br>   |     |
| 1. INTRODUÇÃO.....   | 1   |
| 1.1 Objectivos .....   | 2   |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....   | 3   |
| 2.1 Detecção Remota .....  | 3   |
| 2.2 Detecção Remota em Agricultura.....  | 7   |
| 2.3 Sentinel-2 .....   | 8   |
| 2.4 Índices de Vegetação .....   | 10  |
| 2.4.1 NDVI.....  | 11  |
| 2.4.2 NDWI.....  | 12  |
| 2.4.3 Outros Índices de Vegetação.....   | 13  |
| 2.5 Descrição das culturas estudadas neste trabalho.....                                 | 16  |
| 2.5.1 Cultura do Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> L.).....                               | 16  |
| 2.5.2 Cultura do Brócolo ( <i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>italica</i> Plenck) ..... | 17  |
| 2.5.3 Cultura do Arroz ( <i>Oryza sativa</i> L.).....                                    | 18  |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS.....  | 21  |
| 3.1 Descrição das áreas de estudo e Metodologia .....                                    | 21  |
| 3.1.1 Parcela do Monte da Lagoa (Cultura do Trigo) .....                                 | 22  |
| 3.1.1.1 Caracterização climática de Évora .....  | 23  |
| 3.1.1.2 Caracterização edáfica da parcela da cultura de Trigo .....                      | 24  |
| 3.1.1.3 Procedimentos realizados na cultura do Trigo .....                               | 25  |

|  |    |
|--|----|
| 3.1.2 Parcelas da Herdade do Falcão (Cultura do Brócolo) .....                             | 27 |
| 3.1.2.1 Caracterização edáfica das parcelas da cultura de Brócolo.....                     | 29 |
| 3.1.2.2 Procedimentos realizados na cultura do Brócolo.....                                | 30 |
| 3.1.3 Parcelas da Herdade de Boicilhos (Cultura do Arroz) .....                            | 32 |
| 3.1.3.1 Caracterização climática de Coruche .....  | 33 |
| 3.1.3.2 Caracterização edáfica das parcelas da cultura de Arroz.....                       | 34 |
| 3.1.3.3 Procedimentos realizados na cultura do Arroz .....                                 | 36 |
| 4.APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....  | 38 |
| 4.1 Variabilidade temporal e espacial dos parâmetros avaliados na cultura do Trigo .....   | 38 |
| 4.1.1 Validação no campo .....   | 41 |
| 4.2 Variabilidade temporal e espacial dos parâmetros avaliados na cultura do Brócolo ..... | 48 |
| 4.2.1 Validação no campo .....   | 53 |
| 4.3 Variabilidade temporal e espacial dos parâmetros avaliados na cultura do Arroz.....    | 59 |
| 5.CONCLUSÃO.....   | 69 |
| 6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 72 |

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Equação 1 – Equação referente ao cálculo do NDVI..... | 12 |
| Equação 2 – Equação referente ao cálculo do NDWI..... | 12 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema relativo aos princípios de funcionamento da detecção remota (Marques da Silva e Sousa, 2012).....  | 4  |
| Figura 2 - Sentinel-2A (à esquerda) e Sentinel-2B (à direita) - Fonte: Agência Espacial Europeia).....  | 9  |
| Figura 3 - Ciclo fenológico da cultura do Trigo (adaptado de LARGE, 1954).....  | 16 |
| Figura 4 - Fase vegetativa: cultura do Brócolo.....   | 18 |
| Figura 5 - Fase reprodutiva: cultura do Brócolo.....  | 18 |
| Figura 6 - Ciclo fenológico da cultura do Arroz (adaptado de <a href="http://www.agencia.cnptia.embrapa.br">http://www.agencia.cnptia.embrapa.br</a> )..... | 20 |
| Figura 7 - Produção (à esquerda) e área (total e média) de arroz (à direita) (INE, 2013-2017).....  | 21 |
| Figura 8 - Parcela de Trigo (Monte da Lagoa - 5 de Agosto de 2017).....   | 23 |
| Figura 9 - Gráfico termopluiométrico da zona de Évora entre 1981 e 2010 (IPMA).....   | 24 |
| Figura 10 - Carta de solos da parcela referente à cultura do Trigo.....   | 25 |
| Figura 11 - Pontos escolhidos para análise da cultura do Trigo (1 de Dezembro de 2017).....   | 25 |
| Figura 12 - Plantas de Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) a 15/11/2017 (Monte da Lagoa).....   | 26 |
| Figura 13 - Plantas de Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) a 30/11/2017 (Monte da Lagoa).....   | 27 |
| Figura 14 - Parcelas de Brócolo (Monte do Falcão - 5 de Agosto de 2017).....  | 28 |
| Figura 15 - Carta de solos da parcela T1 (Cultura do Brócolo).....  | 29 |
| Figura 16 - Carta de solos da parcela T2 (Cultura do Brócolo).....  | 29 |
| Figura 17 - Carta de solos da parcela T3 (Cultura do Brócolo).....  | 29 |
| Figura 18 – Carta de solos da parcela T4 (Cultura do Brócolo).....  | 29 |
| Figura 19 - Carta de solos da parcela T5 (Cultura do Brócolo).....  | 30 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 20 - T1 (Brócolo): Pontos amostrados (16/11/17).....   | 30 |
| Figura 21 - T2 (Brócolo): Pontos amostrados (16/12/17).....   | 30 |
| Figura 22 - T3 (Brócolo): Pontos amostrados (1/12/17).....  | 31 |
| Figura 23 - T4 (Brócolo): Pontos amostrados (15/1/18).....  | 31 |
| Figura 24 - T5 (Brócolo): Pontos amostrados (15/1/18).....  | 31 |
| Figura 25 - Marcação das plantas de Brócolo com fita (21/12/17).....  | 31 |
| Figura 26 - Parcelas de Arroz em Coruche (Herdade de Boicilhos - 5 de Agosto de 2017).....  | 33 |
| Figura 27 - Gráfico termopluiométrico da zona de Coruche entre 1981 - 2010 (IPMA).....  | 34 |
| Figura 28 - Carta de solos das parcelas ocupadas pela cultura do Arroz.....   | 35 |
| Figura 29 - Cartas de condutividade eléctrica a 30 cm (a) e 80 cm de profundidade (b) da cultura do Arroz (Herdade de Boicilhos)..... | 36 |
| Figura 30 - NDVI Absoluto da cultura do Arroz (8/8/2017).....   | 37 |
| Figura 31 - Gráfico relativo ao NDVI e NDWI médio da cultura do Trigo (Pivot 1a).....   | 38 |
| Figura 32 - Gráfico relativo aos percentis 20 e 80 (NDVI) – Trigo Pivot 1a.....   | 39 |
| Figura 33 - Gráfico relativo aos percentis 20 e 80 (NDWI) – Trigo Pivot 1ª.....   | 40 |
| Figura 34 - Gráfico relativo ao NDVI médio da campanha da cultura do Trigo (Ponto 1 e 2).....   | 41 |
| Figura 35 - NDVI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 15/1/17 (Monte da Lagoa).....                                     | 42 |
| Figura 36 - NDWI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 15/1/17 (Monte da Lagoa).....                                     | 42 |
| Figura 37 - Cultura do Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 30/11/17 (Monte da Lagoa).....  | 42 |
| Figura 38 - NDVI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 24/2/18 (Monte da Lagoa).....                                     | 43 |
| Figura 39 - NDWI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 24/2/18 (Monte da Lagoa).....                                     | 43 |
| Figura 40 - Cultura do Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 19/2/18 (Monte da Lagoa).....   | 43 |
| Figura 41 - Plantas de Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 19/2/18 (Monte da Lagoa).....   | 43 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 42 - NDVI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 26/3/18 (Monte da Lagoa).....                         | 44 |
| Figura 43 - NDWI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 26/3/18 (Monte da Lagoa).....                         | 44 |
| Figura 44 - Cultura do Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 26/3/18 (Monte da Lagoa) .....                            | 44 |
| Figura 45 - Plantas de Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 26/3/18 (Monte da Lagoa).....                             | 45 |
| Figura 46 - Peso do grão das plantas de Trigo amostradas no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 24/7/18 (Monte da Lagoa)..... | 45 |
| Figura 47 - Variâncias da altura das plantas de Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).....                                | 46 |
| Figura 48 - Correlação entre NDVI e NDWI da cultura do Brócolo com base nos valores máximo.....                           | 49 |
| Figura 49 - Densidade de plantação: 16500 plantas/ha (a), 33000 plantas/ha (b) - 18 de Janeiro de 2018.....               | 49 |
| Figura 50 - Situação de encharcamento na parcela T1 (15 de Novembro de 2017).....   | 49 |
| Figura 51 - Gráfico relativo aos percentis 20 e 80 (NDVI) – Parcela T5.....   | 51 |
| Figura 52 - NDVI absoluto (a) e relativo (b) na parcela de Brócolo “T5” (16 de Novembro de 2017).....                     | 51 |
| Figura 53 - Gráfico relativo aos percentis 20 e 80 (NDVI) – Parcela T4.....   | 52 |
| Figura 54 - NDVI absoluto (a) e relativo (b) na parcela de Brócolo “T4” (16 de Dezembro de 2017).....                     | 53 |
| Figura 55 - Inflorescência de planta de Brócolo recolhida no ponto 1 (Parcela T1) em 15/11/17.....                        | 54 |
| Figura 56 - Inflorescência de planta de Brócolo no ponto 5 (Parcela T3) em 6/12/17 .....                                  | 54 |
| Figura 57 - Planta de Brócolo no ponto 3 (Parcela T2) em 6/12/17.....   | 55 |
| Figura 58 - Plantas de Brócolo no ponto 4 (Parcela T2) em 16/12/17.....   | 56 |
| Figura 59 - Plantas de Brócolo no ponto 4 (Parcela T4).....   | 57 |
| Figura 60 - Zona de encharcamento no ponto 7 (Parcela T5).....  | 57 |
| Figura 61 - Gráfico relativo ao NDVI Médio durante a campanha da cultura do Arroz relativo às 25 parcelas .....           | 59 |
| Figura 62 - Gráfico relativo ao NDWI Médio durante a campanha da cultura do   |    |

|  |    |
|--|----|
| Arroz relativo às 25 parcelas.....   | 60 |
| Figura 63 - NDVI absoluto (à esquerda) e relativo (à direita) no dia 8 de Agosto de 2017.....                    | 62 |
| Figura 64 - Correlação entre NDVI e NDWI da cultura do Arroz com base nos valores máximos .....                  | 62 |
| Figura 65 - Correlação entre o pico de NDVI e Produtividade da cultura do Arroz.....                             | 63 |
| Figura 66 - Carta de Produtividade da cultura do arroz na Herdade de Boicilhos elaborada no software ArcGis..... | 63 |
| Figura 67 - Correlação entre o NDVI médio ao longo do ciclo e a produtividade (Arroz).....                       | 65 |
| Figura 68 - Correlação entre a condutividade eléctrica média (30 cm) e a produtividade da cultura do Arroz.....  | 66 |
| Figura 69 - Gráficos relativos ao NDVI e NDWI médios do ciclo da cultura de arroz (Parcela 24).....              | 67 |
| Figura 70 - Gráficos relativos ao NDVI e NDWI médios do ciclo da cultura de arroz (Parcela 25).....              | 67 |

## ÍNDICE DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 - Área ocupada e produção total em Portugal (Arroz, Brócolo e Trigo Mole) - INE (2017).....                          | 2  |
| Quadro 2 - Zonas do espectro da radiação electromagnética utilizadas em detecção remota (Marques da Silva e Sousa, 2012)..... | 4  |
| Quadro 3 - Características das bandas do Sentinel-2 (Banda, Nome, Comprimento de Onda e Resolução Espacial).....              | 9  |
| Quadro 4 - Exemplo dos dados estatísticos tratados (Cultura do Arroz: NDVI Médio, Percentil 20 e 80).....                     | 22 |
| Quadro 5 - Descrição da área de estudo e metodologia utilizada na cultura do Trigo.....                                       | 22 |
| Quadro 6 - Itinerário técnico da cultura do Trigo.....  | 23 |
| Quadro 7 - Descrição da área de estudo e metodologia utilizada na cultura do Brócolo.....                                     | 28 |
| Quadro 8 - Itinerário técnico da cultura do Brócolo.....  | 28 |
| Quadro 9 - Descrição da área de estudo e metodologia utilizada na cultura do Arroz.....                                       | 32 |
| Quadro 10 - Itinerário técnico da cultura do Arroz.....   | 32 |
| Quadro 11 - Peso da biomassa total seca e dos grãos das plantas de Trigo amostradas no pontos 1 e 2.....                      | 45 |
| Quadro 12 - Análise da variância da altura média das plantas de Trigo no ponto 1 e ponto 2.....                               | 46 |
| Quadro 13 - Pico Máximo de NDVI e NDWI ao longo da campanha (Brócolo) .....   | 48 |
| Quadro 14 - Dimensões médias das folhas e diâmetro médio das inflorescências dos pontos com NDVI superior.....                | 53 |
| Quadro 15 - Dimensões médias das folhas e diâmetro médio das inflorescências dos pontos com NDVI inferior.....                | 53 |
| Quadro 16 - Pico médio máximo de cada parcela (NDVI e NDWI).....  | 61 |
| Quadro 17 - NDVI e NDWI médios ao longo do ciclo da cultura do arroz.....   | 64 |
| Quadro 18 - NDVI e NDWI médio (Arroz: Parcela 24).....  | 67 |
| Quadro 19 - NDVI e NDWI médio (Arroz: Parcela 25).....  | 67 |
| Quadro 20 - Percentis NDVI e NDWI (Arroz: Parcela 24).....  | 68 |
| Quadro 21 - Percentis NDVI e NDWI (Arroz: Parcela 25).....  | 68 |

## LISTA DE SIGLAS

|       |   |
|-------|---|
| ARVI  | Índice de Vegetação Atmosfericamente Resistente                   |
| DR    | Detecção Remota   |
| CARI  | Índice do Rácio de Absorção de Clorofila                          |
| GNDVI | Índice Verde por Diferença Normalizada                            |
| GVI   | Índice de Vegetação Verde   |
| HA    | Hectares  |
| INE   | Instituto Nacional de Estatística                                 |
| INIAV | Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária          |
| IPMA  | Instituto Português do Mar e da Atmosfera                         |
| IV    | Radiação do Infravermelho   |
| IVP   | Radiação do Infravermelho Próximo                                 |
| IVM   | Radiação do Infravermelho Médio                                   |
| IVT   | Radiação do Infravermelho Térmico                                 |
| KG/HA | Quilogramas/Hectare   |
| LAI   | Índice de Área Foliar   |
| MCARI | Índice do Rácio de Absorção de Clorofila Modificada               |
| MSAVI | Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado                   |
| NDVI  | Índice de Vegetação por Diferença Normalizada                     |
| NDWI  | Índice de Diferença Normalizada da Água                           |
| NIR   | Radiação do Infravermelho Próximo                                 |
| OSAVI | Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Optimizado                   |
| PVI   | Índice de Vegetação Perpendicular                                 |
| RVI   | Índice de Rácio de Vegetação                                      |
| SAVI  | Índice de Vegetação Ajustado ao Solo                              |
| SBI   | Índice de Luminosidade do Solo                                    |
| SISWI | Índices de Stress Hídrico da Radiação Infravermelha de Onda Curta |
| SWIR  | Infravermelho de Onda Curta                                       |
| T1    | Talhão 1 (Cultura do Brócolo)                                     |
| T2    | Talhão 2 (Cultura do Brócolo)                                     |
| T3    | Talhão 3 (Cultura do Brócolo)                                     |
| T4    | Talhão 4 (Cultura do Brócolo)                                     |

|        |   |
|--------|---|
| T5     | Talhão 5 (Cultura do Brócolo)                             |
| TCTGVI | Tasseled Cap Transformation of Greenness Vegetation Index |
| TIR    | Infravermelho Térmico                                     |
| TON/HA | Toneladas/Hectare   |
| VDVI   | Índice de Vegetação por Diferença na Banda do Visível     |
| VIS    | Radiação do Visível                                       |
| UAV    | Veículos Aéreos Não Tripulados                            |
| WDRVI  | Índice de Vegetação de Amplo Alcance Dinâmico             |
| YVI    | Índice de Vegetação Amarela                               |

# 1. Introdução

O uso de tecnologias de detecção remota aplicada à agricultura via satélite é considerado cada vez mais um método de interesse, principalmente devido à possibilidade de monitorizar áreas de grandes dimensões recorrendo às imagens obtidas por estas plataformas. Características apontadas como desvantajosas, tais como baixas resoluções espaciais e temporais, apresentadas por satélites como o “Landsat-8” (30 metros e 16 dias, respectivamente) foram colmatadas no desenvolvimento dos satélites Sentinel-2 cuja resolução espacial (10 metros) e temporal (5 dias) superior permite uma análise não só mais precisa como mais frequente das imagens, factor de extrema importância na agricultura pois as variações ao nível do estado hídrico e da sanidade das plantas ocorrem muitas vezes em curtos espaços de tempo e que podem ser analisados utilizando determinados índices de vegetação como o NDVI, que permite quantificar o conteúdo de clorofila nas folhas e NDWI cuja finalidade se prende com a análise do teor de água na folhas.

A detecção remota em agricultura permite estimar produtividades, avaliar o estado nutricional e hídrico das plantas, detectar pragas e doenças bem como delimitar zonas associadas a maior densidade de emergência de infestantes de modo a que seja possível efectuar tratamentos diferenciados resultando na menor utilização de factores de produção traduzindo-se em efeitos benéficos para o ambiente.

O presente estudo serve para analisar a utilidade agronómica dos satélites Sentinel-2 nas culturas do trigo, brócolo e arroz, tendo as duas primeiras sido acompanhadas em tempo real na região de Évora e a última (região de Santarém) analisada através do histórico de dados existente. No Quadro 1, encontra-se a área ocupada por cada uma destas culturas bem como as suas produções totais em Portugal nos anos 2015, 2016 e 2017, onde se verifica que o cultivo do trigo perdeu expressão (24 885 ha), ao contrário do cultivo do arroz cuja superfície ocupada se superiorizou ao trigo em 2017 (28 944 ha). Quanto à cultura do brócolo, a área ocupada por esta tem vindo a aumentar.

Nesse sentido, para as culturas do brócolo e trigo foram escolhidos dois pontos associados a zonas de menor (NDVI inferior) e maior vigor vegetativo (NDVI superior) à emergência e acompanhados no local ao longo do ciclo das culturas tendo sido analisados parâmetros de desenvolvimento como a altura das plantas e número de filhos por planta no trigo e dimensões de folhas e diâmetros da inflorescências no brócolo. Associados a estes factores foram também analisadas as causas que permitissem explicar os níveis de heterogeneidade entre plantas bem como os seus estados de desenvolvimento.

Quadro 1 – Área ocupada e produção total em Portugal (Arroz, Brócolo e Trigo Mole) – INE (2017)

|                      | Superfície (ha) |        |        | Produção (ton) |         |         |
|----------------------|-----------------|--------|--------|----------------|---------|---------|
|                      | 2015            | 2016   | 2017   | 2015           | 2016    | 2017    |
| <b>Arroz</b>         | 29 142          | 29 149 | 28 944 | 184 918        | 169 289 | 179 777 |
| <b>Trigo Mole</b>    | 37 015          | 33 511 | 24 885 | 74 490         | 77 299  | 50264   |
| <b>Couve-Brócolo</b> | 2 061           | 2 554  | 2 885  | 33 579         | 30 512  | 37060   |

## 1.1 Objectivos

O objectivo desta dissertação passa por comprovar a utilidade agronómica dos índices NDVI e NDWI obtidos a partir das imagens de satélite (Sentinel-2) nas culturas do arroz, trigo e brócolo. O levantamento da variabilidade espacial dentro das parcelas permitirá melhorar a capacidade de decisão e de gestão tendo em conta as relações entre solo-água-planta.



## **2.Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Detecção Remota**

Segundo a ESA (Agência Espacial Europeia), a detecção remota é uma forma de obter informações acerca dos objectos, recolhendo e analisando dados sem que os instrumentos usados para recolher os dados estejam em contacto directo com o objecto.

No entanto a definição apresentada em cima pela ESA é muito generalista, pois a detecção remota também cobre campos das técnicas de comunicação e das percepções sensoriais (Marques da Silva e Sousa , 2016).

Uma outra definição apresentada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), estabelece que a detecção remota é o processo de detecção e monitorização de características físicas de uma área através da medição da radiação reflectida e emitida por esta a uma determinada distância da área em questão.

A radiação electromagnética consiste numa forma de energia transferida de um ponto para o outro, num certo período de tempo. Divide-se em cinco aspectos: energético (quantificação da energia, em Joules); temporal (consoante a posição do alvo, a distância percorrida pela radiação será diferente, medida em segundos); espacial (tem em conta a superfície do objecto analisado, em m<sup>2</sup>), direccional (distribuição hemisférica da radiação electromagnética: varia com a orientação) e espectral pois a radiação é composta por diferentes comprimentos de onda.

A radiação electromagnética, em detecção remota, é usualmente caracterizada pelos comprimentos de onda ( $\lambda$ ) no espectro da radiação electromagnética. Este consiste na distribuição da intensidade da radiação electromagnética em todo o seu o intervalo, com relação ao seu comprimento de onda ou frequência.

No quadro 2, estão discriminadas as zonas do espectro electromagnético utilizadas em detecção remota.

Quadro 2 – Zonas do espectro da radiação electromagnética utilizadas em detecção remota (Marques da Silva e Sousa, 2012)

| Zona do espectro   |                  | Intervalo de comprimento de onda |
|--------------------|------------------|----------------------------------|
| Ultravioleta       |                  | 0,30 – 0,38 $\mu\text{m}$        |
| Visível            | azul             | 0,42 – 0,49 $\mu\text{m}$        |
|                    | verde            | 0,49 – 0,58 $\mu\text{m}$        |
|                    | vermelho         | 0,58 – 0,70 $\mu\text{m}$        |
| Infravermelho (IV) | IV próximo (IVP) | 0,70 – 1,30 $\mu\text{m}$        |
|                    | IV médio (IVM)   | 1,30 – 3 $\mu\text{m}$           |
|                    | IV térmico (IVT) | > 3 $\mu\text{m}$                |
| Microondas         |                  | 1 mm – 1m                        |

Os comprimentos de onda com maior utilidade em detecção remota abrangem a zona do visível (VIS), estendendo-se pelo espectro infravermelho próximo (IVP) e infravermelho de onda curta até ao infravermelho térmico (IVT) e às bandas de microondas. Os sensores passivos de detecção remota registam a radiação incidente que pode ser reflectida ou emitida pelos objectos enquanto que os sensores activos emitem a sua própria radiação, a qual interage com o alvo a ser investigado e que posteriormente retorna ao instrumento de medição (Wojtowicz et al., 2015).

Na figura 1, encontra-se um esquema relativo aos princípios de funcionamento da detecção remota.

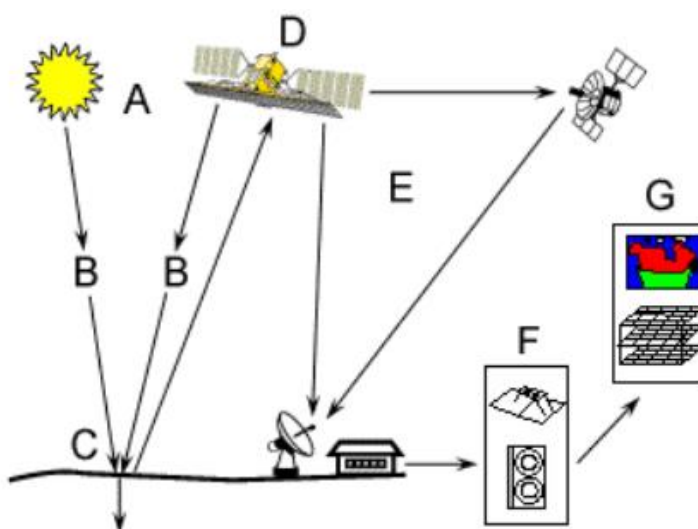


Figura 1 – Esquema relativo aos princípios de funcionamento da detecção remota (Marques da Silva e Sousa, 2012)

Para que se possa utilizar o conjunto de técnicas associadas à detecção remota, o primeiro requisito passa pela existência de uma fonte de energia que ilumine ou forneça energia electromagnética ao alvo de interesse, neste caso energia solar (A – Figura 1); à medida que a energia é transmitida desde a fonte até ao alvo, da atmosfera entra em contacto com as diversas camadas desta (B – Figura 1). Esta interacção poderá ocorrer uma segunda vez quando a energia é transmitida desde o alvo até ao sensor. Assim que a energia atravessa a atmosfera até ao alvo, ocorrerá interacção com este último dependendo das propriedades tanto do alvo como da radiação (C – Figura 1). Após a dispersão ou emissão da energia do alvo, é necessário que haja um sensor (remoto, ou seja, não estando em contacto com o alvo) de forma a que a radiação electromagnética possa ser recolhida e registada (D – Figura 1). A energia registada pelo sensor terá de ser transmitida, frequentemente sob forma electrónica, para uma estação de recepção e processamento (E – Figura 1) onde os dados serão transformados em imagem (impressão e/ou digital). A imagem processada é interpretada de forma visual, digital ou electrónica, para que sejam extraídas informações acerca do alvo (F – Figura 1). Finalmente, a última etapa do processo de detecção remota passa pelo uso da informação extraída da imagem do alvo, com o objectivo de o perceber melhor, revelar novas informações ou ajudar na resolução de um problema particular.

