



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Agronómica

Dissertação

Aplicação diferenciada de azoto em cobertura. Caso de estudo - trigo mole

Davide João Xarepe Laranjo

Orientador(es) | José Rafael Silva

Évora 2021



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Agronómica

Dissertação

Aplicação diferenciada de azoto em cobertura. Caso de estudo - trigo mole

Davide João Xarepe Laranjo

Orientador(es) | José Rafael Silva

Évora 2021



A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Vasco Fitas da Cruz (Universidade de Évora)

Vogais | Adélia Sousa (Universidade de Évora) (Arguente)
José Rafael Silva (Universidade de Évora) (Orientador)

Agradecimentos.

Agradeço a todos os que me apoiaram na conclusão desta dissertação e que me acompanharam durante todo o meu percurso académico na Universidade de Évora.

Ao meu orientador, Professor José Rafael Marques da Silva, por toda a ajuda durante a elaboração do trabalho, por toda a disponibilidade e paciência nas revisões e por todas as sugestões e correções feitas para melhoria do mesmo. À Agroinsider pelo fornecimento das imagens de satélite fundamentais para a elaboração do trabalho.

Ao Eng. Henrique Chia, pela oportunidade que me deu ao poder colaborar consigo na Herdade das Romeiras, por todo o acompanhamento oferecido e pela abertura à realização do ensaio na exploração. Uma palavra de reconhecimento também a todos os colaboradores que participaram direta ou indiretamente na realização do trabalho.

Aos meus colegas, pelas conversas e troca de informações que sempre contribuíram para manter vivo o entusiasmo pela elaboração da dissertação.

Por fim, à minha família e em especial à minha namorada, pelo seu apoio permanente e pela motivação constante, essenciais para a conclusão desta dissertação.

Aplicação diferenciada de azoto em cobertura, caso de estudo – trigo mole

Resumo

Este trabalho tem por objetivo a avaliação da eficiência da aplicação diferenciada de azoto, em fertilização de cobertura, na produtividade de trigo mole, utilizando a tecnologia de taxa variável (VRT), com recurso à interpretação de parâmetros de variabilidade do solo e de índices de desenvolvimento da planta (NDVI) obtidos a partir de imagens obtidas através do Satélite Sentinel 2.

Foi utilizada uma área de ensaio de 48 ha, no pivot 7 e 8 da Herdade das Romeiras, localizada no centro da região do Alentejo. O ensaio é composto por três classes de fertilização (150 kg/ha, 200 kg/ha e 250 kg/ha), com duas repetições, em faixas. Complementar ao ensaio entra a área sobrando das parcelas em questão, com aplicação diferenciada, utilizando-se 150 kg/ha e 200 kg/ha como níveis de fertilização.

Desde a sementeira, foram realizadas várias avaliações às plantas em 10 pontos de amostragem, onde se registaram o número de plantas/m², altura de plantas, estado sanitário e parâmetros de produtividade. A avaliação da produtividade foi realizada a partir dos dados fornecidos por sensores instalados na ceifeira-debulhadora, bem como de amostras de plantas recolhidas manualmente no campo.

Os resultados permitiram concluir que o aumento da dose de fertilizante em zonas com melhor desenvolvimento vegetativo contribuíram para melhores resultados produtivos, embora o retorno económico obtido revele que a aplicação de menores quantidades apresenta uma situação mais proveitosa. Pretende-se contribuir para uma fertilização em azoto mais eficiente, contrariando a elevada mobilidade deste nutriente, evitando desta forma efeitos prejudiciais para o ambiente, bem como uma aplicação mais lógica a nível económico.

Palavras-chave: taxa variável; NDVI; azoto; trigo.

Differential application of nitrogen in top dressing, study case - soft wheat crop''

Abstract

This work aims to evaluate the efficiency of differential application of nitrogen, in top dressing fertilization, in soft wheat productivity, using the variable rate technology (VRT), through the interpretation of soil variability parameters and plant development indexes (NDVI) obtained from images acquired through the Sentinel Satellite 2.

A 48 ha test area was used in pivot 7 and 8 of Herdade das Romeiras, located in the center of the Alentejo region. The experiment it's composed by three fertilization classes (150 kg / ha, 200 kg / ha and 250 kg / ha), with two repetitions, in bands. Complementary to the test, there is a surplus area of the plots in question, with different application, using 150 kg / ha and 200 kg / ha as fertilization levels.

Since sowing, several evaluations were carried out on the plants at 10 sampling points, where the number of plants / m², plant height, health status and productivity parameters were recorded. The productivity evaluation was carried out using data provided by sensors installed on the combine harvester, as well as samples of plants collected manually in the field.

The results allowed to conclude that the increase of the fertilizer dose in areas with better vegetative development contributed to better productive results, although the economic return obtained reveals that the application of smaller quantities presents a more useful situation. It intends to contribute to a more efficient nitrogen fertilization, against the high mobility of this nutrient, thus avoiding harmful effects to the environment, as well as a more logical application at an economic level.

Keywords: variable rate; NDVI; nitrogen; wheat

Índice.