A detecção remota pode ser dividida em três categorias, consoante a forma como os dados são recolhidos: satélite, meios aéreos ou por meio terrestre. Há dois conceitos muito importantes a ter em conta quanto às plataformas inseridas nestas 3 categorias: as resoluções espaciais e espectrais. A primeira, define a dimensão do pixel da imagem da superfície terrestre captada por satélite ou meio aéreo estando intimamente relacionada com as dimensões do objecto de menor tamanho que pode ser reconhecido na superfície. Já a resolução espectral está relacionada com a largura das bandas espectrais na qual o sensor pode registar a radiação reflectida (Wojtowicz et al. 2015).

Os aparelhos portáteis utilizados na detecção remota em meio terrestre (detecção próxima) apresentam melhor resolução espectral, espacial e temporal quando comparada com a detecção remota feita a partir de satélite e meios aéreos. É considerada bastante útil na monitorização de factores bióticos e abióticos no campo (Jackson, 1986). No entanto, as limitações deste método estão associadas à eficiência e

ao tempo que muitas vezes não é suficiente mesmo para avaliar pequenas áreas. Problema este que os meios aéreos e satélites não têm, especialmente o método de detecção remota a partir de imagens de satélite que permite cobrir vastas áreas.

Os meios aéreos, conhecidos como UAV (veículos aéreos não tripulados) apresentam várias vantagens tais como: o facto de poderem ser lançados de forma rápida e repetida, flexibilidade ao nível da altura e tempo de voo, para além de obterem imagens com alta resolução espacial, o que permite a observação de plantas de forma individual, manchas, falhas e padrões ao longo das paisagens (Franklin et al., 2006; Laliberte et al., 2006). Devido a esta característica, este método de detecção remota poderá ter grande utilidade na gestão das culturas em locais específicos. Normalmente, apresentam uma resolução espacial de 1-20 cm. A grande desvantagem reside na fraca duração da bateria e baixa extensão do voo (Wojtowicz et al., 2015).

As imagens provenientes de satélites têm sido usadas ao longo do tempo para fins como mapeamento dos diferentes tipos de cultura, avaliação do estado geral das culturas e estimativa das áreas que as culturas ocupam. Estes fins devem-se às baixas resoluções espaciais e temporais dos sensores, as quais têm vindo a ser colmatadas com o lançamento de novos satélites, como o Sentinel-2, cuja resolução espacial e temporal é de 10 m e de 5 dias, respectivamente. Actualmente, é possível avaliar parâmetros no campo, tais como: stress hídrico, encharcamento e danos provocados por granizo.

Entre as desvantagens estão a dependência das condições climáticas, caracterizada pela ausência de nuvens (Stafford, 2000), baixas resoluções espaciais adequadas apenas para estudos de áreas de grandes dimensões (Lamb e Brown, 2001). A resolução temporal é outra das limitações apontadas a este método, tornando-a imprópria para estudos que requerem imagens frequentes. De forma a minimizar este impacto, os satélites são normalmente lançados em constelações constituídas por alguns satélites cuja órbita se encontra sincronizada, podendo obter imagens com maior frequência (Wojtowicz et al., 2015).

## 2.2 Detecção remota em agricultura

Estimativas de produtividade, necessidades nutricionais das plantas, detecção de danos causados por doenças e pragas, avaliação das necessidades hídricas das plantas e controlo de infestantes são algumas das principais aplicações da detecção remota em agricultura.

Prasad et al. (2006) desenvolveram um modelo de estimativa de produtividade, a uma escala regional, baseado em índices de vegetação obtidos através das imagens do satélite “AVHRR/NOAA”, em que obteve correlações de 78% e 86% (milho e soja, respectivamente) entre os dados espectrais provenientes do satélite e a produtividade (kg/ha). Uma correlação de 74% foi obtida por Galvão et al. (2009) entre os índices de vegetação (NDVI e NDWI) e o peso das sementes colhidas, usando imagens hiperespectrais provenientes do satélite “Hyperion” de forma a estimar a produtividade de soja.

Quanto às necessidades nutricionais das plantas, Bausch e Khosla (2010) demonstraram que os dados multi-espectrais do satélite “QuickBird” podem ser usados para uma avaliação fiável da variabilidade espacial dos níveis de azoto nas plantas, em áreas cultivadas com milho, uma vez que com o aumento da quantidade de azoto aplicada, as plantas, também os valores médios do índice NDVI aumentaram, podendo este índice ser utilizado como ferramenta de gestão da adubação azotada. Jia et al. (2011), apresentou resultados idênticos em que as correlações entre os índices de vegetação utilizados (GNDVI, RVI e OSAVI) e níveis de azoto nas plantas foram altas.

Através das imagens de satélite é também possível observar a presença de doenças e pragas nas culturas. Recorrendo ao satélite “Landsat” , Chen et al. (2007) detectaram infestações graves de uma doença causada pelo agente patogénico *Gaeumannomyces graminis* em trigo. Apan et al. (2004) registaram a presença de ferrugem laranja na cana-de-açúcar (*Puccinia kuehnii*). Franke e Menz (2007) obtiveram resultados usando as imagens captadas pelo satélite “QuickBird” que indicaram a existência de ferrugem-da-folha (*Puccinia recondita*) e oídio (*Blumeria graminis*) em trigo de inverno.

Com base nos resultados de Franke e Menz (2007) concluiu-se que as imagens multiespectrais são geralmente adequadas para a detecção de heterogeneidade ao nível do vigor vegetativo entre plantas, particularmente para detecção de estados mais

avançados de infecções causadas por fungos ao contrário da detecção de focos iniciais de doenças em trigo, em que o nível de adequação é apenas moderado.

A DR em agricultura é também aplicada à monitorização do estado hídrico das culturas, sendo bastante útil na estimativa do conteúdo de água nas plantas em áreas agrícolas de grandes dimensões. A DR pode constituir uma ferramenta de apoio à gestão da água uma vez que fornece informações acerca da evapotranspiração total (El-Magd e Tanton, 2003), que está intimamente relacionada com a quantidade de água que as plantas necessitam. Além de ser possível determinar as necessidades hídricas das plantas, também a eficiência do uso da água poderá ser determinada.

Índices como o NDWI e SISWI foram usados por Fensholt e Sandholt (2003) para monitorizar alterações espaciais e temporais no teor de água em plantas de arroz.

Satélites de alta resolução (“Quickbird” e “GeoEye”) mostraram resultados promissores na detecção de plântulas de infestantes. Quanto aos satélites de resolução espacial moderada (“SPOT” e “Landsat”), os estudos permitiram concluir que estes sensores têm utilidade para o mapeamento e reconhecimento de grandes aglomerados de infestantes baseado nas diferenças das propriedades espectrais destas (Ullah et al., 1989; Peters et al., 1992; Anderson et al., 1993).

## **2.3 Sentinel-2**

Os satélites Sentinel-2 (2A e 2B) (Figura 2) foram desenvolvidos pela Agência Espacial Europeia (ESA), integrados no Programa Copernicus, com o propósito de observar a superfície terrestre servindo como ferramenta de apoio a determinados serviços, tais como: alterações na cobertura da superfície terrestre, gestão de desastres naturais e monitorização das florestas.

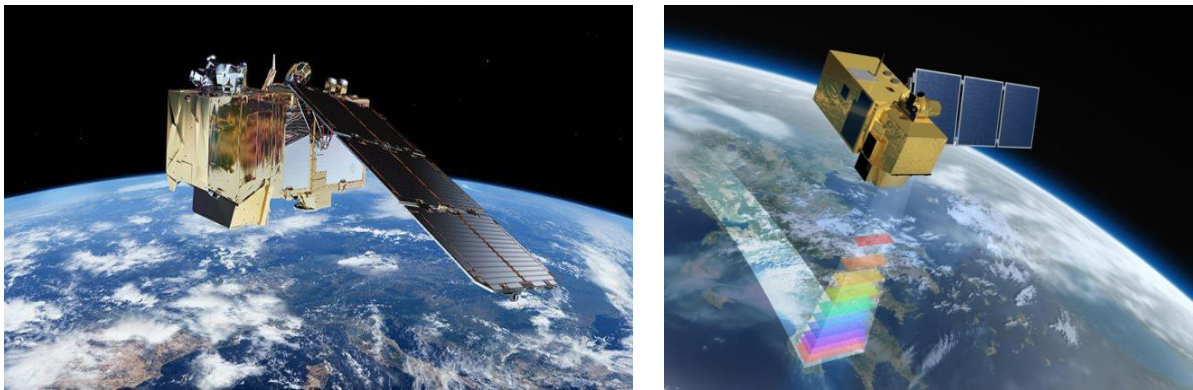


Figura 2 – Sentinel-2A (à esquerda) e Sentinel 2-B (à direita) - Fonte: Agência Espacial Europeia)

Estes dois satélites apresentam características idênticas, tendo o Sentinel-2A sido lançado em Junho de 2015 e o Sentinel-2B em Março de 2017. A resolução temporal é de 5 dias. Outras características de valor deste satélite residem na vasta largura da faixa terrestre coberta (290 km), com 13 bandas espectrais que fornecem imagens com alta qualidade radiométrica e geométrica (Quadro 3). Quanto à resolução espacial, as bandas 2 (490 nm), 3 (560 nm), 4 (665 nm) e 8 (842 nm) apresentam uma resolução de 10 m; as bandas 5 (705 nm), 6 (740 nm), 7 (783 nm), 8a (865 nm), 11 (1610 nm) e 12 (2190 nm) de 20 m e as bandas 1 (443 nm), 9 (940 nm) e 10 (1375 nm) têm uma resolução de 60 m.

Quadro 3 – Características das bandas do Sentinel-2 (Banda, Nome, Comprimento de Onda e Resolução Espacial)

| Band     | Name                      | Wavelength range/ $\mu\text{m}$ | Resolution/m |
|----------|---------------------------|---------------------------------|--------------|
| Band 1   | Coastal aerosol           | 0.433–0.453                     | 60           |
| Band 2   | Blue                      | 0.458–0.523                     | 10           |
| Band 3   | Green                     | 0.543–0.578                     | 10           |
| Band 4   | Red                       | 0.650–0.680                     | 10           |
| Band 5   | Vegetation red edge       | 0.698–0.713                     | 20           |
| Band 6   | Vegetation red edge       | 0.733–0.748                     | 20           |
| Band 7   | Vegetation red edge       | 0.773–0.793                     | 20           |
| Band 8   | Near-Infrared             | 0.785–0.900                     | 10           |
| Band 8 A | Near-Infrared narrow      | 0.855–0.875                     | 20           |
| Band 9   | Water vapour              | 0.935–0.955                     | 60           |
| Band 10  | Shortwave Infrared-Citrus | 1.360–1.390                     | 60           |
| Band 11  | Shortwave Infrared        | 1.565–1.655                     | 20           |
| Band 12  | Shortwave Infrared        | 2.100–2.280                     | 20           |

Alguns estudos já foram feitos através de dados recolhidos pelos satélites Sentinel-2 como: a estimativa do conteúdo de clorofila das copas de macieiras (Li et al., 2018). A presença de metais pesados na cultura do arroz utilizando índices de vegetação sensíveis às características temporais e espaciais das culturas (Liu et al., 2018); estimativa do conteúdo de clorofila das folhas de culturas como milho, soja, batata e pastagem bem como o teor de azoto nas respectivas culturas recorrendo ao instrumento multiespectral instalado nos satélites Sentinel-2 (Clevers e Gitelson, 2013). Zhang et al. (2017) concluíram que a estimativa do teor de água recorrendo a índices hídricos aplicados á vegetação numa seara de trigo é uma alternativa viável e pode ser utilizada como apoio à tomada de decisão em questões de irrigação.

A detecção e monitorização de doenças em trigo, nomeadamente ferrugem amarela (*Puccinia striiformis* var. *tritici*) também já foi motivo de estudo recorrendo às imagens do Sentinel-2, tendo sido proposto um novo índice espectral que apresentou níveis de precisão de 84,1% para a detecção desta doença e 85,2% para a sua monitorização (Zheng et al., 2018).

## 2.4 Índices de Vegetação

Certos parâmetros biofísicos das plantas podem ser definidos espectralmente através de índices de vegetação que são obtidos a partir de medidas radiométricas sem unidades atribuídas. São calculados como rácios entre duas ou mais bandas respectivas à zona dos comprimentos de onda que abrangem a radiação visível, infravermelho próximo e do infravermelho de onda curta. A utilidade dos índices de vegetação é determinada pelas suas altas correlações com as características biofísicas das plantas e pela baixa sensibilidade a factores que dificultam a interpretação dos dados obtidos através de técnicas de detecção remota, tais como a influência do solo e da atmosfera, componentes não fotosintéticos das plantas, visualização e geometria da iluminação (Huete e Justice, 1999).



Os índices de vegetação obtidos através da detecção remota são algoritmos relativamente simples e eficientes para a avaliação do vigor vegetativo, das dinâmicas de crescimento ou do coberto vegetal, entre outros.

Até à data, não existe nenhuma expressão matemática unificada que possa definir todos os índices de vegetação devido à complexidade das diferentes combinações do espectro da luz, instrumentos, plataformas e resoluções utilizadas. Sendo assim, têm sido desenvolvidos e testados algoritmos adaptados em várias aplicações, de acordo com expressões matemáticas específicas que combinam radiação do visível, principalmente na zona do espectro verde, da vegetação, e também da zona do não visível de modo a obter quantificações aproximadas acerca da superfície vegetativa.

Em termos de aplicações ao mundo real, os índices de vegetação são normalmente otimizados consoante os requisitos específicos das aplicações juntamente com ferramentas de validação e metodologias no local apropriadas (Xue e Su, 2017).

A interpretação de imagens com informação acerca da vegetação obtidas através de detecção remota é baseada principalmente através de diferenças e alterações das folhas verdes das plantas e características espectrais do coberto vegetal. O processo de validação mais comum consiste no estabelecimento de correlações directas ou indirectas entre índices de vegetação obtidos e das características de interesse da vegetação medidas no local, tais como o coberto vegetal, índice de área foliar, biomassa, crescimento e vigor. Métodos mais sólidos são utilizados para avaliar índices de vegetação usando métodos directos e georeferenciados monitorizando “plantas sentinela” de modo a que possam ser comparados com índices de vegetação obtidos das mesmas plantas para fins de calibração (Xue e Su, 2017).

#### **2.4.1 NDVI**

O NDVI é um dos índices de vegetação mais utilizados em DR (Gago et al., 2015) em que são utilizadas reflectâncias entre 680 nm e 800 nm (radiação no vermelho) sendo principalmente utilizado para a caracterização do coberto vegetal e do seu vigor. Devido à alta reflectância do infravermelho próximo por parte da clorofila (Equação 1), este índice é utilizado para detectar os níveis desta última (Zarco-Tejada et al., 2012).

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

Equação 1 – Equação referente ao cálculo do NDVI

A utilidade deste índice foi demonstrada em termos de estimativas de produtividade das culturas (Basnyat e McConkey, 2001; Piekarczyk et al., 2004; Walsh et al., 2012; Wojtowicz et al., 2005). No entanto, muitos autores cimentam a importância deste índice para a avaliação do estado de desenvolvimento das plantas, referindo-se como uma componente crítica para a estimativa da produtividade (Basnyat e McConkey, 2001; Wojtowicz et al., 2005; Piekarczyk, 2011).

Muitos estudos têm comparado o NDVI com o Índice de Área Foliar (LAI) (Sripada, et al., 2005), que pode ser definido como a área das folhas por área de solo (Zhang et al., 2012).

#### 2.4.2 NDWI

O NDWI (Índice de Diferença Normalizada da Água) foi proposto Gao (1996) de forma a poder monitorizar as quantidades de águas nas folhas através de detecção remota feita a partir de imagens de satélite. Abrange os comprimentos de onda 860 nm e 1240 nm, ambos localizados no espectro de alta reflectância dos patamares do coberto vegetal (Equação 2).

$$\text{NDWI} = \frac{(\text{Green} - \text{NIR})}{(\text{Green} + \text{NIR})}$$

Equação 2 - Equação referente ao cálculo do NDWI

A zona respectiva à radiação do infravermelho de onda curta (SWIR) é sensível ao teor de água nas plantas sendo considerada uma banda importante para a monitorização da seca através de técnicas de detecção remota. A absorção da água pela vegetação no comprimento de onda perto de 860 nm é desprezível enquanto que fraca absorção da água é indicada nos 1240 nm. Como resultado, o NDWI é sensível a alterações nos conteúdos de água nas folhas das plantas.

Ao contrário do NDVI, o NDWI é menos sensível aos efeitos atmosféricos mas, tal como o NDVI, os efeitos da reflectância do solo estão presentes. Como a informação acerca do coberto vegetal contida nos 1240 nm difere bastante da contida na zona da radiação vermelha próxima dos 660 nm, então o NDWI deverá ser considerado como um índice de vegetação independente, complementando o NDVI.

Este índice foi proposto (Gao, 1996) devido a estudos experimentais que demonstraram que a reflectância para determinados tipos de vegetação na gama de comprimentos de onda do “Landsat-5” aumentava à medida que o teor de água na folha diminuía (Cibula et al., 1992). A utilidade deste índice, juntamente com o NDVI (recorrendo ao satélite “Landsat 8 OLI”) como ferramentas de apoio à gestão hídrica de vinhas já foi demonstrada, uma vez que foi provado que o NDWI está correlacionado com o potencial hídrico da vinha bem como com o conteúdo de água no solo (Borgogno-Mondino et al., 2018). A avaliação da distribuição de água de rega feita através de pivot recorrendo ao NDWI apresentou também resultados bastante positivos (Farg et al., 2017). Nas culturas do milho e soja também foi examinada a utilidade do NDWI no mapeamento do conteúdo de água da vegetação utilizando o satélite “Landsat-6” (Chen et al., 2005). No entanto, este método não é adequado a situações de solo descoberto ou de baixa densidade de vegetação (Fensholt e Sandholt, 2013).

### **2.4.3 Outros Índices de Vegetação**

Além do NDVI, existem outros índices de vegetação tais como o RVI (Índice de Rácio de Vegetação), um dos primeiros índices de vegetação (Jordan et al., 1969) baseia-se no princípio de que as folhas absorvem relativamente mais radiação vermelha do que infravermelha). Índices de vegetação que têm em conta os efeitos atmosféricos tais como o ARVI (Índice de Vegetação Atmosfericamente Resistente), proposto por Kauman e Tanré cujo princípio incide no facto da atmosfera afectar a radiação vermelha de forma mais significativa do que a radiação infravermelha. Este índice é normalmente utilizado para eliminar os efeitos dos aerossóis atmosféricos (Kaufman e Tanré, 1992).

O NDVI é bastante sensível a factores secundários, tais como a luminosidade e a sombra dos cobertos vegetais e brilho do solo. Estudos demonstraram que quando a luminosidade do solo aumenta, o NDVI aumenta também de forma sistemática. Tendo em conta o efeito do solo, a radiação vermelha aumenta significativamente quando a

densidade de vegetação é baixa. Contrariamente, a radiação do infravermelho próximo é reduzida de forma a tornar a relação entre a vegetação e o solo mais racional. (Gago et al., 2015). Tendo em consideração a influência da radiação reflectida e emitida pelo solo na obtenção do NDVI, Richardson e Wiegand (1977) propuseram índices de vegetação que tivessem em conta a radiação emitida e reflectida pelo solo.

Como certos índices como o PVI (Índice de Vegetação Perpendicular) e o NDVI apresentam algumas lacunas no que toca à descrição do comportamento espectral da vegetação e fundo do solo, Huete (1988) criou o SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo).

Foram criadas três novas adaptações a este último índice baseadas nas considerações teóricas acerca dos efeitos dos solos húmidos e secos (SAVI2, SAVI3 e SAVI4). Atendendo ao efeito da variação do ângulo de incidência solar e alterações na estrutura física do solo, estes índices permitem reduzir a influência da luminosidade no solo (Qi et al., 1994). Um outro índice (Qi et al., 1994) foi proposto de forma a minimizar a influência do solo descoberto obtido pelo SAVI, conhecido como MSAVI (Índice Modificado de Vegetação Ajustado ao Solo). Existem ainda outros índices relacionados com a vegetação tais como o TCTGVI (Tasseled Cap Transformation of Greenness Vegetation Index) criado por Kauth e Thomas (1976) que estudaram o padrão espectral do processo de crescimento vegetativo denominando-o de “spikecap”, que tem em conta a influência da reflectividade do solo. Esta transformação é uma conversão das bandas originais de uma imagem num novo conjunto de bandas com interpretações definidas que são úteis para o mapeamento da vegetação (Kauth e Thomas, 1976). Estas conversões incluem o SBI (Índice de Luminosidade do Solo), GVI (Índice de Vegetação Verde) e YVI (Índice de Vegetação Amarela).

Estes três índices ignoram os efeitos e a interacção da atmosfera, do solo e da vegetação. Os índices SBI e GVI podem ser utilizados para avaliar o comportamento da vegetação e do solo descoberto (Qingjiu e Xiangjun, 1998). O GVI apresenta uma forte correlação com diferentes tipos de coberto vegetal.

Os índices de vegetação baseados em detecção remota na zona do espectro visível feita por sistemas aéreos não tripulados são outros dos índices de vegetação que podem ser encontrados actualmente. Usando sistemas/veículos não tripulados que sobrevoam os locais a 50-100 metros de altitude, é possível recolher dados que não são influenciados pela atmosfera com alta resolução espacial e temporal. Algo que não é possível nos

sistemas tradicionais de tecnologia de detecção remota, nomeadamente satélites (Wang et al., 2013).

Wang et al. (2015), criaram um índice denominado VDMI (Índice de Vegetação por Diferença na Banda do Visível) que usa a banda do verde ao invés de utilizar a banda do infravermelho próximo para o cálculo do NDVI. A precisão da extracção de informação acerca da vegetação é maior do que em qualquer índice de vegetação baseado na zona do espectro da luz visível e do verde tendo sido reportados resultados com um rigor superior a 90 % (Wang et al., 2015).

Considerando que o NDVI atinge níveis de saturação para teores de biomassa elevada, visto que o contraste da reflectividade do infravermelho próximo e vermelho é aumentado, Gitelson (2004) propôs o WDRVI (Índice de Vegetação de Amplo Alcance Dinâmico) de forma a melhorar a classificação do coberto vegetal em ambientes com altos níveis de biomassa. No entanto, para ambientes com baixos níveis de biomassa ( $LAI < 1$ ), o NDVI é a melhor alternativa para a classificação (Gitelson, 2004).

Kim et al. (1994) desenvolveram o CARI (Índice do Rácio de Absorção de Clorofila) baseado no princípio da reflectância espectral das folhas da plantas (entre 550 nm e 700 nm) ser constante, mesmo que a quantidade de clorofila das folhas seja variável. Posteriormente Daughtry et al., (2000) propuseram uma adaptação deste índice que é mais sensível às concentrações de clorofila das folhas (MCARI).

O Índice de Stress Hídrico da Cultura (CWSI) foi desenvolvido a pensar na relação directa que existe entre o crescimento da cultura, o fornecimento de água e o estado hídrico da planta que poderá levar a reduções da produtividade ou mesmo a morte das plantas em casos de seca extrema. Neste sentido, é de extrema importância avaliar o estado hídrico das plantas de forma atempada e precisa de modo a que não hajam impactos na cultura ao nível da produtividade, qualidade da produção e crescimento vegetativo (Funian et al., 2013).

O CWSI (Idso et al., 1981), tem em conta a temperatura das folhas totalmente expostas à radiação solar quando a cultura se apresenta em boas condições hídricas, bem como a temperatura das plantas quando sujeitas a condições hídricas insuficientes relacionadas com o baixo teor de água disponível no solo. O PRI (Índice de Reflectância Fotoquímica), também permite monitorizar situações de stress baseado no princípio de que os pigmentos fotosintéticos são afectados pelo stress hídrico. (Gamon, 2011).

## 2.5 Descrição das culturas estudadas neste trabalho

### 2.5.1 Cultura do Trigo (*Triticum aestivum* L.)

A maior superfície de área de trigo encontra-se em zonas onde os valores de precipitação média anual rondam entre os 375 a 875 mm. No entanto, encontra-se também em zonas onde a precipitação média anual varia entre os 200 e 1750 mm. (Calado, 2012).

É considerada uma cultura de estação fria, uma vez que as temperaturas mínimas de crescimento rondam os 4°C. Apesar deste factor, as temperaturas óptimas para o crescimento rondam os 25 °C, sendo as máximas de 32 °C. Ao nível das condições edáficas, os solos bem drenados com texturas de média a fina (argilo- limosos) são preferíveis para a instalação desta cultura (Calado, 2012).

O ciclo fenológico do trigo (Figura 3) divide-se em três fases: vegetativa, reprodutiva e de maturação do grão (Slafer et al., 2010). Antes de iniciar a descrição do ciclo fenológico do trigo é importante mencionar que a duração de cada fase está dependente da temperatura, do fotoperíodo e da vernalização (Miralles, 2004). A fase vegetativa caracteriza-se pela formação dos primórdios foliares, determinando a área foliar potencial da planta. Durante esta fase, o ápice possui uma gema simples que dá origem aos primórdios foliares.

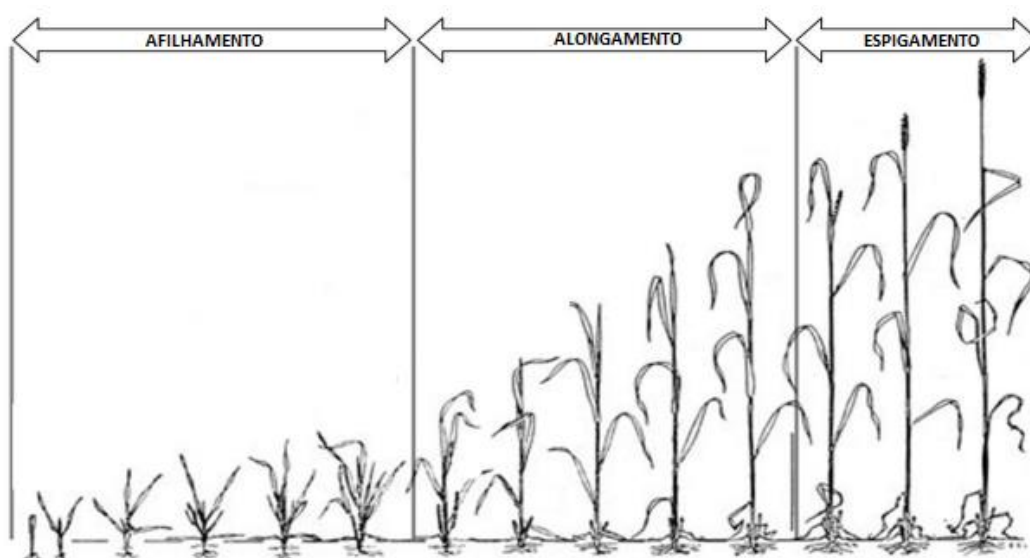


Figura 3 – Ciclo fenológico da cultura do Trigo (adaptado de LARGE, 1954)

A fase reprodutiva inicia-se com a formação dos primeiros primórdios das espigas e finaliza na ântese, em que ocorre a polinização das flores. A partir do momento em que é formada a espiga terminal, o número máximo de espigas fica definido. A diferenciação floral inicia-se de baixo para cima, começando nas flores basais das espigas centrais e continua até ao ápice. O afilhamento dá-se nesta etapa, sendo formados caules secundários a partir de gemas secundárias em que é estabelecido o número de espigas por m<sup>2</sup> bem como o número de grãos potencial por espiga. (Lujan, 2013).

Por último, dá-se a maturação do grão, após a fecundação, e que consiste no crescimento do grão. Numa primeira fase, ocorre a multiplicação celular, seguida da acumulação de hidratos de carbono finalizando com a desidratação do grão.

### **2.5.2 Cultura do Brócolo (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck)**

O brócolo, tal como as restantes brássicas é uma planta bienal. O meristema apical do caule diferencia-se numa inflorescência verde após a vernalização. Se cortada, a inflorescência (constituída por pequenos botões florais imaturos) produz inflorescências secundárias na axila das folhas (Almeida, 2013).

Considerada uma cultura de estação fresca, tolerante à geada, a melhor qualidade é obtida quando o ciclo cultural decorre com temperaturas médias entre 13 e 20°C. Abaixo dos 5°C, o crescimento é muito reduzido e acima dos 25°C o grau da compactação da cabeça é igualmente reduzido. (Almeida, 2013).

Prefere solos com boa capacidade de armazenamento de água, faixa de pH entre os 6,5 e 7,5 e ricos em matéria orgânica. É uma cultura que requiere humidade adequada no solo de forma a atingir máxima produtividade, especialmente durante a fase de formação das inflorescências (STRANGE et al., 2010). Em solos ácidos, esta cultura é susceptível ao aparecimento de determinadas doenças, como a potra. Apresenta moderada tolerância à salinidade. O fornecimento de água feito de forma consistente reduz a incidência e intensidade de manchas castanhas na inflorescência tanto em cultivos feitos através de

plantação como através da sementeira (Jenni et al., 2001). Já a irrigação realizada de forma excessiva contribui para a redução da produtividade e da qualidade do produto final devido ao excessivo crescimento vegetativo, ao atraso na maturação da inflorescência, à lixiviação de nutrientes solúveis como o azoto e o potássio, e ao aumento da susceptibilidade ao aparecimento de doenças e problemas fisiológicos tal como inflorescências soltas ou formação de caules ocos (STRANGE et al., 2010).

Quando aplicado em quantidades excessivas, o azoto promove o excesso de exuberância vegetativa e consequentemente prejudica a qualidade da cabeça. É sensível às carências de potássio, magnésio e boro, em caso de carência deste último micronutriente, os caules podem tornar-se ocos. Em termos hídricos, é especialmente exigente na fase intermédia e final do ciclo cultural. (Almeida, 2013).

Em 2017, a área ocupada pelo brócolo (*Brassica oleraceae*) em Portugal era de 2885 hectares tendo sido a única brássica cuja área de cultivo aumentou (INE, 2017). No que toca às densidades de plantação em Portugal variam entre as 27000 e as 33000 plantas/ha.



Figura 4– Fase vegetativa: cultura do Brócolo



Figura 5 –Fase reprodutiva: cultura do Brócolo

### 2.5.3 Cultura do Arroz (*Oryza sativa* L)

Em Portugal, a produção de arroz tem maior expressão nas zonas que se localizam próximo dos estuários dos rios Tejo, Sado e Mondego, onde os factores edafo-climáticos são mais adequados. Os factores mais importantes para esta cultura são: temperatura, luz e água.



A soma do número de graus térmicos tem um papel fundamental no desenvolvimento da cultura do arroz, variando de 3500 a 4500 °C (consoante se trata de variedades precoces ou tardias). Além deste factor, é também importante que não ocorram mudanças bruscas da temperatura pois pode resultar em impactos negativos para as produções.

Para temperaturas superiores a 40 °C e inferiores a 13 °C o crescimento é interrompido, estando a temperatura óptima situada entre os 30- 35 °C (Calado, 2012).

O período da germinação do grão de arroz caracteriza-se pela emergência do caulículo que é feita no sentido ascendente. Posteriormente, a radícula desenvolve-se no sentido descendente (Silva, 1986). A fase de 3 a 4 folhas totalmente formadas coincide com o fim deste estado de desenvolvimento (Tinarelli, 1986).

Segue-se o afilhamento, em que os filhos primários surgem a partir da planta mãe, podendo também dar origem a filhos secundários e terciários, estando o número de filhos relacionado com o número de panículas por área e, conseqüentemente, influenciando a produtividade final. Factores culturais, tais como a densidade de sementeira, profundidade de sementeira, presença de infestantes e teor de água disponível influenciam este processo (Grist, 1970).

Com o surgimento da inflorescência, termina, normalmente, a fase de afilhamento que caso contrário pode continuar dando origem a filhos em que o aparecimento das inflorescências não ocorre.

Após o término da fase vegetativa (Figura 6), ocorre o início da fase reprodutiva: encanamento e alongamento dos entrenós. Segue-se o período respectivo ao emborrachamento (70 a 80 dias após a sementeira) onde ocorre a dilatação da panícula causada pela ascensão de dentro da bainha da folha bandeira.

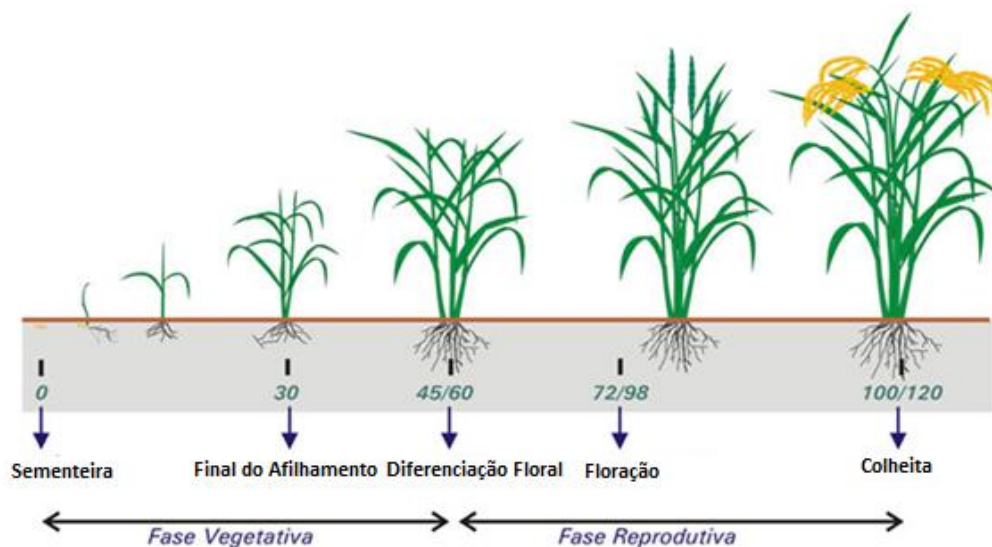


Figura 6 – Ciclo fenológico da cultura do Arroz (adaptado de <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>)

Quando a panícula emerge da bainha da folha bandeira ocorre o espigamento e floração. O enchimento e maturação dos grãos dá-se após a fecundação, em que o grão passa por três fases: leitosa, pastosa, dura e de colheita. A primeira fase (leitosa) caracteriza-se pelo teor máximo de água no grão e por altos teores de amido. Denominada leitosa devido à cor que o grão apresenta nesta fase. Segue-se a perda de água no grão levando a que este fique com uma consistência pastosa (fase pastosa) onde posteriormente ganha consistência (fase dura). Finalmente, a fase de colheita onde a maturação dos grãos se encontra completa (grãos rígidos), podendo estes tornar-se quebradiços em casos de colheita tardia.

Actualmente, as produções de arroz, a nível mundial rondam os 730 milhões de toneladas (em casca – paddy) ocupando uma área de 164 milhões de hectares sendo considerado como um dos principais alimentos para mais de metade da população mundial (Almeida e Marques, 2013). Assume bastante relevância no continente asiático onde cerca de 91% da cultura é semeada e consumida, sendo a China, Índia e a Indonésia os principais produtores.

Em Portugal, a média de produção ronda as 180000 toneladas (INE, 2013-2017), tendo a produção total de arroz no ano de 2017 coincidindo com esse mesmo valor médio (Figura 6). As densidades de sementeira utilizadas, em Portugal, no cultivo de arroz rondam os 180 kg/ha. De ano para ano, a superfície ocupada pelo arroz pode variar

devido às maiores ou menores disponibilidades hídricas observadas nas albufeiras da bacia hidrográfica do Sado, onde se cultiva a maior parte do arroz do Alentejo. Facto que se verificou no ano transacto (2017) fruto do fenómeno acentuado de seca que ocorreu em Portugal (Figura 7).

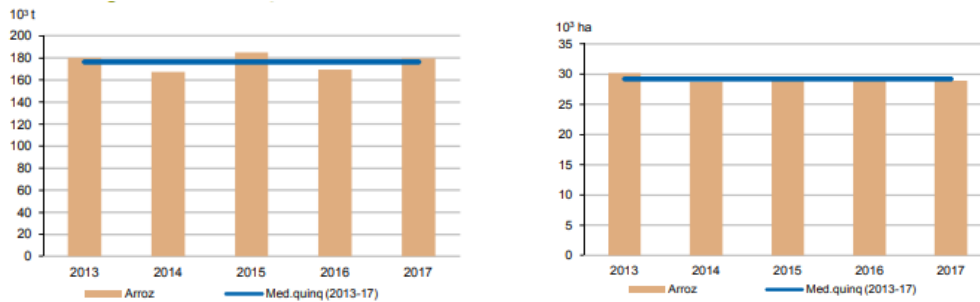


Figura 7 – Produção (à esquerda) e área (total e média) de arroz (à direita) (INE, 2013-2017)

### 3. Materiais e Métodos

As imagens de satélite do Sentinel-2, obtidas com uma frequência de 5 dias, associadas às zonas de estudo foram processadas no espaço e no tempo por forma a serem calculados os 2 índices utilizados no estudo, NDVI e NDWI. Imagens estas retiradas da plataforma “Agromap”. De seguida, eliminaram-se todos os dados que evidenciassem a presença de nuvens através da análise dos dados estatísticos de cada parcela (Quadro 4) (ex: descida acentuada dos valores de NDVI e incremento dos valores de NDWI) tendo as parcelas em estudo sido também observadas, presencialmente (culturas do Brócolo e Trigo). Procurou-se descobrir locais dentro destas mesmas parcelas com comportamentos distintos da vegetação. Tais locais, com diferenças evidentes dentro de cada parcela foram depois acompanhados e/ou analisados em detalhe de acordo com diferentes procedimentos mencionados no decorrer deste capítulo.

Quanto á cultura do arroz, foi analisada apenas através do histórico de imagens NDVI e NDWI, uma vez que se tratava de uma campanha já finalizada sendo impossível acompanhar presencialmente o desenvolvimento desta cultura.

Além da análise feita acerca das curvas destes índices foram também elaborados gráficos dos percentis dos NDVI e NDWI de cada parcela, nomeadamente os percentis

20 (plantas com menor desenvolvimento) e 80 (plantas com maior desenvolvimento) de forma a perceber até que ponto houve variabilidade nas diferentes parcelas.

De notar que para este estudo, foram utilizadas as imagens relativas ao NDVI e NDWI absoluto e relativo, pois tendo em conta que o NDVI tende a saturar para elevados níveis de biomassa, as imagens relativas permitem detectar diferentes padrões nas parcelas mesmo nestes casos.

Quadro 4 – Exemplo dos dados estatísticos tratados (Cultura do Arroz: NDVI Médio, Percentil 20 e 80)

| Data       | NDVI Médio  | P20       | P80       |
|------------|-------------|-----------|-----------|
| 25/05/2017 | 0,271084785 | 0,2350801 | 0,297599  |
| 04/06/2017 | 0,442054749 | 0,3986297 | 0,4982903 |
| 14/06/2017 | 0,443297416 | 0,4342272 | 0,4641252 |
| 04/07/2017 | 0,549178839 | 0,5046892 | 0,6181775 |
| 24/07/2017 | 0,631810308 | 0,5824325 | 0,6915254 |
| 03/08/2017 | 0,654141724 | 0,609154  | 0,7102002 |
| 08/08/2017 | 0,693265557 | 0,6827582 | 0,7391048 |

### 3.1 Descrição das áreas de estudo e Metodologia

#### 3.1.1 Parcela do Monte da Lagoa (Cultura do Trigo)

A parcela de Trigo utilizada neste estudo (40 ha), situada a sensivelmente 10 km Sudeste da cidade de Évora, no Monte da Lagoa (Quadro 5), representa metade da área regada por um pivot (Figura 8). A sementeira, com densidade de 180 kg/ha, foi realizada no final de Outubro de 2017 tendo a colheita sido feita no início de Julho de 2018, de acordo com o itinerário técnico (Quadro 6).

Quadro 5 – Descrição da área de estudo e metodologia utilizada na cultura do Trigo

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Cultura</b>                 | <b>TRIGO</b>   |
| <b>Local</b>                   | Lat: 38.538996; Long: -7.820009  |
| <b>Área</b>                    | 40 ha (1 parcela)  |
| <b>Densidade de sementeira</b> | 180 kg/ha  |
| <b>Data de sementeira</b>      | Outubro de 2017  |
| <b>Colheita</b>                | Julho de 2018  |
| <b>Amostragem</b>              | 2 pontos (NDVI e NDWI superiores e inferiores)   |
| <b>Validação</b>               | 6 plantas por ponto (altura das plantas, nº de filhos e produtividade/m <sup>2</sup> ) |

Quadro 6 – Itinerário técnico da cultura do Trigo

| Itinerário Técnico - Trigo |                          |
|----------------------------|--------------------------|
| Data                       | Operação cultural        |
| 10/10/2017                 | Gradagem                 |
| 25/10/2017                 | Herbicida Pré-Sementeira |
| 27/10/2017                 | Adubação de Fundo        |
| 27/10/2017                 | Sementeira (180 kg/ha)   |
| 29/10/2017                 | Herbicida Pré-Emergência |
| 15/02/2018                 | Herbicida                |
| 10/03/2018                 | Adubação de Cobertura    |
| Início de Julho            | Colheita                 |

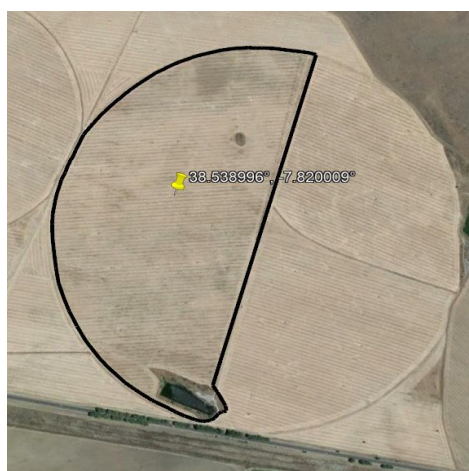


Figura 8 – Parcela de Trigo (Monte da Lagoa – 5 de Agosto de 2017)

### 3.1.1.1 Caracterização climática de Évora

A zona de Évora é marcada pela amplitude térmica devido à latitude e ao afastamento marítimo, que se torna especialmente significativa entre as estações de Inverno e Verão, atingindo normalmente temperaturas bastante elevadas nos meses de Julho, Agosto e Setembro contrastando com as baixas temperaturas sentidas nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro. De acordo com a classificação de Köppen, trata-se clima temperado húmido (Csa) em que a estação seca coincide com o Verão (Azevedo, 1971), característica do clima mediterrânico.

Quanto à precipitação média anual, entre 1981 e 2010, esta rondou os 581 mm, ocorrendo principalmente nos meses relativos ao Inverno e Primavera, sendo praticamente nula no Verão. Na figura 9, encontra-se o gráfico termopluiométrico referente à zona de Évora.

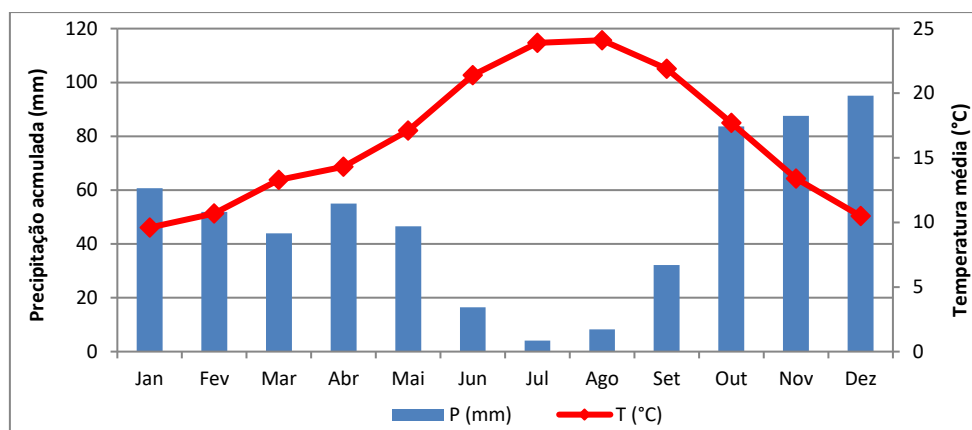


Figura 9 – Gráfico termopluiométrico da zona de Évora entre 1981-2010 (IPMA)

### 3.1.1.2 Caracterização edáfica da parcela da cultura de Trigo

A área onde foi instalada a cultura de trigo é constituída maioritariamente por Solos Mediterrâneos Pardos de Materiais Não Calcários (Carvalho Cardoso, 1965), mais especificamente pertencentes à família dos Solos Mediterrâneos Pardos Para-Barros de dioritos ou quartzodioritos ou rochas microfaneríticas ou cristalofílicas afins (Pm).

Para além da presença destes solos (Figura 10), existe ainda uma mancha de solos composta por Solos Hidromórficos Sem Horizontes Eluvial Para-Aluviossolos de aluviões ou coluviais, de textura mediana (Ca) e por Solos Hidromórficos Sem Horizonte Eluvial Para-Barros de rochas eruptivas ou cristalofílicas básicas (Cd). Na figura 10, encontra-se representada a carta de solos referente à parcela onde foi instalada a cultura do Trigo.

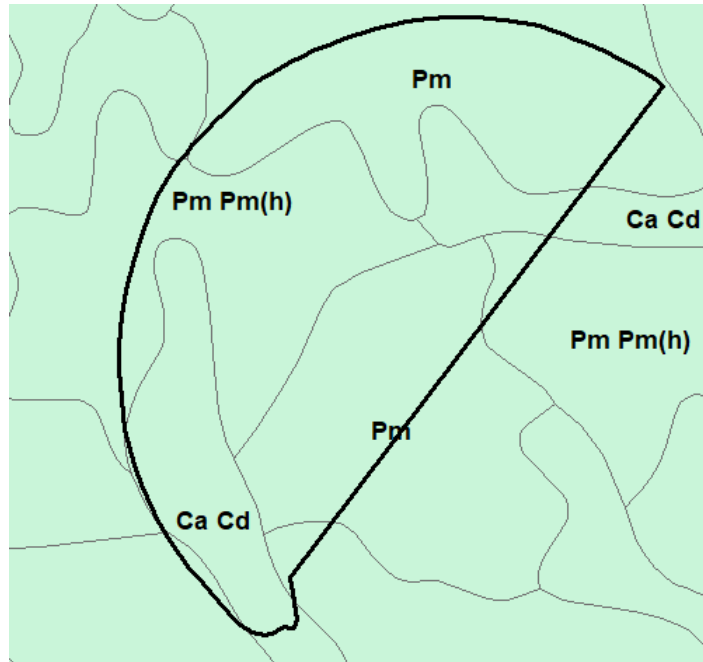


Figura 10 – Carta de solos da parcela referente à cultura do Trigo

### 3.1.1.3 Procedimentos realizados na cultura do Trigo

A cultura do trigo foi acompanhada desde sensivelmente 10 dias após a sua emergência (15 de Novembro de 2017) até poucos dias antes da colheita (14 de Junho de 2018).

A metodologia passou por identificar inicialmente dois pontos da parcela que apresentavam maior e menor NDVI e NDWI, designados por pontos 1 e 2 (Figura 11). Foi possível identificar estes pontos através de imagens obtidas pelo satélite Sentinel-2 que foram posteriormente processadas de forma a obter os índices anteriormente mencionados.

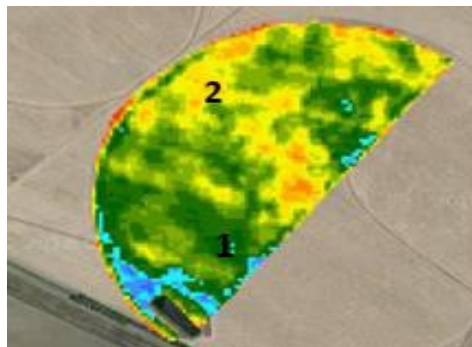


Figura 11 – Pontos escolhidos para análise da cultura do Trigo (1 de Dezembro de 2017)

Escolhidos os pontos, foram realizadas visitas à parcela onde se procedeu à medição da altura de 6 plantas, escolhidas aleatoriamente, em cada ponto, através da utilização de uma fita métrica. Além da medição da altura das plantas, foi também analisado o afilhamento das plantas tendo sido efectuado um registo fotográfico. Terminado o ciclo da cultura, foram escolhidos dois locais, aleatoriamente, nos dois pontos analisados até ali com o auxílio de um quadrado metálico com 1 m<sup>2</sup> de área e de uma tesoura para a recolha das plantas a amostrar, por forma a determinar a produtividade nos dois pontos. Após recolhidas as plantas em cada ponto, estas foram pesadas recorrendo a uma balança, antes da sua debulha, por forma a determinar o peso total da biomassa e foi também pesada a quantidade de grãos das amostras recolhidas.

As figuras 12a e 12b, mostram a medição realizada no dia 15 de Novembro de 2017, sensivelmente 10 dias após a emergência. A figura 12a diz respeito à zona em que o NDVI era superior e a figura 12b, à zona onde os teores de clorofila eram inferiores associados à menor densidade e desenvolvimento da vegetação. Já as figuras 13a (ponto 1) e 13b (ponto 2), retratam um desenvolvimento vegetativo mais avançado das plantas do ponto 1 (30 de Novembro de 2017).

Uma vez obtida a produtividade, foram feitas análises de variância ao nível da altura média das plantas observadas em cada ponto.

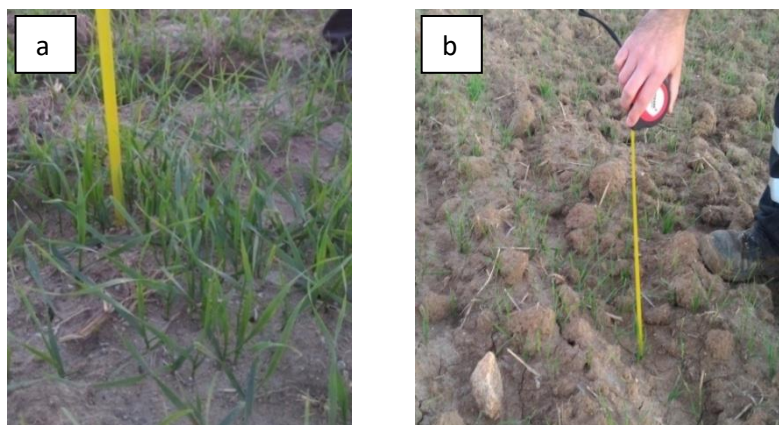


Figura 12 - Plantas de Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) a 15 /11/2017 (Monte da Lagoa)



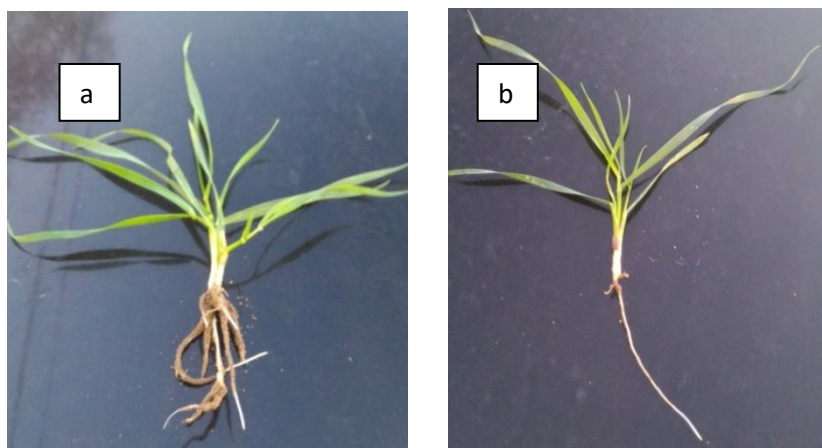


Figura 13 - Plantas de Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) a 30 /11/2017 (Monte da Lagoa)

### 3.1.2 Parcelas da Herdade do Falcão (Cultura do Brócolo)

As parcelas de Brócolo utilizadas neste estudo, situa-se a sensivelmente 12 km Sudeste da cidade de Évora, na Herdade do Falcão. A totalidade da área ocupada por brócolo foi de 80 ha (Quadro 7), repartidos por 5 parcelas de diferentes dimensões: T1 (13 ha), T2 (30 ha), T3 (10 ha), T4 (18 ha) e T5 (9 ha). A plantação teve início em Agosto de 2017 tendo sido feita de forma escalonada até 25 de Outubro de 2017 em todos os talhões presentes na figura 14, considerando a seguinte sequência: T1, T2, T3, T5 e T4. A colheita foi iniciada em Dezembro de 2017 até Fevereiro de 2018 (Quadro 8), com uma densidade de plantação de 33 000 plantas/ha na maioria das parcelas, exceptuando algumas zonas do talhão 4, onde a densidade de plantação foi de 16500 plantas/ha. Foram utilizados 3 sistemas de rega distintos: T1, T2 e T3 foram regados através de pivot, a parcelas T4 foi regada por gota-a-gota e T5 por aspersão fixa. A produção média total foi de 13,5 ton/ha.

Quadro 7 – Descrição da área de estudo e metodologia utilizada na cultura do Brócolo

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>Cultura</b>                 | <b>BRÓCOLO</b>  |
| <b>Local</b>                   | Lat: 38.521766; Long: -7.794114   |
| <b>Área</b>                    | 80 ha (5 parcelas)  |
| <b>Densidade de sementeira</b> | 33 000 plantas/ha e 16 500 plantas/ha (T4)                                  |
| <b>Data de sementeira</b>      | Agosto - Outubro de 2017  |
| <b>Colheita</b>                | Dezembro de 2017 – Março de 2018  |
| <b>Amostragem</b>              | 2 pontos (NDVI e NDWI superiores e inferiores)                              |
| <b>Validação</b>               | 10 plantas por ponto (comprimento e largura das folhas, diâmetro da cabeça) |

Quadro 8 – Itinerário técnico da cultura do Brócolo

| <b>Itinerário Técnico - Brócolo</b> |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>Data</b>                         | <b>Operação cultural</b>  |
| n.d                                 | Herbicida Pré-Plantação   |
| 08/2017 -10/2017                    | Adubação de Fundo<br>/Plantação (33000 plantas/ha e 16 500 plantas em T4) |
| n.d                                 | Herbicida Pós-Plantação   |
| n.d                                 | Adubação de Cobertura   |
| n.d                                 | Aplicação de Boro   |
| n.d                                 | Fungicida   |
| 12/2017 - 2/2018                    | Colheita  |

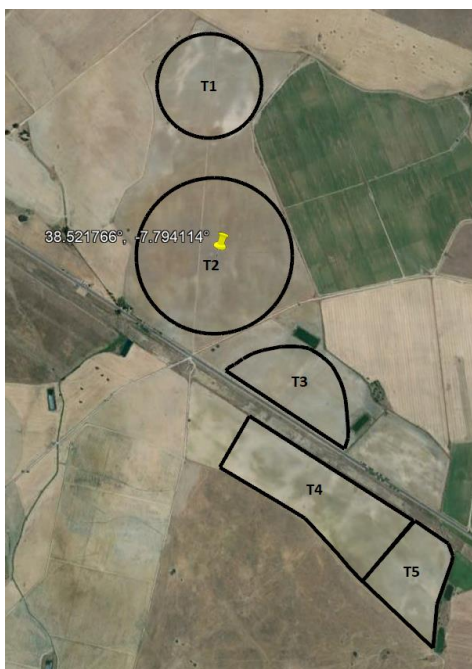


Figura 14 – Parcelas de Brócolo (Monte do Falcão - 5 de Agosto de 2017)

### 3.1.2.1 Caracterização edáfica das parcelas da cultura de Brócolo

Quanto à área ocupada pelo brócolo, a nível edáfico apresenta características muito semelhantes à zona onde foi instalado o trigo sendo constituída em grande parte por Solos Mediterrâneos Pardos de Materiais Não Calcários, como por exemplo Pm (Solos Mediterrâneos Pardos Para-Barros de dioritos ou quartzodioritos ou rochas microfaneríticas ou cristalofílicas afins; Pgn (Solos Mediterrâneos Pardos Normais de gneisses ou rochas afins); Pmg (Solos Mediterrâneos Pardos Normais de quartzodioritos). Os solos do tipo hidromórfico (Ca e Cd), que fazem parte da constituição do solo onde foi semeado o trigo também se encontram em duas parcelas da cultura de brócolo. Nas figuras 15, 16, 17, 18 e 19 apresentam-se as cartas de solo para os Talhões 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.



Figura 15 – Carta de solos da parcela T1 (Cultura do Brócolo)

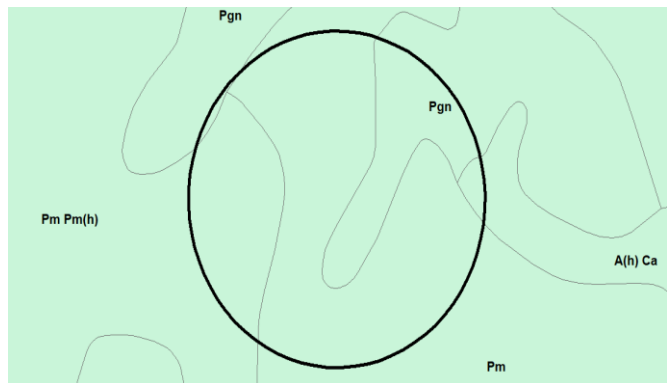


Figura 16 – Carta de solos da parcela T2 (Cultura do Brócolo)

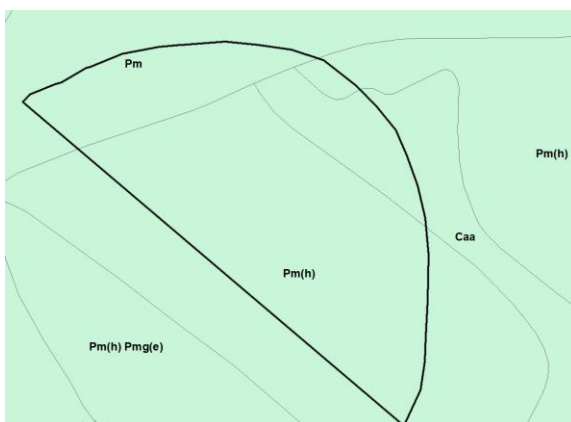


Figura 17 – Carta de solos da parcela T3 (Cultura do Brócolo)

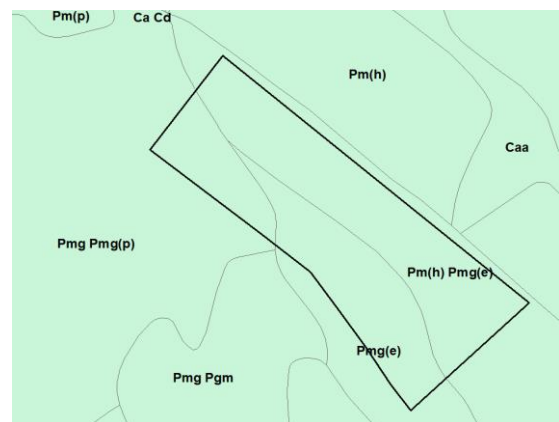


Figura 18 – Carta de solos da parcela T4 (Cultura do Brócolo)

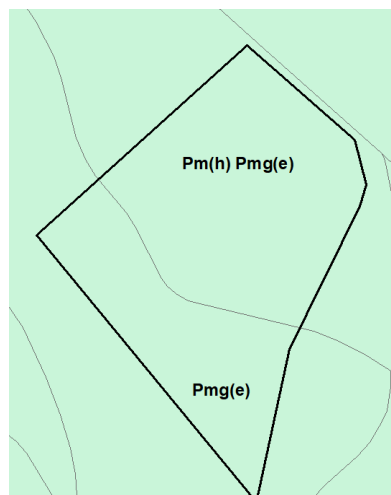


Figura 19 – Carta de solos da parcela T5 (Cultura do Brócolo)

### 3.1.2.2 Procedimentos realizados na cultura do Brócolo

Para a cultura do brócolo, o estudo desenvolveu-se entre dia 7 de Novembro de 2017 e dia 2 de Fevereiro de 2018. A metodologia foi semelhante à utilizada na cultura do Trigo, tendo sido escolhidos dois pontos distintos para cada parcela: um ponto referente a níveis de desenvolvimento vegetativo inferior (Figura 20: Ponto 2; Figura 21: Ponto 4; Figura 22: Ponto 6; Figura 23: Ponto 10 e Figura 24: Ponto 8) e de desenvolvimento vegetativo superior (Figura 20: Ponto 1; Figura 21: Ponto 3; Figura 22: Ponto 5; Figura 23: Ponto 9 e Figura 26: Ponto 7).

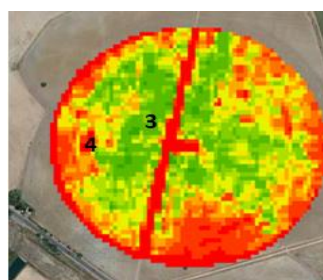
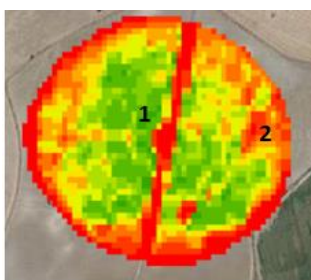


Figura 20 – T1 (Brócolo): Pontos amostrados (16/11/17)    Figura 21 – T2 (Brócolo): Pontos amostrados (16/12/17)



Figura 22 – T3 (Brócolo): Pontos amostrados (1/12/17)



Figura 23 – T4 (Brócolo): Pontos amostrados (15/1/18)



Figura 24 – T5 (Brócolo): Pontos amostrados (15/1/18)

Em cada parcela foram escolhidas aleatoriamente 10 plantas em cada ponto, sendo devidamente marcadas com fita de forma a acompanhar o seu desenvolvimento (Figura 25). Após a escolha, os parâmetros em estudo foram: dimensão das folhas (comprimento e largura) e diâmetro da inflorescência em que o instrumento de medição foi uma fita métrica.



Figura 25– Marcação das plantas de Brócolo com fita (21/12/17)

### 3.1.3 Parcela da Herdade de Boicilhos (Cultura do Arroz)

As parcelas ocupadas pela cultura do arroz situam-se a 17 km Este de Coruche, distrito de Santarém (Figura 26), na Herdade de Boicilhos. A área total ocupada pelas parcelas é de cerca de 50 ha (Quadro 9). Este arrozal foi semeado no dia 3 de Maio de 2017 e colhido no dia 23 de Setembro do mesmo ano. Foi utilizada uma variedade super precoce com uma duração de ciclo de 135 dias sendo a densidade de sementeira de 200 kg/ha (Quadro 10). A produção foi bastante diversa, variando desde os 3500 kg/ha até aos 10000 kg/ha tendo a média sido de 8600 kg/ha (Quadro 9).

Quadro 9 – Descrição da área de estudo e metodologia utilizada na cultura do Arroz

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Cultura</b>                 | <b>ARROZ</b>   |
| <b>Local</b>                   | Lat: 39.002014; Long: -8.366586  |
| <b>Área</b>                    | 50 ha (25 parcelas)  |
| <b>Densidade de sementeira</b> | 200 kg/ha  |
| <b>Data de sementeira</b>      | Maio de 2017   |
| <b>Colheita</b>                | Setembro de 2017   |
| <b>Produtividade</b>           | 3,5 – 10 ton/ha (Média: 8,6 ton/ha)  |
| <b>Amostragem</b>              | Análise do histórico de imagens NDVI e NDWI (Maio – Setembro de 2017)<br>Dados fornecidos pelo agricultor: produtividade média e condutividade eléctrica |

Quadro 10 – Itinerário técnico da cultura do Arroz

| <b>Itinerário Técnico - Arroz</b> |                                |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| <b>Data</b>                       | <b>Operação cultural</b>       |
| 12/04/2017                        | Gradagem                       |
| 18/04/2017                        | Gradagem                       |
| 19/04/2017                        | Chisel                         |
| 22/04/2017                        | Adubação de Fundo              |
| 26/04/2017                        | Gradagem                       |
| 26/04/2017                        | Herbicida Pré-Sementeira       |
| 27/04/2017                        | Alagamento dos Canteiros       |
| 03/05/2017                        | Sementeira (200 kg/ha)         |
| 03/06/2017                        | Retirada de água dos canteiros |
| 10/06/2017                        | Herbicida Pós-Emergência       |
| 14/06/2017                        | Alagamento dos Canteiros       |
| 24/06/2017                        | Adubação de Cobertura          |
| 13/09/2017                        | Retirada de água dos canteiros |
| 23/09/2017                        | Colheita                       |



Figura 26 – Parcelas de Arroz em Coruche (Herdade de Boicilhos - 5 de Agosto de 2017)

### 3.1.3.1 Caracterização climática de Coruche

De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Coruche classifica-se como clima temperado húmido (Csa) em que a estação seca coincide com o Verão (Azevedo, 1971). A temperatura média do mês mais frio é inferior a 18 °C mas é superior a 3 °C sendo que pelo menos um mês apresenta uma temperatura média superior a 10 °C. Tal como na zona de Évora, as temperaturas mais altas fazem-se sentir nos meses de Julho, Agosto e Setembro e as temperaturas mais baixas ocorrem no período relativo ao Inverno (Dezembro, Janeiro e Fevereiro).

Quanto à precipitação média anual, entre 1981 e 2010 rondou os 651 mm, ocorrendo principalmente nos meses relativos ao Inverno e Primavera, sendo praticamente nula no Verão.

Na figura 27, encontra-se representado o gráfico termopluviométrico referente à zona de Coruche.

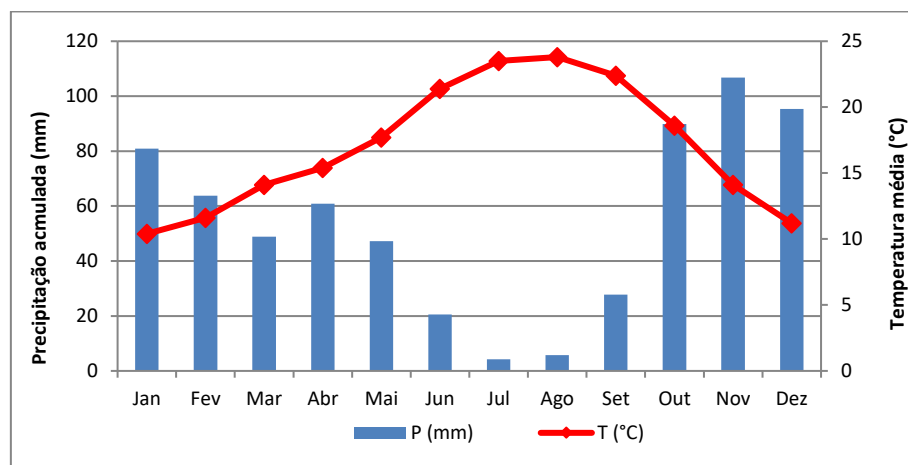


Figura 27 – Gráfico termopluviométrico da zona de Coruche entre 1981 - 2010 (IPMA)

### 3.1.3.2 Caracterização edáfica das parcelas da cultura de Arroz

O limite superior do arrozal é delimitado pelo Rio Sorraia sendo portanto naturalmente uma zona de Aluviões. Dividem-se então em Aluviossolos Modernos de textura ligeira e de textura mediana sem carbonatos (respectivamente Al e A). No entanto, esta parcela é também constituída por Solos Hidromórficos, particularmente os Solos Hidromórficos Sem Horizonte Eluvial Para-Aluviossolos de aluviões ou coluviais, de textura ligeira (Cal), já caracterizado anteriormente, e de textura mediana (Ca). Os solos do mesmo Subgrupo mas de textura ligeira, distinguem-se por terem um horizonte A1 com textura ligeira e menor percentagem de argila nos horizontes inferiores.

Os Aluviossolos são solos em que os processos de formação não actuaram tempo suficiente de forma a provocar diferenciações, exceptuando em muitos casos, o caso da matéria orgânica, a qual se acumula à superfície, e que nunca é encontrada em grandes quantidades devido ao bom arejamento da camada superficial levando a uma rápida mineralização. Não possuem verdadeiros horizontes genéticos embora apresentem muitas vezes uma significativa variação morfológica com a profundidade, especialmente no que toca à textura do solo. Quanto às camadas sedimentares, depositadas em diferentes ocasiões por acção da água e da gravidade e que se



diferenciam por variadas características tais como a espessura, a textura, a pedregosidade, a cor, entre outras, mostram normalmente transições abruptas ou nítidas de umas para as outras. Estes solos têm, geralmente, uma toalha freática mais ou menos profunda sujeita a oscilações acentuadas no decurso do ano, mas não mostram no perfil qualquer efeito acentuado da água estagnada; encontram-se porém geralmente humedecidos e influenciados fortemente na sua economia de água, vegetação e biologia pela presença dessa toalha freática.

Na época seca a toalha freática atinge os níveis mais baixos. Quando a descida é muito grande pode dar-se uma forte dessecação das camadas superficiais e o consequente aumento da sua compactidade, o que prejudica certamente a vegetação que os cobre. (Carvalho Cardoso, 1965).

Na Figura 28, encontra-se representada a carta de solos do arrozal da Herdade de Boicilhos.

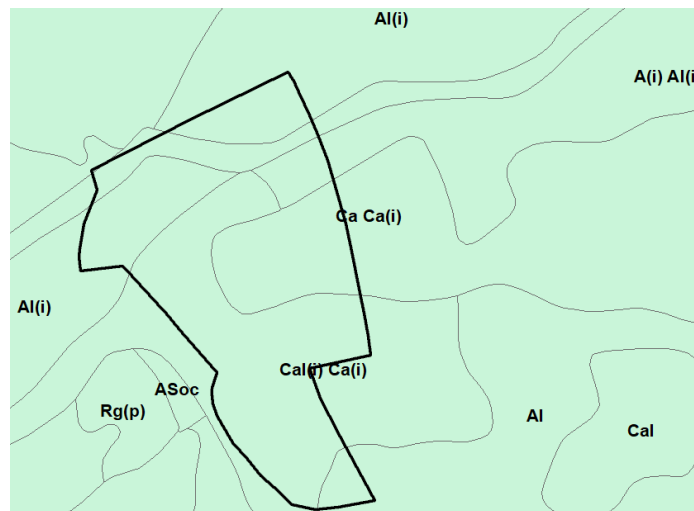


Figura 28 – Carta de solos das parcelas ocupadas pela cultura do Arroz

Em baixo (Figura 29), apresentam-se as cartas de condutividade eléctrica fornecidas pelo produtor, a profundidades de 30 e 80 cm realizadas pelo sensor VERIS, em Abril de 2017.

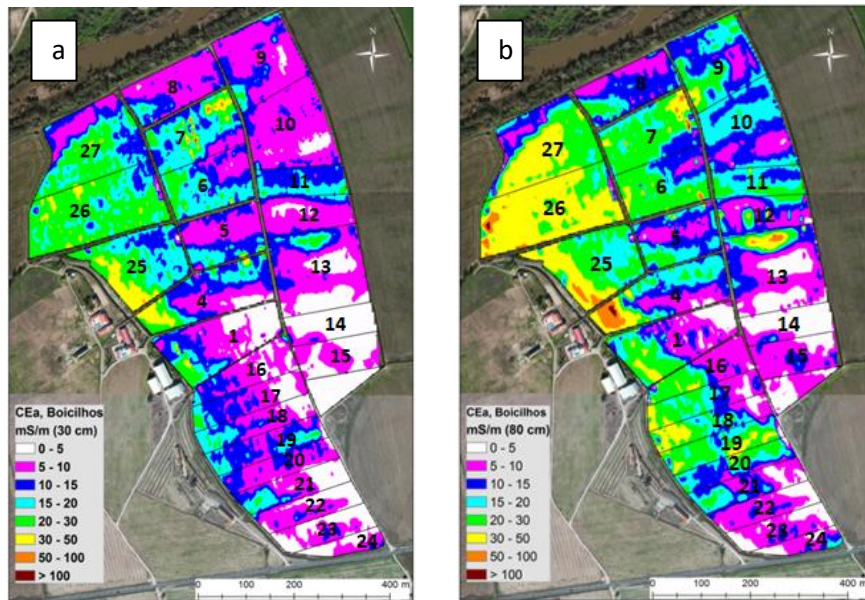


Figura 29 – Cartas de condutividade eléctrica a 30 cm (a) e 80 cm de profundidade (b) da cultura do Arroz (Herdade de Boicilhos)

### 3.1.3.3 Procedimentos realizados na cultura do Arroz

Enquanto as culturas do trigo e do brócolo foram acompanhadas durante a campanha, a cultura de arroz foi estudada com base no histórico de imagens NDVI e NDWI da campanha do ano anterior (Maio – Setembro de 2017). Tendo acesso a dados fornecidos pelo produtor, como o itinerário técnico da cultura (Quadro 10), cartas de condutividade eléctrica (Figura 29) e produtividades de cada parcela (Quadro 9) e imagens dos satélites Sentinel-2 processadas (Figura 30) e dados geoestatísticos (obtidos na plataforma do INALENTEJO) acerca dessas mesmas imagens para cada parcela, foi possível analisar os padrões de desenvolvimento da cultura do Arroz. Através dos parâmetros estatísticos associados a cada imagem, anteriormente mencionados, foi

possível obter as curvas relativas ao índice de desenvolvimento vegetativo médio (NDVI) bem como do teor médio de água nas folhas (NDWI).

Após a obtenção dos valores de NDVI e NDWI de cada imagem, foram realizadas análises estatísticas, nomeadamente análises de regressão, onde se procurou relacionar o NDVI com a produtividade de cada parcela (valor médio ao longo de todo o ciclo da cultura e valor médio correspondente ao pico de máximo vigor vegetativo). Também a condutividade eléctrica, a 30 cm de profundidade foi correlacionada com a produtividade bem como o NDVI com o NDWI.

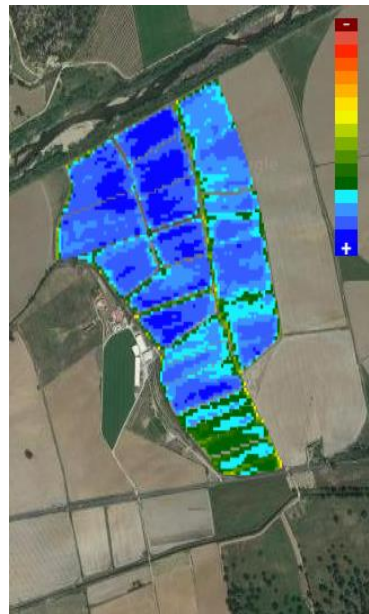


Figura 30 – NDVI Absoluto da cultura do Arroz (8/8/2017)

## 4. Apresentação e discussão dos resultados

### 4.1 Variabilidade temporal e espacial dos parâmetros avaliados na cultura do Trigo

A emergência das plantas de trigo semeadas neste pivot deu-se, sensivelmente, no dia 4 de Novembro de 2017. À medida que a cultura se desenvolve, maior a quantidade de clorofila nas plantas uma vez que o número de folhas e área foliar vai aumentando tal como a densidade de vegetação que também se torna superior acabando por cobrir parte do solo, que deixa de ter tanta influência nos resultados, já que a radiação reflectida pelo solo se torna muito baixa.

No dia 24 de Fevereiro de 2018, foi registado o pico de máximo NDVI médio (Figura 31 – NDVI: 0,76) acompanhado do terceiro maior valor de NDWI observado ao longo da campanha (0,454).

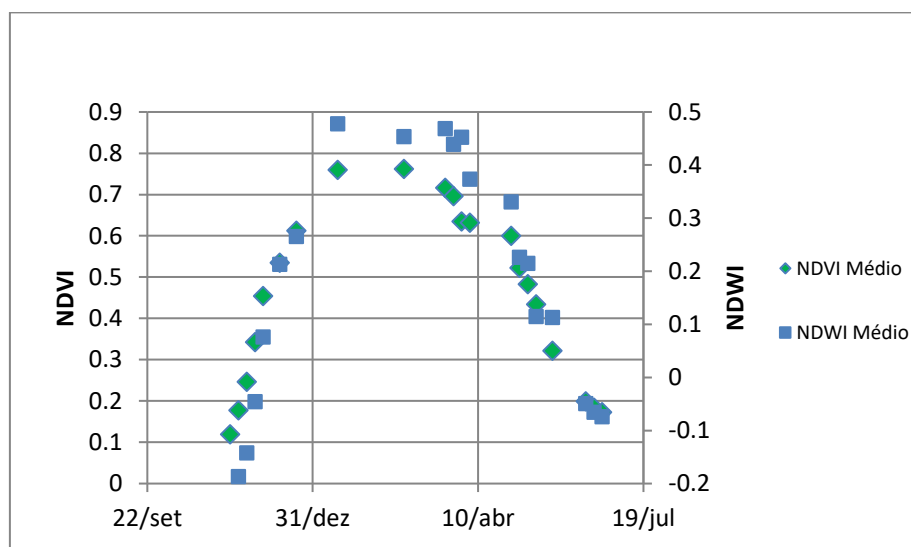


Figura 31 – Gráfico relativo ao NDVI e NDWI médio da cultura do Trigo (Pivot 1a)

No dia 31 de Março de 2018, os teores de água nas plantas ainda rondavam os 0,45 enquanto o vigor vegetativo se situava nos 0,63 fruto das fortes chuvadas que se fizeram sentir no mês de Março que vieram suprir as necessidades hídricas da cultura. No dia 19 de Junho de 2018 foi efectuada a colheita, data em que a cultura apresentava valores de

NDVI de 0,18 e de NDWI de -0,065, associado à fase final de desenvolvimento em que o teor de humidade era o desejado para a colheita.

Analisando o gráfico relativo aos percentis 20 e 80 do NDVI (Figura 32), é notória a existência de variabilidade na parcela em estudo nomeadamente entre os dias 26 de Novembro de 2017 e 21 de Dezembro de 2017, coincidente com o início de desenvolvimento da cultura. Esta variabilidade foi máxima no dia 1 de Dezembro de 2017, onde as plantas menos desenvolvidas apresentavam valores de NDVI de 0,35 enquanto que as mais desenvolvidas se situavam nos 0,54. Isto significa que à data, o nível de desenvolvimento entre plantas dentro da mesma parcela era bastante heterogéneo.

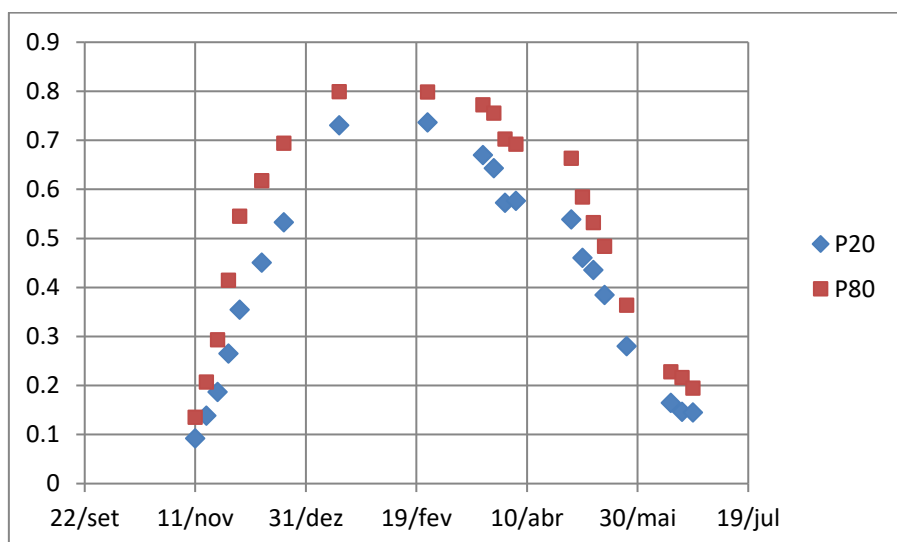


Figura 32 – Gráfico relativo aos percentis 20 e 80 (NDVI) – Trigo Pivot 1a

Em relação ao NDWI (Figura 33), no dia 1 de Dezembro de 2017, as plantas com menor teor de água nas folhas apresentavam valores negativos de NDWI (- 0,022). Já as que se encontravam em melhores condições hídricas, o NDWI era de 0,17.

A estes valores negativos de NDWI, estão associadas zonas de solo descobertas, nomeadamente zonas em que a densidade de vegetação era menor em comparação a outros pontos da parcela devido a problemas de germinação relacionadas com a estrutura do solo e tempo de germinação. Em solos argilosos, a germinação dá-se de forma mais lenta comparativamente a solos arenosos, o que reflecte o aumento menos

célere da temperatura dos solos argilosos devido à maior capacidade de retenção de humidade.

Embora esta cultivar tenha sido realizada em regadio, as regas efectuadas foram de intuito suplementar, não tendo sido efectuadas de forma frequente. Assim, é natural que a variabilidade tenha aumentado nos períodos onde os níveis de precipitação são normalmente inferiores (21 de Dezembro de 2017) e diminuído nos períodos mais chuvosos (Março de 2018 -Abril de 2018), uma vez que esta variabilidade entre plantas está intimamente relacionada com o tipo de solo onde estas estão instaladas. A maior variabilidade verificada nos períodos menos chuvosos está associada às plantas semeadas em solos mais arenosos, pois a água proveniente da rega não é devidamente aproveitada pelas plantas devido à fraca capacidade de retenção de água por parte destes solos, infiltrando-se rapidamente e sendo perdida por percolação. Já as plantas localizadas em solos argilosos, beneficiam da irrigação de forma superior pois o poder de retenção de água por parte dos solos argilosos é maior.

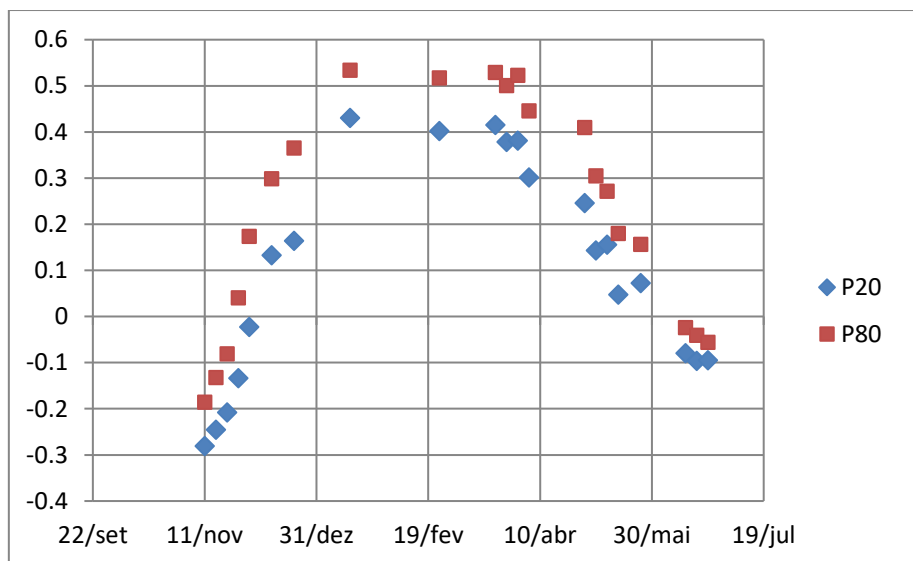


Figura 33 – Gráfico relativo aos percentis 20 e 80 (NDWI) – Trigo Pivot 1a

### 4.1.2 Validação no campo

Como é visível na figura 34, o NDVI no ponto 1 foi superior ao observado no ponto 2, desde o início da campanha do trigo até ao seu término.

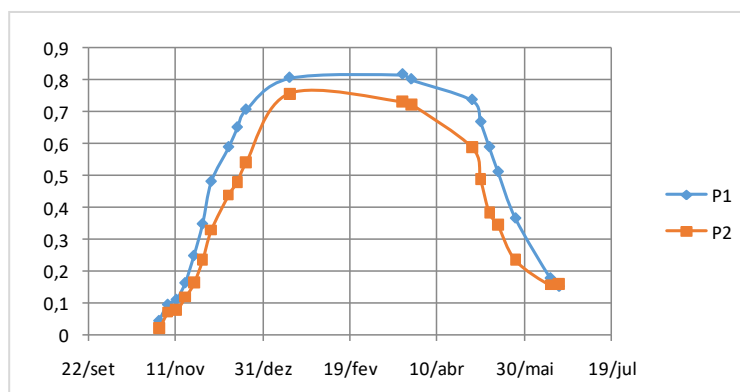


Figura 34 – Gráfico relativo ao NDVI médio da campanha da cultura do Trigo (Ponto 1 e 2)

No dia 30 de Novembro de 2017, foram efectuadas medições em 6 plantas situadas no ponto 1 e 2 (NDVI superior e inferior, respectivamente), nomeadamente ao nível das alturas. As plantas no ponto 1 (figura 35a e 37a) apresentavam-se mais desenvolvidas: média de 22,5 cm de altura. Já as referentes ao ponto 2 (figura 35b e 37b) apresentaram uma altura média de 15,6 cm. Nesta data, a fase de afilhamento já tinha sido iniciada sendo que as plantas recolhidas em ambos os pontos apresentavam 2 filhos (figuras 14 e 15).

Entre 15 de Janeiro de 2018 e 24 de Fevereiro de 2018, verificaram-se os maiores níveis de homogeneidade entre plantas dentro da parcela, período este que coincidiu com vigores vegetativos superiores. A esta data, as plantas cobriam já grande parte do terreno, levando a que existisse menor radiação reflectida pelo solo, daí os maiores níveis de homogeneidade.

No dia 19 de Fevereiro de 2018, as plantas no ponto 1 (figura 40a) apresentavam uma altura média 41,42 cm enquanto que as do ponto 2 (figura 40b) mediam em média 29,14 cm. Quanto à taxa de afilhamento, tal como no dia 30 de Novembro, esta era igual entre as plantas analisadas em ambos os pontos, 6 filhos (figuras 41a e b).

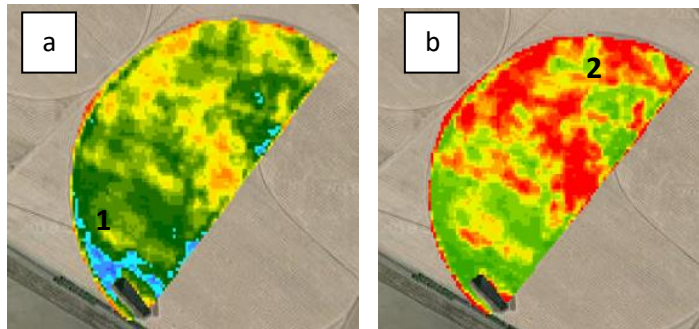


Figura 35 - NDVI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 15/1/17 (Monte da Lagoa)

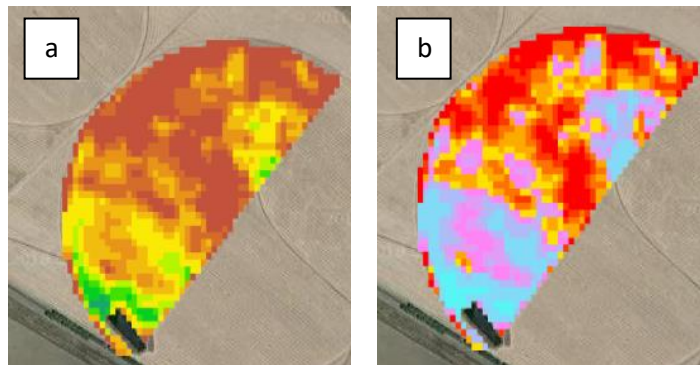


Figura 36 - NDWI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 15/1/17 (Monte da Lagoa)



Figura 37 – Cultura do Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 30/11/17 (Monte da Lagoa)



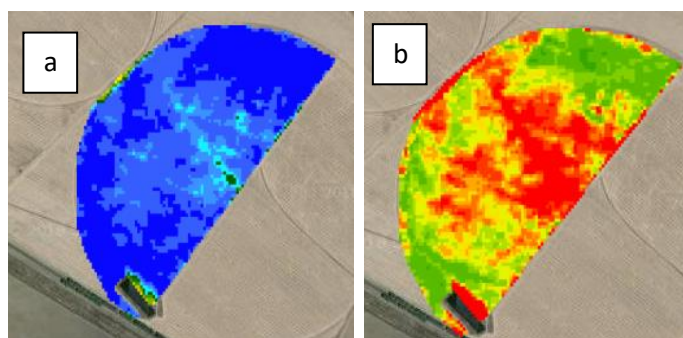


Figura 38 – NDVI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 24/2/18 (Monte da Lagoa)

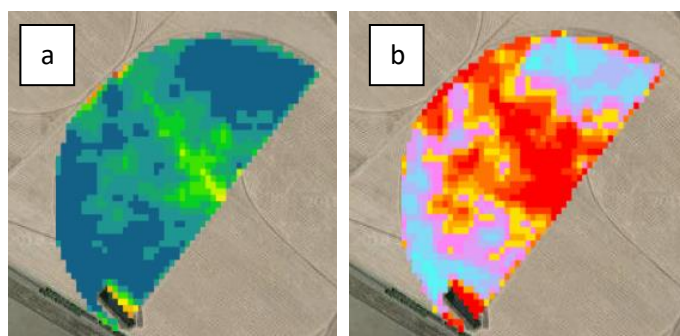


Figura 39 – NDWI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 24/2/18 (Monte da Lagoa)

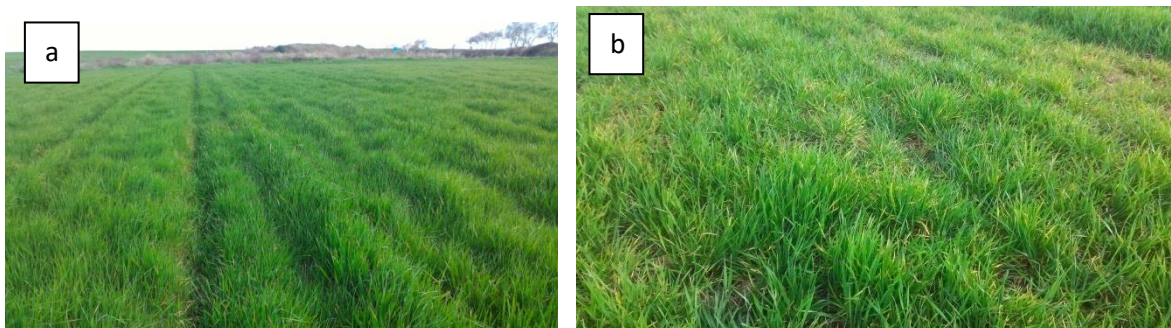


Figura 40 – Cultura do Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 19/2/18 (Monte da Lagoa)

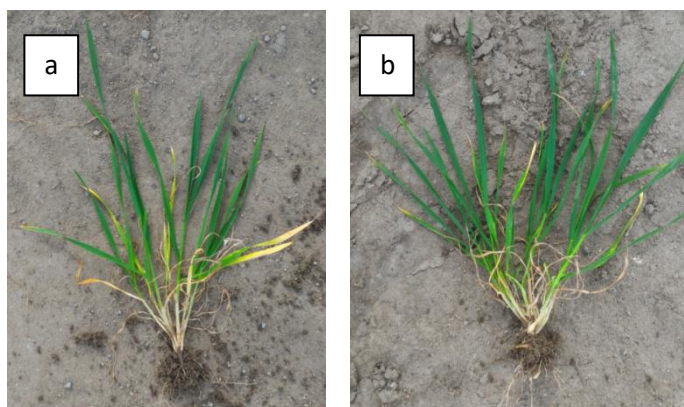


Figura 41 – Plantas de Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 19/2/18 (Monte da Lagoa)

No dia 26 de Março de 2018, depois de iniciada a fase reprodutiva, nomeadamente o espigamento, as plantas mais vigorosas (figura 42a) apresentavam NDVI de 0,75, enquanto que o NDVI das menos vigorosas (figura 42b) se situava nos 0,65. Quanto ao NDWI, as plantas do ponto 2 e ponto 1 apresentavam valores de 0,37 e 0,50, respectivamente.

A altura média das plantas do ponto 1 (figura 44a) continuou a ser superior à verificada (Quadro 12) no ponto 2 (figura 44b), sendo de 59,6 cm no ponto 1 e de 49,5 cm no ponto 2.

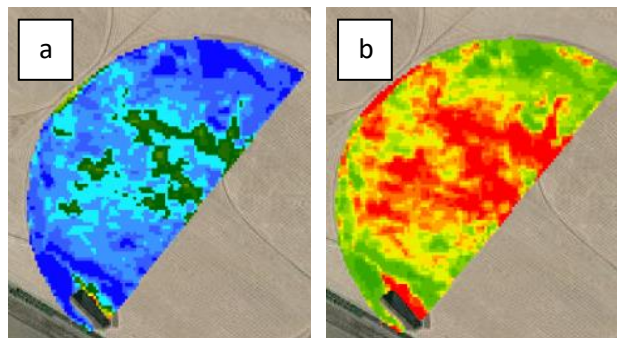


Figura 42 – NDVI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 26/3/18 (Monte da Lagoa)

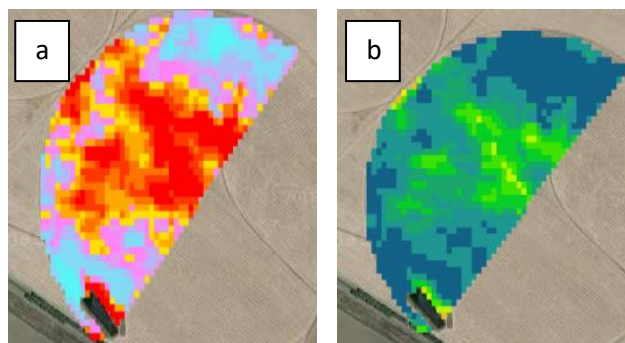


Figura 43 – NDWI Absoluto (a) e Relativo (b) da cultura de Trigo em 26/3/18 (Monte da Lagoa)

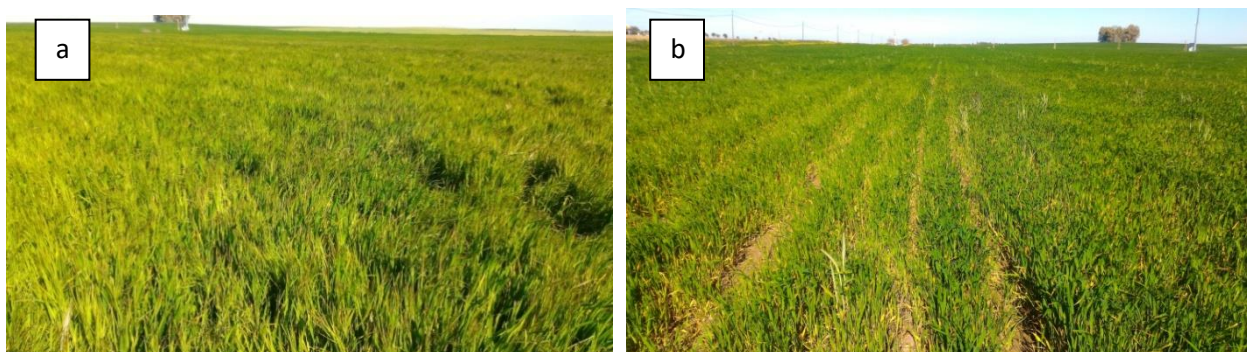


Figura 44 – Cultura do Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 26/3/18 (Monte da Lagoa)



Figura 45 – Plantas de Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 26/3/18 (Monte da Lagoa)

Após a colheita, foram pesadas as amostras recolhidas nos dois pontos (Figura 46a e b): biomassa total seca e biomassa seca dos grãos.



Figura 46 – Peso do grão das plantas de Trigo amostradas no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b) em 24/7/18 (Monte da Lagoa)

A biomassa total seca registada no ponto 1 foi de 886 g enquanto contrastando com as 773 g do ponto 2. Já quanto à biomassa seca dos grãos nos pontos 1 e 2 foi, respectivamente de 514,3 g e 281,1 g (Quadro 11).

Quadro 11 – Peso da biomassa total seca e dos grãos das plantas de Trigo amostradas no pontos 1 e 2

|                                | Ponto 1 (gramas) | Ponto 2 (gramas) |
|--------------------------------|------------------|------------------|
| <b>Biomassa Total Seca</b>     | 886              | 773              |
| <b>Biomassa Seca dos Grãos</b> | 514,3            | 281,1            |

As plantas localizadas no ponto 1 apresentaram de forma consistente, desde o início da cultura até à sua colheita, maior NDVI comparativamente às localizadas no ponto 2 (Figura 34). Embora a taxa de afilhamento tenha sido semelhante entre plantas em ambos os pontos, o crescimento vegetativo (altura média) foi superior nas plantas instaladas no ponto 1 (Figura 47a) em relação ao ponto 2 (Figura 47b), tendo estas diferenças sido significativas (Quadro 12). Consequentemente, as produções observadas neste último ponto foram superiores devido à maior capacidade fotossintética (fornecimento de fotoassimilados para o crescimento dos grãos).

Quadro 12 – Análise da variância da altura média das plantas de Trigo no ponto 1 e ponto 2

| Data       | Ponto   | Máximo   | Mínimo   | Média | Variância | Desvio-Padrão | valor-p ( $\alpha= 0,05$ ) |
|------------|---------|----------|----------|-------|-----------|---------------|----------------------------|
| 16/11/2017 | Ponto 1 | 16,1     | 8,2      | 12,2  | 0,966667  | 1,0           | 0,007843405                |
|            | Ponto 2 | 15,05964 | 4,940356 | 10    | 1,6       | 1,264911064   |                            |
| 01/12/2017 | Ponto 1 | 29,1     | 15,9     | 22,5  | 2,7       | 1,6           | 0,000105935                |
|            | Ponto 2 | 24,30765 | 7,025679 | 15,6  | 4,666667  | 2,160246899   |                            |
| 21/12/2017 | Ponto 1 | 50,5     | 7,5      | 29,0  | 28,8      | 5,4           | 0,002628017                |
|            | Ponto 2 | 31,1326  | 6,867399 | 19    | 9,2       | 3,033150178   |                            |
| 15/01/2018 | Ponto 1 | 53,6     | 20,4     | 37,0  | 17,2      | 4,1           | 2,25291E-05                |
|            | Ponto 2 | 28,38178 | 19,61822 | 24    | 1,2       | 1,095445115   |                            |
| 26/03/2018 | Ponto 1 | 93,3     | 29,4     | 61,3  | 63,86667  | 8,0           | 0,02338019                 |
|            | Ponto 2 | 92,23419 | -0,23419 | 46    | 133,6     | 11,55854662   |                            |

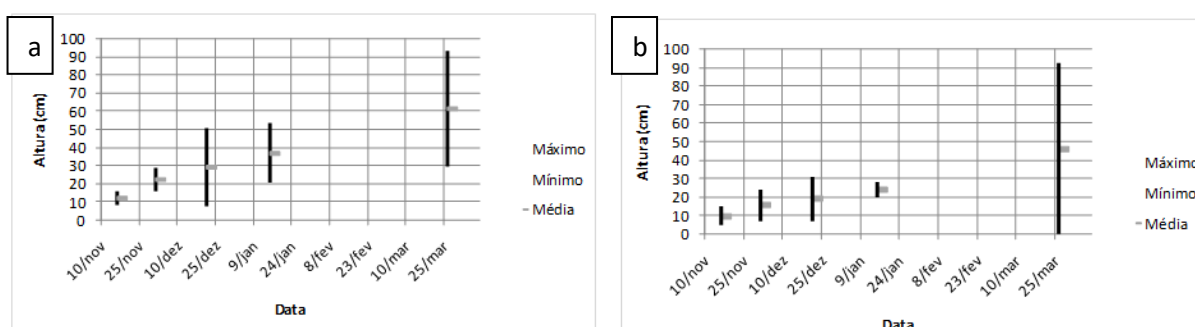


Figura 47 –Variâncias da altura das plantas de Trigo no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b)

No ponto 2, o crescimento vegetativo deu-se de forma mais lenta provavelmente devido aos problemas de estrutura do solo, notória na figura 37b, onde foi visível a presença de torrões de grandes dimensões. Além da germinação se dar de forma mais lenta nos solos

com maior teor em argila (ponto 2), o problema apontado à estrutura do solo poderá também ter interferido com a emergência. Assim, no futuro, esta zona necessitaria de uma maior densidade de sementes de forma a atingir produtividades superiores.

A maior tendência para encharcamento em solos mais argilosos, comprovado pelas visitas ao campo em períodos posteriores à irrigação/precipitação, também poderá ter estado na origem do menor desenvolvimento vegetativo das plantas localizadas no ponto 2, problema este que não se observou nas plantas instaladas do ponto 1, onde o solo é composto por uma maior fracção de areia em relação ao solo do ponto 2. A nível hídrico, o tipo de solo e sua estrutura também certamente tiveram impacto na produção final já que solos mais argilosos aliados a problemas estruturais apresentam maiores dificuldades de infiltração da água, ficando indisponível para as plantas e consequentemente impossibilitando-as de realizar os processos de assimilação de nutrientes e actividade fotossintética podendo além disso, levá-las a situações de stress hídrico que poderá ter impacto na produção final. De resto, de Fevereiro de 2018 a Março de 2018, os níveis de precipitação na área não só foram bastante elevados como ocorreram de forma continuada, podendo ter interferido com o desenvolvimento normal das plantas uma vez que estas se encontravam na fase reprodutiva, determinante para a produtividade final.

Face ao exposto, o uso do Sentinel - 2, permitiu a detecção de zonas com diferentes níveis de produtividade.

## 4.2 Variabilidade temporal e espacial dos parâmetros avaliados na cultura do Brócolo

No Quadro 13, apresentam-se os valores NDVI e NDWI médios relativos aos picos atingidos pelas plantas em cada parcela ao longo do ciclo fenológico.

Quadro 13 – Pico Máximo de NDVI e NDWI ao longo da campanha (Brócolo)

| Parcela | Data       | Pico de NDVI Médio | Pico de NDWI Médio |
|---------|------------|--------------------|--------------------|
| T1      | 16/11/2017 | 0,73               | 0,58               |
| T2      | 16/12/2017 | 0,77               | 0,64               |
| T3      | 01/12/2017 | 0,74               | 0,61               |
| T4      | 15/01/2018 | 0,68               | 0,51               |
| T5      | 15/01/2018 | 0,73               | 0,56               |

O menor valor de NDVI (Quadro 13) nesta última parcela poderá ser explicado pela menor densidade de plantação, uma vez que houve zonas em que o produtor procedeu à plantação de uma linha de plantas, ao contrário do que se verificou nas restantes parcelas, onde as linhas de brócolos eram pareadas (figura 49a). Assim, nestas zonas a densidade de plantação foi de 16500 plantas/ha (Figura 49b), metade da densidade utilizada nas outras parcelas (33000 plantas/ha). Neste sentido, o NDVI foi influenciado pela menor população de plantas uma vez que a entrelinha nunca foi totalmente ocupada pelo contínuo desenvolvimento foliar.

Ao contrário da semelhança de valores de NDWI médios observados nas parcelas T2 e T3, as plantas da parcela T1 apresentaram, em média, menor teor de água nas folhas. Tal facto pode dever-se à presença de uma zona com problemas visíveis de encharcamento, onde o solo se aparentava sinais de compactação e, conseqüentemente, sem capacidade de infiltrar a água ficando indisponível para as plantas. Era também evidente a menor densidade de vegetação nesse local, fruto das condições propícias a asfixia radicular (Figura 50).

Na Figura 48, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 93%, evidencia a forte correlação entre o vigor vegetativo das plantas (NDVI) e o teor de água nas folhas (NDWI),

indicando que uma planta em melhores condições hídricas terá maior quantidade de clorofila. Ao contrário do que se verificou nas parcelas T1, T2 e T3, nas parcelas T4 e T5, a irrigação foi interrompida no final do ciclo da cultura, fase esta em que as plantas são especialmente exigentes resultando em menores valores de NDWI.

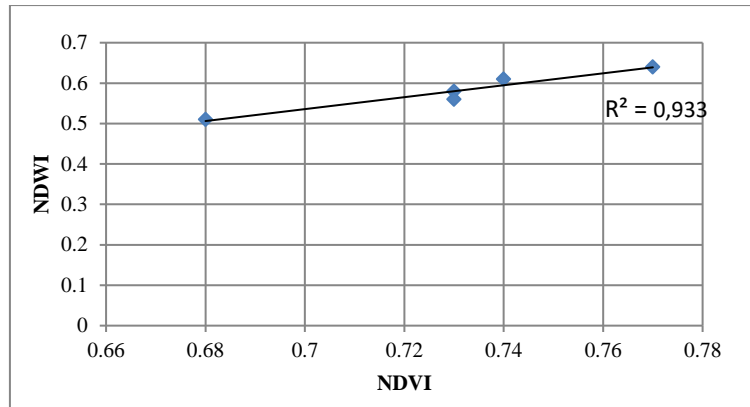


Figura 48– Correlação entre NDVI e NDWI da cultura do Brócolo com base nos valores máximos



Figura 49 – Densidade de plantação: 16500 plantas/ha (a), 33000 plantas/ha (b) - 18 de Janeiro de 2018



Figura 50 – Situação de encharcamento na parcela T1 (15 de Novembro de 2017)

As plantas instaladas na parcela T2 foram as que menos tempo demoraram a atingir NDVI de 0,7 (60 dias), valor este que indicia um já elevado vigor vegetativo. O mesmo se verificou nas plantas instaladas na parcela T3 (64 dias), seguido das plantas instaladas nas parcelas T5 e T4 (79 dias). As plantas que mais tempo demoraram a atingir estes valores encontravam-se na parcela T1, tendo demorado 81 dias. À excepção da parcela T1, as maiores velocidades de desenvolvimento vegetativo observadas nas parcelas T2 e T3 poderão estar relacionadas com as temperaturas. Segundo Almeida (2013), as temperaturas mais adequadas ao desenvolvimento da cultura situam-se entre os 13°C e os 20°C. Na zona de Évora, em Agosto e Setembro (período em que foram efectuadas as plantações nas parcelas T1, T2 e T3), as temperaturas médias são de respectivamente 24,1°C e 21,9°C. Em contraste, as plantações nas parcelas regadas por aspersão fixa e gota-a-gota foram feitas em Outubro, em que a temperatura média ronda os 17,7°C, explicando assim a maior morosidade no desenvolvimento vegetativo das plantas.

Além da zona problemática apontada em cima (Figura 50), é provável que o processo mais lento de desenvolvimento vegetativo das plantas instaladas na parcela T1 seja atribuída às condições edáficas do mesmo (solos com aparente maior teor de areia). Tendo em conta que o brócolo é uma cultura que requiere humidade adequada no solo tornando-se ainda mais importante na fase intermédia e final do ciclo (STRANGE et al., 2010), as dotações de rega bem como a sua frequência poderão não ter sido adaptadas ao tipo de solo, resultando em perdas por percolação devido às elevadas taxas de infiltração que se verificam nos solos arenosos.

No que toca à variabilidade do vigor vegetativo entre plantas dentro das parcelas, esta foi mais notória nas plantas instaladas nas parcelas T5 e T4 (Figuras 51 e 53, respectivamente).

As plantas localizadas na parcela regada por aspersão fixa (T5), foram as que apresentaram maior heterogeneidade, ao nível do desenvolvimento vegetativo entre plantas. No dia 11 de Novembro de 2017 (Figura 51), a variabilidade começou a acentuar-se (plantas menos e mais desenvolvidas apresentavam valores de NDVI de 0,25 e 0,41, respectivamente) sendo máxima no dia 16 de Novembro de 2017 (Figura 52), onde os menores e maiores valores de NDVI eram de respectivamente 0,32 e 0,50.



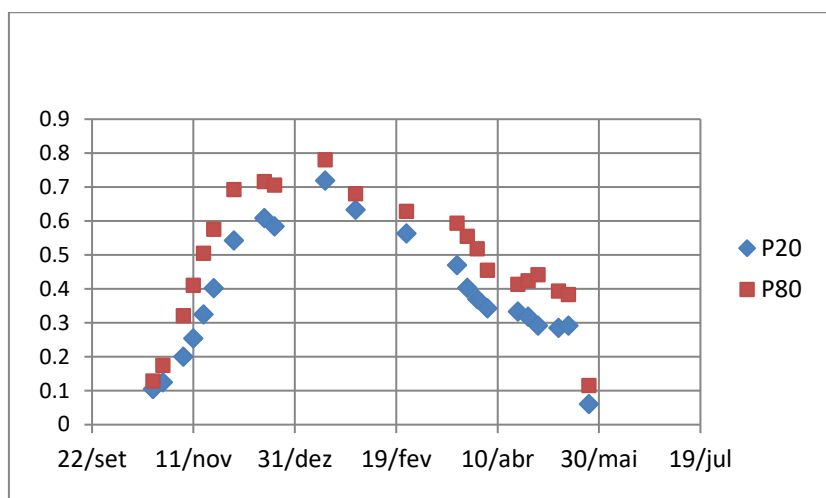


Figura 51 – Gráfico relativo aos percentis 20 e 80 (NDVI) – Parcela T5

Esta maior variabilidade, que coincidiu com os períodos de precipitação mais intensa ocorridos em Novembro de 2017, deveu-se a plantas localizadas numa zona de solo mais argiloso, susceptível a encharcamento. De resto, nas restantes visitas ao local de estudo, esta zona apresentou constantemente problemas de encharcamento sendo muitas vezes impossível entrar no terreno, mesmo em períodos em que não ocorreu precipitação. Assim, deveria ser adoptada uma estratégia diferente nesta parcela como por exemplo, antecipar a plantação (estação seca) ou seleccionar variedades tolerantes ao encharcamento.

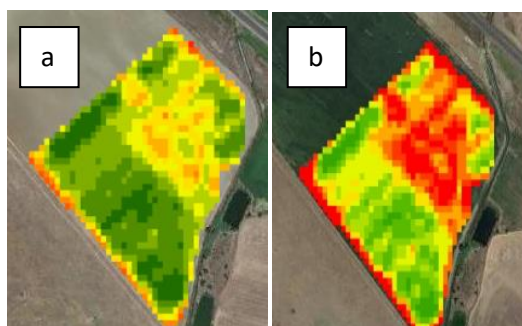


Figura 52 – NDVI absoluto (a) e relativo (b) na parcela de Brócolo “T5” (16 de Novembro de 2017)

A parcela onde foi instalado o sistema de rega gota-a-gota (T4) apresentou níveis de heterogeneidade entre plantas muito semelhantes aos observados na parcela regada por aspersão (T5). No entanto, a menor densidade de plantação observada nalgumas zonas da parcela pode ter tido influência preponderante em tais resultados.

A maior variabilidade na parcela T5 em relação à T4, decorreu entre 22 de Outubro de 2017 e 1 de Dezembro de 2017 enquanto que desde dia 1 de Dezembro de 2017 até 24 de Fevereiro de 2018, a heterogeneidade de desenvolvimento vegetativo entre plantas foi superior na parcela T4 (Figura 53).

O início do incremento da variabilidade entre plantas dentro da parcela T4 deu-se no dia 16 de Novembro de 2017 (Figura 53) em que as plantas com menor e maior vigor vegetativo apresentavam valores de 0,23 e 0,35, respectivamente, atingindo o seu máximo no dia 16 de Dezembro de 2017 (Figura 54) onde os menores e maiores níveis de desenvolvimento vegetativo eram, respectivamente, 0,48 e 0,64.

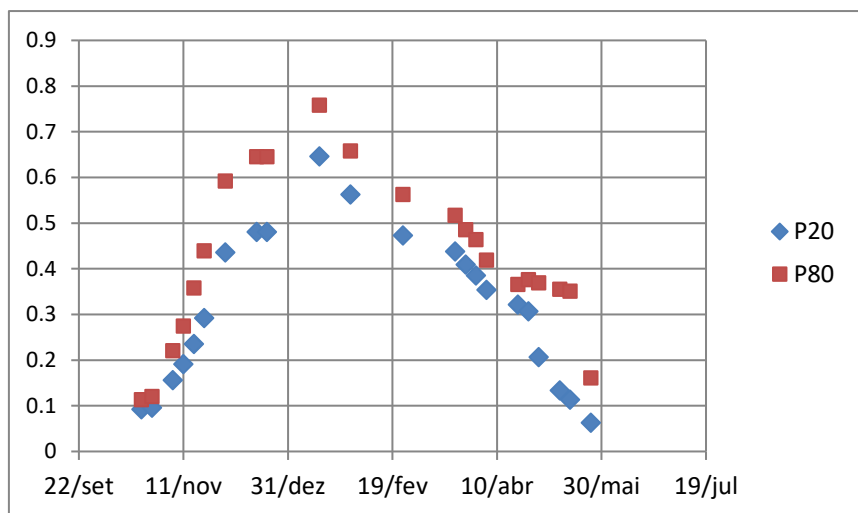


Figura 53 – Gráfico relativo aos percentis 20 e 80 (NDVI) – Parcela T4



Figura 54 – NDVI absoluto (a) e relativo (b) na parcela de Brócolo “T4” (16 de Dezembro de 2017)

#### 4.2.1 Validação no campo

Recorrendo ao Quadro 14, é possível observar as dimensões médias das folhas bem como dos diâmetros médios das inflorescências das plantas instaladas em zonas com NDVI superior nas 5 parcelas. Já o Quadro 15, é referente às dimensões medidas nas plantas situadas em zonas com NDVI inferior.

Quadro 14 – Dimensões médias das folhas e diâmetro médio das inflorescências dos pontos com NDVI superior

| Zona de NDVI Alto |       |              |                 |                                   |   |
|-------------------|-------|--------------|-----------------|-----------------------------------|---|
| Parcela           | Ponto | Data do Pico | Data de análise | Dimensões médias folhas (cm x cm) | Diâmetro médio das inflorescências (cm) |
| T1                | 1     | 16-nov-17    | 15-nov-17       | 35,6 x 21                         | 22                                      |
| T2                | 3     | 16-dez-17    | 13-dez-17       | 36,8 x 21,3                       | 15                                      |
| T3                | 5     | 1-dez-17     | 6-dez-17        | 33,1 x 18,5                       | 19,3                                    |
| T4                | 9     | 15/jan/17    | 18/jan/17       | 32,8 x 21,8                       | 8,3                                     |
| T5                | 7     | 15/jan/17    | 18/jan/17       | 35 x 22,1                         | 9,75                                    |

Quadro 15– Dimensões médias das folhas e diâmetro médio das inflorescências dos pontos com NDVI inferior

| Zona de NDVI Baixo |       |              |                 |                                   |   |
|--------------------|-------|--------------|-----------------|-----------------------------------|---|
| Parcela            | Ponto | Data do Pico | Data de análise | Dimensões médias folhas (cm x cm) | Diâmetro médio das inflorescências (cm) |
| T1                 | 2     | 16-nov-17    | 15-nov-17       | 29 x 16,6                         | 14                                      |
| T2                 | 4     | 16-dez-17    | 13-dez-17       | 30 x 18,2                         | 5,6                                     |
| T3                 | 6     | 1-dez-17     | 6-dez-17        | 25,8 x 16,8                       | 18,5                                    |
| T4                 | 10    | 15/jan/17    | 18/jan/17       | 30,2 x 22                         | 5,2                                     |
| T5                 | 8     | 15/jan/17    | 18/jan/17       | 26,2 X 19,5                       | 5,43                                    |

Os maiores diâmetros médios observados nas inflorescências das plantas instaladas na parcela T1 (Figura 55) atribuem-se, provavelmente, ao facto da plantação se ter iniciado nesta parcela, tendo as plantas sido favorecidas por um maior número de graus dia determinantes para uma maior rapidez de crescimento da inflorescência conforme constatado por Kauewicz et al. (2010).

Já na parcela T3 (Figura 56), a presença de inflorescências de maior diâmetro médio leva a crer que a quantidade de fósforo no solo/planta naquele local seriam superiores, visto que este nutriente tem grande preponderância na obtenção de elevadas produtividades e na iniciação da formação da inflorescência. (Islam et al., 2010 e Silva et al., 2016).



Figura 55 – Inflorescência de planta de Brócolo recolhida no ponto 1 (Parcela T1) em 15/11/17



Figura 56 – Inflorescência de planta de Brócolo no ponto 5 (Parcela T3) em 6/12/17

As plantas analisadas na parcela T2 (Figura 57), apesar de apresentarem maiores dimensões foliares, revelaram inflorescências de diâmetro inferior às observadas nas plantas das parcelas T1 e T3. Tal facto se pode dever ao desequilíbrio na nutrição neste local, nomeadamente presença de menores teores de fósforo, prejudicando o desenvolvimento da inflorescência. Já as adubações azotadas realizadas no final de Novembro, poderão ter contribuído para as maiores dimensões foliares. Assim, conforme as diferentes zonas, deveria ser pensada uma estratégia de fertilização diferenciada de forma a encontrar o equilíbrio entre o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo, aumentando a produtividade e reduzindo a aplicação de factores de produção. Este facto torna-se ainda mais relevante tendo em conta que para aproveitamento comercial, o diâmetro das inflorescências deve rondar os 14 cm, ou seja, o produtor deverá evitar crescimentos vegetativos e reprodutivos exagerados de forma a tornar a exploração mais rentável. Assim, as zonas que apresentem condições edáficas diferentes bem como níveis de fertilidade distintos, devem ser geridas de forma diferenciada.



Figura 57 – Planta de Brócolo no ponto 3 (Parcela T2) em 6/12/17

A plantação efectuada de forma mais tardia associada às menores temperaturas que se fazem normalmente sentir na estação de Inverno, são provavelmente as causas para as menores dimensões das inflorescências analisadas nas parcelas T4 e T5. Em Dezembro de 2017 e Janeiro de 2018, as temperaturas médias mínimas foram respectivamente 4,4 °C e 4,2 °C, tendo-se registado temperaturas mínimas absolutas de -4°C (4 de Dezembro

de 2017) e 0,1 °C (12 de Janeiro de 2018), o que terá tido impacto no desenvolvimento da cultura, uma vez que abaixo dos 5 °C, este é afectado (Almeida, 2013).

As visitas à parcela T3, indicaram constantes níveis de humidade (sem evidência de encharcamento) no solo e nas plantas, factores muito importantes para que a cultura possa atingir máxima produtividade e qualidade, especialmente durante a fase de formação das inflorescências (STRANGE et al., 2010).

Na parcela T2, a diferença entre o diâmetro médio das inflorescências das plantas localizadas em locais com NDVI superior e inferior foi de 10 cm. Também as dimensões foliares diferiram bastante sendo consideravelmente maiores no ponto cujo desenvolvimento vegetativo era superior.

As plantas instaladas no ponto 4, de menor NDVI apresentavam menor exuberância vegetativa provavelmente fruto do tipo de solo, que parecia apresentar-se mais compactado afectando o desenvolvimento radicular conforme verificado no terreno tendo tido impacto no desenvolvimento das plantas (figura 58).



Figura 58 – Plantas de Brócolo no ponto 4 (Parcela T2) em 16/12/17

As maiores dimensões foliares das plantas localizadas em zonas de menor desenvolvimento vegetativo foram observadas na parcela T4 (Figura 59). Estudos realizados por Jett et al., (1995), demonstraram que menores densidades de plantação resultaram em plantas com biomassa superior. Assim, o facto de nesta zona ter sido plantada apenas uma linha ao contrário da estratégia de linhas pareadas observadas nas restantes parcelas terá resultado em menores fenómenos de competição favorecendo um maior desenvolvimento vegetativo. No entanto, ao nível do diâmetro médio das

inflorescências, estas apresentaram os menores valores devido às baixas temperaturas que se fizeram sentir.



Figura 59 – Plantas de Brócolo no ponto 4 (Parcela T4)

A zona NDVI inferior referente à parcela regada por aspersão fixa apresentou plantas com dimensões algo inferiores. Este fenómeno deve-se à situação constante de encharcamento (Figura 60) que se fez sentir nessa zona prejudicando as plantas lá instaladas uma vez que a presença de água excessiva contribui para a redução da produtividade e da qualidade do produto final bem como para o atraso na maturação da inflorescência.



Figura 60 – Zona de encharcamento no ponto 7 (Parcela T5)

Concluindo, a intenção do produtor não poderá passar por uma gestão que permita obter máxima produtividade devido aos limites das dimensões das inflorescências impostos pelas cooperativas. Sendo assim, a estratégia deverá passar por níveis de fertilização e irrigação adequados às diferentes zonas, por forma a não ocorrerem desenvolvimentos vegetativos excessivos prejudicando o crescimento das inflorescências, nem em dimensões exageradas destas.

Os calibres das inflorescências relativas às plantas instaladas em época quente (Agosto e Setembro) foram superiores aos registados nas plantas cuja época de plantação e desenvolvimento coincidiu com temperaturas mais baixas. Do ponto de vista comercial, os calibres atingidos pelas inflorescências respectivas às plantas instaladas em épocas mais tardias apresentaram maior valor devido às suas menores dimensões. As primeiras plantações, ainda no fim do verão, talvez pudessem ser efectuadas com uma maior densidade, por forma a aumentar a competição entre elas, reduzir o crescimento vegetativo e diminuir o tamanho médio da cabeça. Já quanto às plantações mais tardias poderão beneficiar de menores densidades de plantação, pois devido às baixas temperaturas, o desenvolvimento da cabeça não será tão acentuado.

Os diferentes níveis de desenvolvimento podem ser observados através das curvas de NDVI podendo haver a possibilidade de, em futuros trabalhos, tentar antecipar as datas de aparecimento das cabeças e do pico de produção.



### 4.3 Variabilidade temporal e espacial dos parâmetros avaliados na cultura do Arroz

Na figura 61, é possível observar a evolução da curva de NDVI, da cultura do arroz desde a sua emergência (20 de Maio de 2017) até à colheita (23 de Setembro de 2017). Já na figura 62, é apresentado o índice relacionado com o teor de água nas folhas (NDWI).

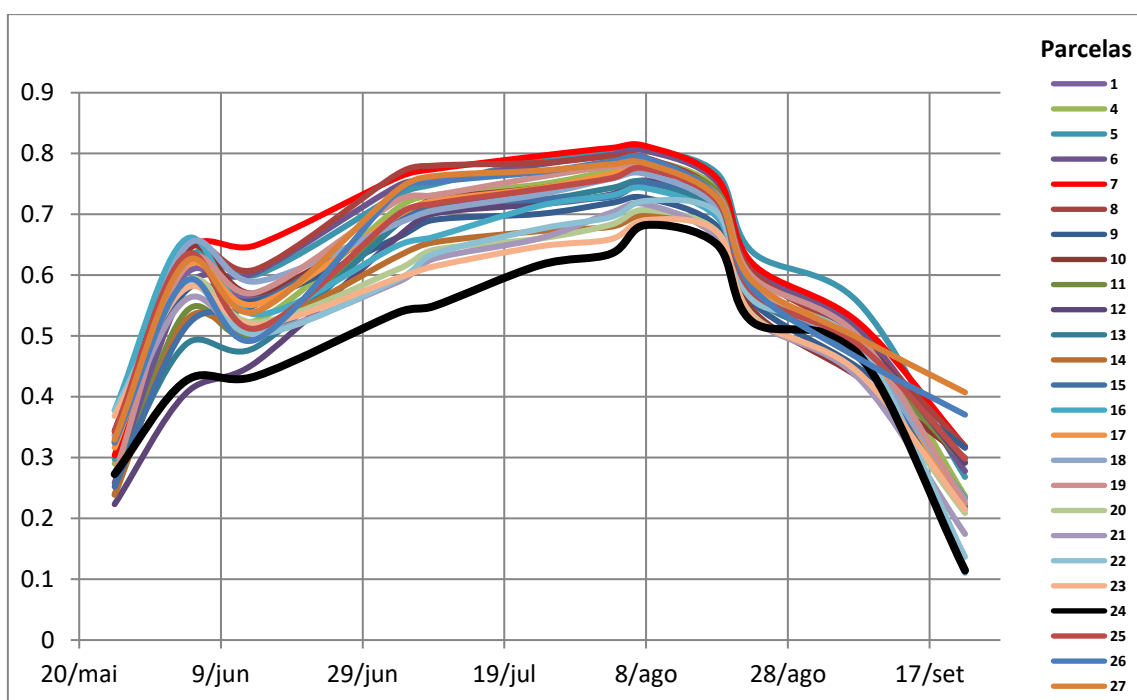


Figura 61 – Gráfico relativo ao NDVI Médio durante a campanha da cultura do Arroz relativo às 25 parcelas

A partir de dia 25 de Maio de 2017 há um incremento da curva, uma vez que à medida que as plantas se vão desenvolvendo, a quantidade de clorofila vai também aumentando (Figura 33). No dia 3 de Junho de 2017, procedeu-se ao início da retirada da água dos canteiros cujo alagamento tinha sido realizado no dia 27 de Abril de 2017. Facto este que se reflecte na Figura 62, onde a maioria das parcelas registou uma diminuição do teor médio de água nas folhas (NDWI).

Nos dias 10 e 14 de junho de 2017 (Figura 61), observa-se um decréscimo do desenvolvimento vegetativo médio (NDVI) das parcelas uma vez que foram aplicados herbicidas em pós-emergência para folha estreita e folha larga, respectivamente, resultando na morte das infestantes presentes à altura e consequentemente levando ao decréscimo da quantidade de clorofila (NDVI) nas parcelas.

Após o dia 14 de Junho de 2017, é notória a subida das curvas relativas ao vigor vegetativo (NDVI) e à quantidade de água nas folhas (NDWI) devido ao início de novo alagamento dos canteiros havendo assim disponibilidade hídrica para que as plantas pudessem realizar os processos fotossintéticos e de assimilação de nutrientes. No dia 24 de Junho de 2017, foi realizada uma fertilização de cobertura azotada de modo a permitir que as plantas continuassem o desenvolvimento vegetativo em pleno.

É notória a variabilidade entre parcelas (Figura 61) no período respectivo ao pico do máximo vigor vegetativo atingido pela cultura do arroz em cada parcela (8 de Agosto de 2017), o que se torna mais relevante uma vez que todos os talhões foram semeados no mesmo dia (3 de Maio de 2017). Tipo de solo (Talpur et al., 2013), densidade de sementeira (Carvalho et al., 2006), lixiviação de nutrientes, maiores concentrações de herbicida em certas parcelas fruto da passagem da água de talhão para talhão (Gonçalves et al., 2016) e níveis de infestação de ervas indesejáveis mais ou menos elevados (Heemst, 1985) poderão ser as explicações que resultam nesta grande variabilidade entre parcelas, algo que o empresário terá de ter em conta para que sejam tomadas decisões com o intuito de aumentar a rentabilidade de cada talhão.

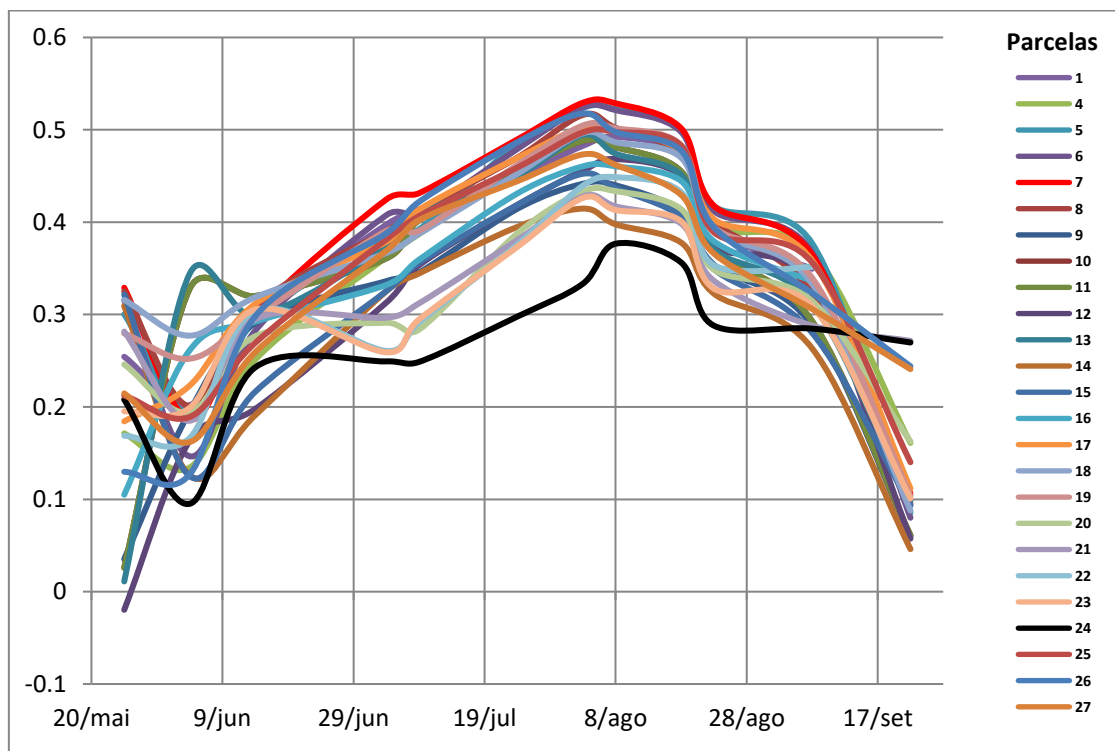


Figura 62 – Gráfico relativo ao NDWI Médio durante a campanha da cultura do Arroz relativo às 25 parcelas

Analisando as figuras 61 e 62, destacam-se as curvas relativas às parcelas 24 (linha preta) e 7 (linha vermelha) sendo que a parcela 24 apresenta, no geral, valores inferiores de desenvolvimento vegetativo (NDVI) e teor de água nas folhas (NDWI) na maior parte do ciclo da cultura traduzindo-se numa produtividade de 3500 kg/ha (Quadro 11) enquanto que a parcela 7 apresentou maiores valores médios destes dois índices até ao dia 18 de Agosto (produtividade de 8250 kg/ha).

No Quadro 16, estão representados os valores de NDVI e NDWI máximos que as plantas, em cada parcela, atingiram. Na figura 63, apresentam-se as figuras relativas ao NDVI absoluto e relativo, respectivamente, de cada parcela, referentes ao dia 8 de Agosto de 2017, data em que as plantas dentro de cada parcela atingiram, em média, o máximo vigor vegetativo ao longo do ciclo.

Quadro 16 – Pico médio máximo de cada parcela (NDVI e NDWI)

| Parcela   | NDVI         | NDWI         | Produtividade (kg/ha) |
|-----------|--------------|--------------|-----------------------|
| 1         | 0,755        | 0,492        | 8250                  |
| 4         | 0,788        | 0,498        | 8250                  |
| 5         | 0,806        | 0,523        | 8250                  |
| 6         | 0,804        | 0,524        | 8250                  |
| <b>7</b>  | <b>0,812</b> | <b>0,529</b> | <b>8250</b>           |
| 8         | 0,795        | 0,516        | 8250                  |
| 9         | 0,726        | 0,441        | 6600                  |
| 10        | 0,762        | 0,488        | 6600                  |
| 11        | 0,775        | 0,488        | 6600                  |
| 12        | 0,753        | 0,468        | 6600                  |
| 13        | 0,752        | 0,494        | 6200                  |
| 14        | 0,697        | 0,414        | 4500                  |
| 15        | 0,749        | 0,452        | 4500                  |
| 16        | 0,742        | 0,46         | 5200                  |
| 17        | 0,778        | 0,502        | 5200                  |
| 18        | 0,766        | 0,496        | 5200                  |
| 19        | 0,778        | 0,504        | 5200                  |
| 20        | 0,707        | 0,433        | 3500                  |
| 21        | 0,702        | 0,427        | 3500                  |
| 22        | 0,722        | 0,448        | 3500                  |
| 23        | 0,69         | 0,426        | 3500                  |
| <b>24</b> | <b>0,69</b>  | <b>0,41</b>  | <b>3500</b>           |
| 25        | 0,775        | 0,497        | 10000                 |
| 26        | 0,792        | 0,517        | 10000                 |
| 27        | 0,783        | 0,473        | 6600                  |

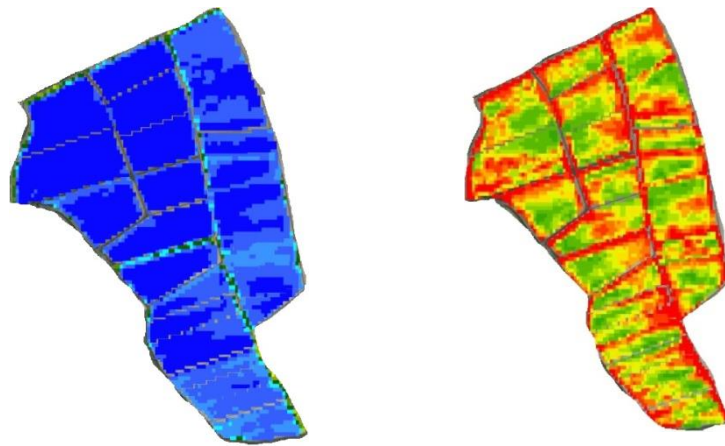


Figura 63– NDVI absoluto (à esquerda) e relativo (à direita) no dia 8 de Agosto de 2017

A correlação entre os máximos valores de NDVI e NDWI apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 90% ( $P < 0,01$ ), ou seja, existe uma relação linear entre estes dois parâmetros (Figura 64). Assim, plantas com maior teor de água nas folhas apresentam também maior quantidade de clorofila.

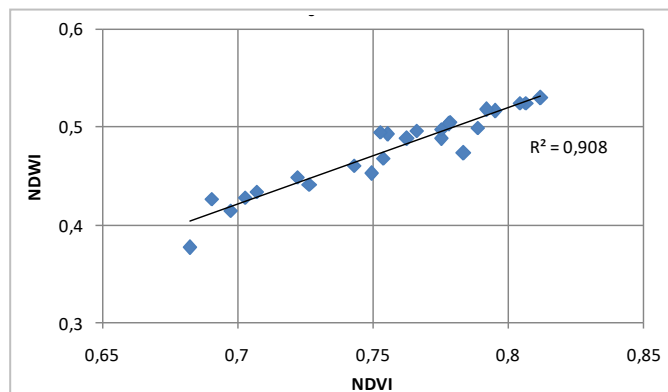


Figura 64 – Correlação entre NDVI e NDWI da cultura do Arroz com base nos valores máximos

Na figura 65 encontra-se a correlação ( $R^2 = 62,8\%$ ), altamente significativa ( $P < 0,01$ ), entre a produtividade com o máximo vigor vegetativo médio atingido pelas plantas de cada parcela (NDVI). Ou seja, plantas com maior teor de clorofila nas folhas, no período correspondente ao pico de desenvolvimento vegetativo, apresentaram também produtividades superiores.

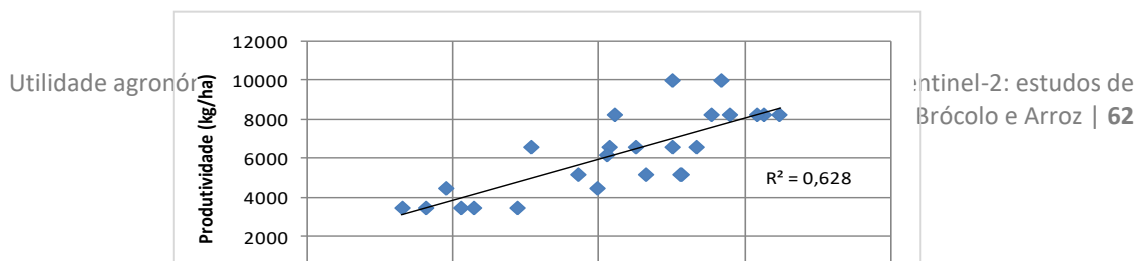


Figura 65 – Correlação entre o pico de NDVI e Produtividade da cultura do Arroz

Os parâmetros edáficos considerados óptimos para a obtenção de produções elevadas de arroz são: profundidade do solo, presença de horizonte compactado abaixo do horizonte superficial, alta retenção de humidade do solo, elevada drenagem interna e fertilidade do solo e estrutura do solo favorável ((Fageria, Slaton e Baligar 2003).

É notório um padrão de produtividades entre parcelas (Figura 66), parcelas situadas mais a Norte, mais próximas do rio Sorraia, foram mais produtivas, talvez devido ao tipo de solo presente (solos de aluvião), associados a maior fertilidade devido à deposição de sedimentos provenientes dos cursos de água. De forma geral, no período em que foi atingido o pico de NDVI e NDWI (Quadro 16), as plantas situadas nestas parcelas apresentaram valores mais elevados de NDVI e NDWI (parcelas: 7, 5, 6, 8, 26 e 4).

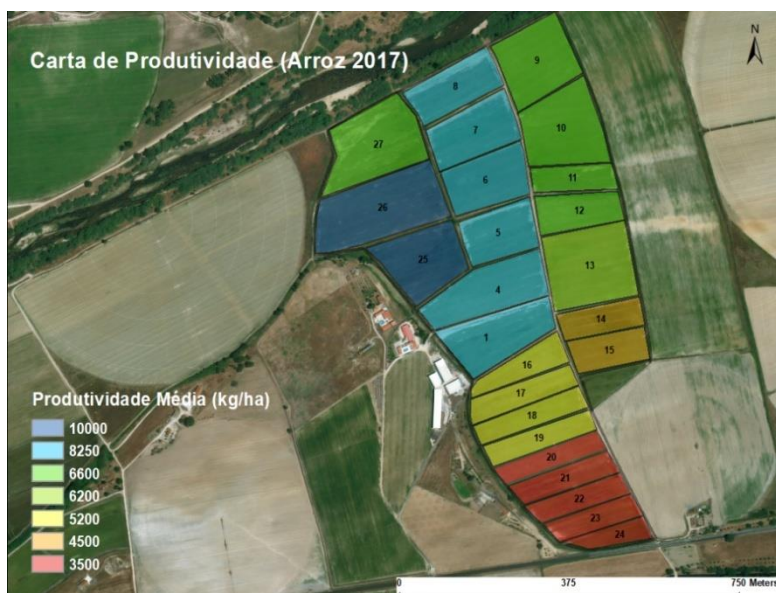


Figura 66 - Carta de Produtividade da cultura do arroz na Herdade de Boicilhos elaborada no software ArcGis

Por outro lado, as parcelas mais a Sul, apresentaram uma produtividade média de 3500 kg/ha (parcelas: 22, 20, 21, 23 e 24), com valores médios de NDVI e NDWI mais baixos comparativamente às plantas instaladas na maioria das restantes parcelas. Com base nas cartas de condutividade eléctrica das parcelas (Figura 29), importa realçar as condições edáficas daquela zona, com uma percentagem de areia superior aos solos observados na zona Norte traduzindo-se em menores índices de fertilidade. Outra explicação para as baixas produtividades poderá estar relacionada com as mudanças na velocidade da água nas parcelas provocadas pelo vento causando o desprendimento das plântulas de arroz do solo, aquando a sua emergência, uma vez que a função de suporte das plantas por parte dos solos arenosos é inferior à dos solos argilosos.

No Quadro 17, observam-se as médias dos valores médios de NDVI e NDWI da cultura do arroz, nomeadamente desde dia 25 de Maio de 2017 até 23 de Setembro de 2017, para cada parcela. De uma forma geral, as parcelas que apresentaram índices de desenvolvimento vegetativo superior no período respectivo ao pico máximo (Quadro 16), também apresentaram valores superiores de desenvolvimento vegetativo ao final do ciclo, exceptuando as parcelas 7, 1, 15, 22, 20 e 24.

Quadro 17 – NDVI e NDWI médios ao longo do ciclo da cultura do arroz

| Parcela | NDVI Médio (Ciclo) | NDWI Médio (Ciclo) | Produtividade (kg/ha) |
|---------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 1       | 0,581              | 0,391              | 8250                  |
| 4       | 0,602              | 0,351              | 8250                  |
| 5       | 0,636              | 0,372              | 8250                  |
| 6       | 0,623              | 0,37               | 8250                  |
| 7       | 0,646              | 0,384              | 8250                  |
| 8       | 0,639              | 0,368              | 8250                  |
| 9       | 0,579              | 0,301              | 6600                  |
| 10      | 0,602              | 0,336              | 6600                  |
| 11      | 0,587              | 0,336              | 66000                 |
| 12      | 0,561              | 0,297              | 6600                  |
| 13      | 0,568              | 0,34               | 6200                  |
| 14      | 0,539              | 0,292              | 4500                  |
| 15      | 0,576              | 0,315              | 4500                  |
| 16      | 0,577              | 0,358              | 5200                  |
| 17      | 0,599              | 0,361              | 5200                  |
| 18      | 0,6                | 0,365              | 5200                  |
| 19      | 0,607              | 0,366              | 5200                  |
| 20      | 0,549              | 0,315              | 3500                  |
| 21      | 0,54               | 0,324              | 3500                  |
| 22      | 0,555              | 0,332              | 3500                  |
| 23      | 0,543              | 0,3                | 3500                  |
| 24      | 0,492              | 0,27               | 3500                  |
| 25      | 0,604              | 0,356              | 10000                 |
| 26      | 0,615              | 0,358              | 10000                 |
| 27      | 0,629              | 0,344              | 6600                  |

Os maiores valores de NDVI e NDWI numa parcela podem não estar directamente associados a produtividades superiores visto que estes valores superiores poderão estar associados à presença de infestantes. Veja-se o caso da parcela 27 (produtividade de 6600 kg/ha), cujas plantas apresentaram valores médios de NDVI e NDWI superiores às parcelas 6 e 26 (produtividades de 8250 kg/ha e 10000 kg/ha respectivamente) e da parcela 19 (produtividade de 5200 kg/ha) cujos valores de NDVI e NDWI foram mais elevados comparativamente à parcela 25 (produtividade de 10000 kg/ha). Estes resultados poderão estar relacionados com a presença de maior número de infestantes nas parcelas menos produtivas.

O coeficiente de determinação (Figura 67) na correlação entre a média do NDVI médio, considerando o período que abrangeu o início e o final do ciclo, e a produtividade do arroz foi de 55,2% ( $P < 0,01$ ), comprovando que existe uma correlação significativa entre a quantidade de clorofila nas plantas de arroz (para a variedade em causa) ao longo do ciclo e a sua produtividade.

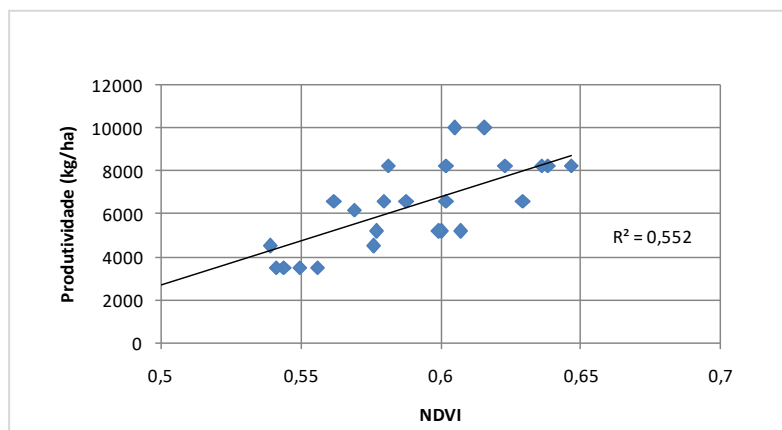


Figura 67 – Correlação entre o NDVI médio ao longo do ciclo e a produtividade (Arroz)

Na figura 29 apresentam-se dois mapas de condutividade eléctrica a diferentes profundidades (30 cm e 80 cm), fornecidas pelo agricultor. Embora nas duas parcelas mais produtivas não se tenham observado os valores mais elevados de NDVI e NDWI (Quadros 16 e 17), através deste mapa são notórios os níveis superiores de condutividade eléctrica nas parcelas 25 e 26, indicando níveis superiores de teor de

argila, levando a crer que a capacidade de troca catiónica, ou seja, capacidade de retenção de nutrientes é maior na zona mais a Norte beneficiando as plantas instaladas nesta zona. Já na parte Sul do local de estudo verificam-se padrões inferiores de condutividade eléctrica, provavelmente devido ao maior teor em areia. A prosperidade da cultura do arroz em solos muito arenosos pode também ser posta em causa pelo facto das plantas não conseguirem aproveitar os nutrientes aplicados ao solo devido ao facto de estes poderem ser facilmente lixiviados bem como devido à baixa capacidade retenção de humidade por parte destes solos (Fageria et al., 2011)

Neste estudo deu-se maior relevância à análise da condutividade eléctrica a uma profundidade de 30 cm uma vez que estudos indicam que 90% do comprimento total das raízes emitidas pelas plantas de arroz se encontram a 20 cm de profundidade (Beyroutyl et al., 1997) . De notar que as operações de mobilização nesta exploração são feitas a uma profundidade de 15 cm. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre a condutividade eléctrica média do solo a 30 cm de profundidade e a produtividade foi de 0,6, para um nível de significância de 0,01. (Figura 68).

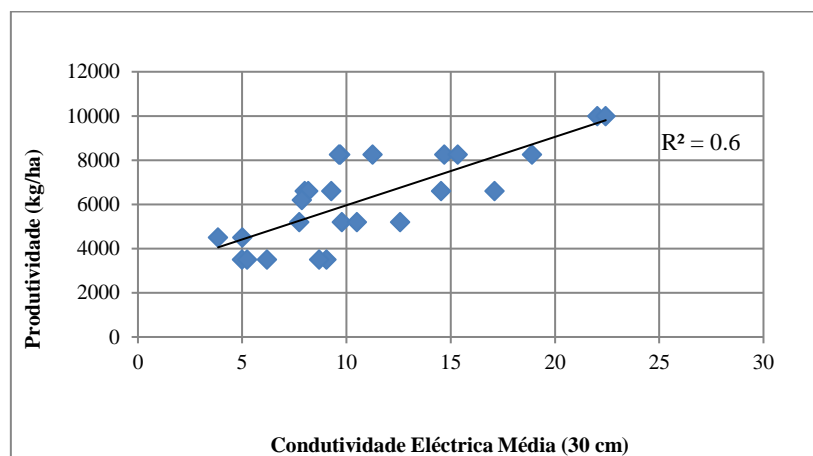


Figura 68 – Correlação entre a condutividade eléctrica média (30 cm) e a produtividade da cultura do Arroz



Nas Figuras 69 e 70, são representados os índices NDVI e NDWI médios ao longo do ciclo vegetativo das parcelas 24 e 25, respectivamente.

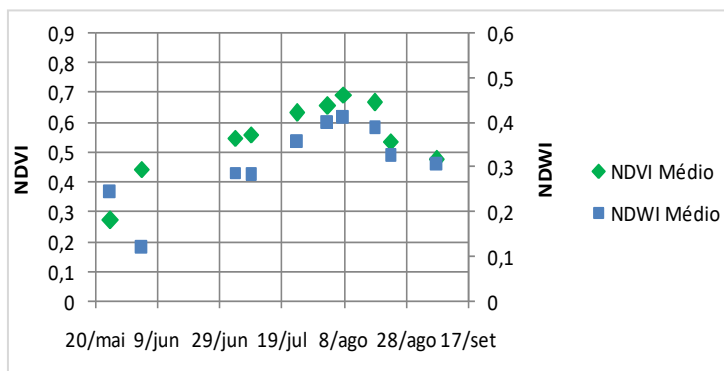


Figura 69 – Gráficos relativos ao NDVI e NDWI médios do ciclo da cultura de arroz (Parcela 24)

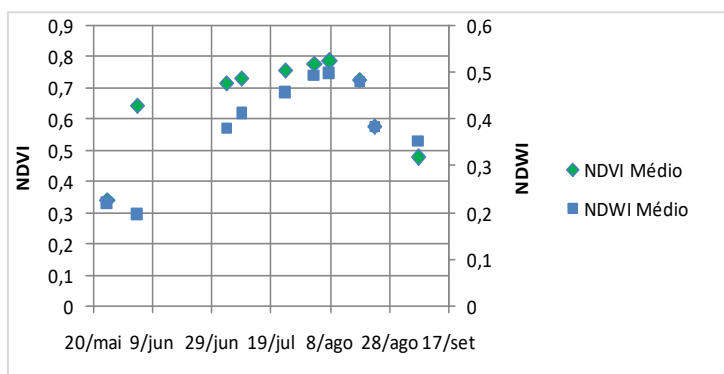


Figura 70 – Gráficos relativos ao NDVI e NDWI médios do ciclo da cultura de arroz (Parcela 25)

No decorrer da campanha, as plantas instaladas na parcela 24 (Quadro 18) apresentaram, em média, teores inferiores de NDVI e NDWI comparativamente com as plantas semeadas na parcela 25 (Quadro 19).

Quadro 18 – NDVI e NDWI médio (Arroz: Parcela 24)

| Parcela 24 |            |            |
|------------|------------|------------|
| Data       | NDVI Médio | NDWI Médio |
| 04/jun     | 0,44       | 0,12       |
| 04/jul     | 0,54       | 0,28       |
| 08/ago     | 0,69       | 0,41       |
| 07/set     | 0,47       | 0,3        |

Quadro 19 – NDVI e NDWI médio (Arroz: Parcela 25)

| Parcela 25 |            |            |
|------------|------------|------------|
| Data       | NDVI Médio | NDWI Médio |
| 04/jun     | 0,64       | 0,19       |
| 04/jul     | 0,71       | 0,38       |
| 08/ago     | 0,78       | 0,49       |
| 07/set     | 0,48       | 0,35       |

Quanto à variabilidade, avaliada pelos percentis, entre plantas dentro da mesma parcela, foi superior na parcela 24 (Quadro 20) em relação à parcela 25 (Quadro 21) tanto ao nível do NDVI como do NDWI. Tais diferenças podem-se dever a questões já levantadas anteriormente, tais como baixa de densidade de plantas face a germinações nulas ou má emergência, dificuldades de enraizamento devido ao maior teor de areia presente nos solos da parcela 24 bem como questões relacionadas com a lixiviação mais célere do azoto.

Quadro 20 – Percentis NDVI e NDWI (Arroz: Parcela 24) Quadro 21 – Percentis NDVI e NDWI (Arroz:Parcela 25)

| Parcela 24 | NDVI |      | NDWI |      |
|------------|------|------|------|------|
|            | P20  | P80  | P20  | P80  |
| 04/jun     | 0,39 | 0,49 | 0,06 | 0,19 |
| 04/jul     | 0,5  | 0,61 | 0,27 | 0,32 |
| 08/ago     | 0,68 | 0,73 | 0,39 | 0,44 |
| 07/set     | 0,46 | 0,5  | 0,28 | 0,35 |

| Parcela 25 | NDVI |      | NDWI |      |
|------------|------|------|------|------|
|            | P20  | P80  | P20  | P80  |
| 04/jun     | 0,6  | 0,68 | 0,16 | 0,22 |
| 04/jul     | 0,68 | 0,76 | 0,34 | 0,44 |
| 08/ago     | 0,76 | 0,81 | 0,47 | 0,53 |
| 07/set     | 0,44 | 0,51 | 0,33 | 0,38 |

## 5. Conclusão

O presente estudo demonstrou que a utilização dos índices NDVI e NDWI, obtidos a partir das imagens dos satélites Sentinel-2 na agricultura se reveste de um grande potencial na gestão agrícola, nomeadamente:

1 – No ensaio efectuado em trigo, as imagens de satélite, revelaram desde muito cedo, após a sementeira, duas zonas com potencial produtivo muito diferente, tendo sido demonstrado pela produtividade final recolhida em campo que estas duas zonas apresentavam diferenças de produtividade do simples para quase o dobro. Com tais diferenças de produtividade, seguramente que a eficiência da utilização dos factores de produção foi bem diferente de zona para zona da parcela, bem como o retorno do investimento efectuado. Do ponto de vista ambiental as zonas menos produtivas provocam impactos ambientais mais elevados, pois os nutrientes ao não serem aproveitados são transportados para as linhas de água e aquíferos. Uma das possíveis soluções propostas para otimizar o processo desta parcela poderá ser a sementeira e a fertilização diferenciadas;

2 – Relativamente à cultura do arroz poder-se-á dizer o mesmo que foi dito no ponto anterior, contudo acrescentar, que face às características particulares desta cultura (rega por encharcamento) a gestão dos nutrientes e, de forma especial, o azoto tem que ser mais cuidada e se possível mais fracionada. Foi evidente a relação entre a produtividade e o teor de clorofila (NDVI), bem como, entre a produtividade e a condutividade eléctrica do solo. Aqui a qualidade do solo poderá também ter influenciado a taxa de germinação das plantas, e como tal, prejudicado também a produtividade dos talhões mais arenosos. Os satélites permitiram também por isso neste caso levantar hipóteses de como aumentar a eficiência do processo, seja pelo maior fracionamento dos fertilizantes nas zonas mais arenosas ou pelo aumento da densidade da sementeira nas zonas onde a taxa de germinação parece ser mais reduzida;

3 – Relativamente ao brócolo, uma cultura totalmente diferente das anteriores, onde o maior valor está na cabeça da planta, os satélites conseguiram detectar diferenças dentro de cada parcela e diferenças entre parcelas, face à sua plantação escalonada. Verificou-se que a curva de NDVI pode eventualmente relacionar-se com a velocidade de crescimento do brócolo e, dessa forma, estimar a data do aparecimento da cabeça;

verificou-se ainda que a gestão diferenciada do número de plantas por hectare poderá também ser uma solução interessante a explorar por forma a obter plantas com diâmetros de cabeça mais normalizados, podendo tal densidade variar com a época do ano e a variação das temperaturas.

As imagens NDVI e NDWI poderão ajudar no apoio à tomada de decisão do gestor agrícola de cada uma destas culturas das seguintes formas:

1 – Conforme a previsão climática do ano: mais húmido ou mais seco, o agricultor poderá usar as imagens do histórico da cultura do trigo para decidir em que zonas deverá apostar numa densidade de sementeira superior de forma a maximizar a rentabilidade da parcela. Por exemplo, num ano húmido, os solos arenosos apresentarão à partida maior potencial produtivo pois as taxas de germinação serão mais elevadas comparativamente à observada nos solos argilosos devido ao facto de ser mais fácil aumentar a temperatura em solos arenosos, ocorrendo então condições ideais de humidade e de temperatura para o favorecimento da germinação. Já num ano seco, a tendência será a oposta visto que, é nos solos argilosos que irá haver maior potencial produtivo devido à sua maior capacidade de retenção de humidade.

2 – Tendo em conta o grande impacto da presença de infestantes na produtividade da cultura do arroz, as imagens poderão funcionar como auxiliar ao agricultor na detecção prévia de zonas com maior propensão ao aparecimento de infestantes, podendo antecipar a estratégia de combate a estas mesmas, reduzindo a aplicação de herbicidas. Produtos estes que para além dos impactos ambientais, podem também contribuir para a morte das plantas de arroz, consoante os níveis de concentração de substância activa nos canteiros.

3 – A nutrição na cultura do brócolo está intimamente relacionada com níveis de produtividade elevados, sendo importante saber à partida, quais as quantidades de nutrientes presentes no solo, nomeadamente fósforo e potássio devido ao impacto que têm no aparecimento e tamanho final da inflorescência. Com base nos diferentes padrões de desenvolvimento detectados pelas imagens NDVI e NDWI, estas poderão ser especialmente úteis para o agricultor, na escolha de zonas para amostragens de solo de forma a determinar qual a melhor estratégia de fertilização para cada local maximizando a margem líquida de cada parcela.

Em resumo, face ao apresentado, os satélites irão revolucionar nos próximos tempos a forma como fazemos agricultura e poderão sem nenhum tipo de dúvida aumentar a eficiência e a sustentabilidade da actividade agrícola.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A.; Marques, P. (2013). *A importância da cultura do arroz em Portugal e no Mundo: 3-5.*
- Anderson, G.; Everitt, J.; Richardson A.; Escobar, D. (1993). *Using satellite data to map False Broomweed (Ericamerria austrotexana) infestations on south Texas rangelands.* Weed Technology, 78(2), 865–871.
- Apan, A.; Held, A.; Phinn, S.; Markley, J. (2004). *Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery.* International Journal of Remote Sensing, 25:489–498.
- Basnyat, P.; McConkey, B.; Lafond, G.; Moulin, A.; Pelcat, Y. (2004). *Optimal time for remote sensing to relate to crop grain yield on the Canadian prairies.* Canadian Journal of Plant Science, 84: 97–103.
- Bausch, W.; Khosla, R; (2010). *QuickBird satellite versus ground-based multi-spectral data for estimating nitrogen status of irrigated maize.* Precision Agriculture, 11: 274–290.
- Beyrouy, C.; Norman, R.; Wells, B.; Slaton, N.; Grigg, B.; Teo, Y.; Gbur, E. (1997) *Distribution and Dynamics of the Rice Root System.* Department of Agronomy University of Arkansas, Fayetteville.
- Borgogno-Mondino, E.; Novello, V.; Lessio, A.; Palma, L. (2018). *Describing the spatio-temporal variability of vines and soil by satellite-based spectral indices: A case study in Apulia (South Italy).* International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 68, 42–50.
- Calado, J. (2012). Apontamentos da Unidade Curricular de Culturas Herbáceas Extensivas: Cereais de Outono-Inverno (Trigo): 2-3, Universidade de Évora.
- Calado, J. (2012). Apontamentos da Unidade Curricular de Culturas Herbáceas Extensivas: Cereais de Primavera-Verão (Arroz): 5-6, Universidade de Évora.
- Chen, D.; Huang, J.; Jackson, T. (2005). *Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands.* Remote Sensing of Environment, 98(2–3): 225–236.
- Chen, X.; Ma, J.; Qiao, H.; Cheng, D.; Xu, Y.; Zhao, Y. (2007). *Detecting infestation of take-all disease in wheat using Landsat Thematic Mapper imagery.* International Journal of Remote Sensing, 28: 5183–5189.

- Cibula, W.; Zetka, E.; Rickman, D. (1992). *Response of thematic bands to plant water stress*. International Journal of Remote Sensing, 13:1869-1880.
- Clevers, J.; Gitelson, A. (2013). *Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23: 344–351.
- Daughtry, C.; Walthall, C.; Kim, M.; Colstoun, E.;McMurtrey, J. (2000). *Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance*.Remote Sensing of Environment, 74(2):229–239.
- El-Magd I.; Tanton, T. (2003). *Improvements in land use mapping for irrigated agriculture from satellite sensor data using a multi-stage maximum likelihood classification*. International Journal of Remote Sensing, 24: 4197–4206.
- Fageria, N.; Carvalho, G.; Santos, A.; Ferreira, E.; Knupp, A.; (2011) *Chemistry of Lowland Rice Soils and Nutrient Availability*, Communications in Soil Science and Plant Analysis, 42(16): 1913-1933.
- Farg, E.; Arafat, S.; Abd El-Wahed, M.; El-Gindy, A. (2017). *Evaluation of water distribution under pivot irrigation systems using remote sensing imagery in eastern Nile delta*. Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 20: S13–S19.
- Fensholt, R., Sandholt, I. (2003). *Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment*. Remote Sensing of Environment, 87: 111–121.
- Franke, J., Menz G. (2007). *Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing*. Precision Agriculture, 8: 161–172.
- Franklin, P., Pearlstine, L., Dewitt B., Smith S., Watts A., Ifju P. (2006) *Autonomous unmanned aerial vehicle (UAV) for ecological research*.
- Funian, Z.; Hong, Z.; Jiayu, C.; Ruijun, W.; Fuklin, Y. (2013). *Preliminary investigation on difference of crop water stress index baseline for maize*. Chinese Agricultural Science Bulletin, 29:46–53.
- Gago, J.; Douthe, C.; Coopman, R. (2015). *UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture*. Agricultural Water Management, 153: 9–19.
- Galvão, L.; Roberts, D.; Formaggio, A.; Numata, I.;Breunig, F. (2009). *View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data*. Remote Sensing of Environment, 113: 846–856.
- Gamon J. (2011). *The Photochemical Reflectance Index (PRI) – a measure of photosynthetic light-use efficiency*, University of Alberta.

- 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.
- Gitelson, A. (2004). *Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation*. *Journal of Plant Physiology*, 161(2): 165–173.
- Grist, D. (1970). *Rice*. Longman Group Limited, London.
- Honkavaara, E.; Saari, H.; Kaivosoja, J.; Pölonen, I.; Hakala, T.; Litkey, P.; Mäkynen, J.; Pesonen, L. (2013). *Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV spectral camera for precision agriculture*. *Remote Sensing*, 5: 5006–5039.
- Huete A., Justice C. (1999). *MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document*, Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center.
- Huete, A. (1988). *A soil-adjusted vegetation index (SAVI)*. *Remote Sensing of Environment*, 25(3): 295–309.
- Idso, S.; Jackson, R.; Pinter, P.; Jr, R.; J, Reginato.; Hatfield, J. (1981). *Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability*. *Agricultural Meteorology*, 24:45–55.
- INE, I. P. (2018). *Estatísticas Agrícolas 2017*: 18, 19, 20 e 24. Lisboa-Portugal,
- Islam M.; Shaheb, M.; Rahman, S.; Ahmed, B.; Sarker, P. (2010). *Curd yield and profitability of broccoli as affected by phosphorus and potassium*. *International Journal of Sustainable Crop Production* 5(2): 1-7.
- Jackson, R. (1986). *Remote sensing of biotic and abiotic plant stress*. *Annual Review of Phytopathology*, 24: 265–286.
- Jenni, S.; Dutilleul, P.; Yamasaki, S.; Trembla, Y. (2001). *Brown bead of broccoli: II., relationships of the physiological disorder with nutritional and meteorological variables*. *Hort Science, Alexandria*, 36(7), 1228-1234.
- Jett, W.; Lewis; Morse, D.; Ronald; O 'dell, R.; Charles. (1995). *Plant Density Effects on Single-head Broccoli Production*, 30.
- Jia, L.; Yu, Z., Li, F.; Gnyp, M.; Koppe, W.; Bareth, G.; Zhang, F. (2012). Nitrogen status estimation of winter wheat by using an IKONOS satellite image in the North China Plain. In *Computer and Computing Technologies in Agriculture V - 5th IFIP TC 5/SIG 5.1 Conference, CCTA 2011, Proceedings (PART 2 ed., pp. 174-184)*. (IFIP Advances in Information and Communication Technology, 369 (2).
- Jordan, C. (1969). *Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor*. *Ecology*, 50 (4): 663–666.



- Kałużewicz, A.; Krzesinski; Wlodek; Knaflewski; Mikołaj; Lisiecka; Jolanta; Spizewski; Tomasz; Frąszczak; Barbara. (2010). *The effect of temperature on the broccoli yield and length of the period from head initiation to harvest*. Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus, 9.
- Kaufman, Y.; Tanre, D. (1992). *Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(2): 261–270.
- Kauth, R.; Thomas, G. (1976). *The tasselled cap - a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT*. in Proceedings of the LARS Symposia.
- Kim, M.; Daughtry, C.; Chappelle, E.; McMurtrey, J.; Walthall, C.; (1994) *The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (a par)*. in Proceedings of the 6th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, CNES, Phoenix, Arizona, USA.
- Lamb, D.; Brown, R. (2001). *Remote sensing and mapping of weeds in crops*. Journal of Agricultural Engineering Research, 78: 117–125.
- Large, E. C. (1954). *Growth stages in cereals*. Illustration of the Feekscale. Plant Pathology, 3, p. 128-129.
- Li, C.; Zhu, X.; Wei, Y.; Cao, S.; Guo, X.; Yu, X.; Chang, C. (2018). *Estimating apple tree canopy chlorophyll content based on Sentinel-2A remote sensing imaging*. Scientific Reports, 8(1).
- Liu, M.; Wang, T.; Skidmore, A.; Liu, X.; (2018). *Heavy metal-induced stress in rice crops detected using multi-temporal Sentinel-2 satellite images*. Science of the Total Environment, 637–638, 18–29.
- Marques Da Silva, J.R.; Sousa, A. (2012) *Apontamentos da Unidade Curricular de Geomática: Fundamentos Teóricos de Detecção Remota: 6-7*, Universidade de Évora
- Maydup, L. (2013) *Contribución de la Fotosíntesis de la Espiga al Rendimiento de Trigo pan (Triticum aestivum) en Condiciones Limitadas por la Disponibilidad de Asimilados Post-Antesis*. Argentina: Universidad Nacional De La Plata. Tese de Doutoramento.
- Miralles, D. (2004). *Consideraciones sobre ecofisiología y manejo de Trigo*. Información técnica de trigo. Campaña 2004. Publicación Miscelánea. INTA, 101(1):1–7.
- Peters, A.; Reed, B.; Eve, M.; McDaniel, K. (1992). *Remote-sensing of Broom Snakeweed (Gutierrezia sarthrae) with NOAA-10 spectral image processing*. Weed Technology, 6: 1015–1020.

- Piekarczyk, J.; Wojtowicz, M.; Wojtowicz, A. (2004). *Application of the remote sensing to monitoring of oilseed rape crop and estimation of its productivity*– Oilseed Crops XXV(1), 280–291.
- Prasad, A.; Chai, L.; Singh, R.; Kafatos, M. (2006). *Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 8: 26–33.
- Qi, J.; Chehbouni, A.; Huete, A.; Kerr, Y.; Sorooshian, S.; (1994). *A modified soil adjusted vegetation index*. Remote Sensing of Environment, 48(2): 119–126.
- Qingjiu, T.; Xiangjun, M. (1998). *Advances in study on vegetation indices*. Department of Pastoral Agricultural Science and Technology, 13: 327–333.
- Richardson, A.; Wiegand, C. (1997). *Distinguishing vegetation from soil background information*". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 43(12): 1541–1552.
- Silva, A. (1986). *A cultura do arroz (Oryza sativa L.) – Contribuição para o estudo da influência de algumas cultivares e de factores edafo-climáticos na acama, produção e duração do ciclo vegetativo da planta*. Relatório do estágio da licenciatura em ciências agrárias, Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo.
- Silva, A.; Cecilio, A.; Mendoza, J.; Lima, J. (2016). *Potassium fertilization of cauliflower and broccoli in a potassium- rich soil*. Ciencia E Investigación Agraria, 43(1): 151-157.
- Sripada, R.; Heiniger, R.; White, J.; Weisz, R. (2005). *Aerial color infrared photography for determining late-season nitrogen requirements in corn*. Agronomy Journal, 97(5): 1443–1451.
- Stafford, J. (2000). *Implementing precision agriculture in the 21st century*. Journal of Agricultural Engineering Research, 76: 267–275. Stroppiana, D.; Boschetti, M.; Brivio, P.; Bocchi.
- Strange, M.; Koike, M.; Smith, R. (2010). *Broccoli production in California*. Davis: University of California.
- Talpur, M.; Changying, J.; Junejo, S.; Tagar, A. (2013). *Impact of rice crop on soil quality and fertility*. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 19: 1287-1291.
- Tinarelli, A. (1986). *Il Riso*. Edagricole, Bolonha.
- Ullah, E.; Shepherd, R.; Baxter, J.; Peterson, J. (1989). *Mapping flowering Patterson's Curse (Echium plantagineum) around Lake Hume, Northeastern Victoria, using Landsat TM data*. Plant Protection Quarterly, 4: 155–157.
- van Heemst H. D. J. (1985). *The Influence of Weed Competition on Crop Yield*. Agricultural Systems, 18:81-93.

- Walsh, O.; Klatt, A.; Solie, J.; Godsey, C.; Raun, W. (2012). *Use of soil moisture data for refined GreenSeeker sensor based nitrogen recommendations in winter wheat (Triticum aestivum L.)*. Precision Agriculture, 14: 343–356.
- Wang, L.; Liu, J.; Yang, L.; Chen, L.; Wang, X.; Ouyang, B. (2013). *Applications of unmanned aerial vehicle images on agricultural remote sensing monitoring*. Nongye Gongcheng Xuebao/ Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(18):136–145.
- Wang, X.; Wang, M.; Wang, S.; Wu, Y. (2015). *Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images*. Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(5): 152–159.
- Wojtowicz, A.; Wojtowicz, M.; Piekarczyk, J. (2005). *Application of the remote sensing to monitoring of oilseed rape crop and estimation of its productivity*. Oilseed Crops XXVI/1, 269–276.
- Wojtowicz, M.; Wojtowics, A.; Piekarczyk, J. (2015). *Application of remote sensing methods in Agriculture*. Communication in Biometry and Crop Science, 11(1): 31–50.
- Xue, J.; Su, B. (2017). *Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications*. Journal of Sensors.
- Zhang, C. and Kovacs, J. (2012) *The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review*. Precision Agriculture, 13 (6): 693–712.
- Zhang, C.; Pattey, E.; Liu, J.; Cai, H.; Shang, J.; Dong, T. (2017). *Retrieving Leaf and Canopy Water Content of Winter Wheat Using Vegetation Water Indices*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.
- Zheng, Q.; Huang, W.; Cui, X.; Shi, Y.; Liu, L. (2018). *New spectral index for detecting wheat yellow rust using sentinel-2 multispectral imagery*. Sensors (Switzerland), 18(3).