Agradecimentos	I
Resumo	II
<i>Abstract</i>	III
Índice de Figuras	VI
Índice de Tabelas e Quadros	VIII
Índice de Gráficos	X
Acrónimos	XII
1.Introdução	1
1.1 Objetivo	1
2.Enquadramento Teórico	2
2.1 A cultura do trigo.....	2
2.1.1 Características botânicas e fisiológicas	2
2.1.2 Estádios de desenvolvimento.....	3
2.2 Importância da cultura em Portugal	6
2.3 Fertilização azotada	7
2.3.1 Azoto (N).....	7
2.3.2 Fertilidade do solo em azoto.....	8
2.3.3 Fertilização azotada do trigo.....	10
2.4 Agricultura de Precisão	11
2.4.1 Aplicação diferenciada com recurso a VRT.....	12
2.5 Detecção Remota.....	14
2.5.1 Radiação eletromagnética.....	14
2.5.2 Sensores	16
2.5.3 Resolução	16
2.5.4 Satélites Sentinel	17
2.5.5 Índices de Vegetação	19
2.6 Aplicação de fertilizantes a taxa variável	20

3. Materiais e metodologia de trabalho	24
3.1 Materiais	24
3.1.1 Descrição da área em estudo	24
3.1.2 Caracterização climática.....	25
3.1.3 Caracterização edáfica.....	27
3.2 Irrigação e fertilização	29
3.3 Condutividade elétrica aparente do solo.....	30
3.4 Itinerário técnico da cultura – cronologia.....	31
3.5 Delineamento de zonas de gestão e amostragem inteligente.....	35
3.6 Delineamento de pontos de amostragem	36
3.7 Elaboração da carta de prescrição	41
4. Análise e Discussão de Resultados	44
4.1 Variação temporal e espacial do NDVI.....	44
4.2 Estimativa de produtividade	50
4.3 Análise da produtividade	53
4.3.1 Análise à taxa de aplicação.....	59
4.3.2 Análise da carta de produtividade	61
4.4 Análise económica.....	67
5. Conclusões	70
Referências Bibliográficas	72
Anexos	76

Índice de figuras.

Figura 1 – Representação das estruturas morfológicas da planta de <i>Triticum aestivum</i>	3
Figura 2 – Diagrama da evolução nos estados fenológicos do trigo e acompanhamento dos mesmos com indicadores de produtividade. Adaptado de Slafer e Rawson (1994) ...	5
Figura 3 – Esquemática do funcionamento do ciclo das tecnologias utilizadas em AP (adaptado de apontamentos da UC Mecanização Agrícola – Universidade de Évora) ...	11
Figura 4 – Ciclo de atuação na gestão da variabilidade numa parcela. Extraído de Manual de Agricultura de Precisão. AJAP (2009)	13
Figura 5 – Esquema elucidativo dos processos de Detecção Remota. Extraído de Fundamentos Teóricos de Detecção Remota (Sousa & Silva, 2017).....	15
Figura 6 – Princípio de funcionamento de sensores passivos e ativos. Extraído de Fundamentos Teóricos de Detecção Remota (Sousa & Silva, 2017).....	16
Figura 7 – Bandas disponíveis no Satélite Sentinel 2A.....	18
Figura 8 – Superfície utilizada para a realização dos ensaios (pivot 7 e 8).....	24
Figura 9 – Classificação Climática de Köppen para o continente português, com a zona do ensaio assinalada.....	25
Figura 10 – Carta de Solos da área em estudo. Adaptado de Carta de Solos de Portugal nº36B	27
Figura 11 – Mapa de Condutividade Elétrica Aparente do Solo nos pivots 7,8 e 9.....	30
Figura 12 – Emergência da cultura do trigo e da cultura anterior, girassol.....	31
Figura 13 – Controlo químico de infestantes com recurso a trator e pulverizador montado	31
Figura 14 – Distribuição centrífuga do fertilizante pela cultura.....	32
Figura 15 – Distribuição centrífuga do fertilizante, com recurso a condução automática	33
Figura 16 – Imagem NDVI (06/12/2019) utilizada para marcação dos pontos de amostragem no terreno	36
Figura 17 – Dispositivo GARMIM eTrex H utilizado para marcação dos pontos no terreno.....	36
Figura 18 – Fotografia captada na primeira recolha de dados num dos pontos de amostragem.....	37
Figura 19 – Método de medição da plantas em afilamento	37

Figura 20 – Plantas descoloradas no fim do afilhamento	38
Figura 21 – Formação da espiga. Desenvolvimento das espiguetas e aristas.....	38
Figura 22 – Registo dos componentes de produção para estimativa de produtividade. Limitação da área de análise a um quadrado de 0.25 m ²	39
Figura 23 – Imagem elucidativa da operação de recolha das plantas de trigo, para contagem e pesagem de plantas e grãos	39
Figura 24 – Debulha manual do trigo.	40
Figura 25 – Limpeza e separação das impurezas resultantes da debulha manual	40
Figura 26 – Imagem NDVI relativo de 04/02/2020. A verde, valores NDVI mais elevados e a vermelho, valores NDVI mais baixos	41
Figura 27 – Carta de aplicação diferenciada utilizada para as operações de distribuição de adubo VRT	42
Figura 28 – Carta de aplicação visualizada no monitor GreenStar 2630, sendo visível as classes e faixas de aplicação, bem como o sinal recebido pela antena GNSS RTK.	43
Figura 29 – Página de controlo do distribuidor Vicon, onde se pode ver a taxa de aplicação instantânea, largura de trabalho, carga de adubo, etc... À direita, funcionalidades como paragem da distribuição ou fecho das adufas de cada disco.....	43
Figura 30 – Descoloração no ápice foliar das plantas	45
Figura 31 – Imagens NDVI absoluto desde a sementeira até à maturação	46
Figura 32 – Formação da espiga de trigo na fase final de ântese	52
Figura 33 – Zona de encharcamento localizada em redor do ponto 10	60
Figura 34 – Carta de produtividade elaborada com os dados georeferenciados produzidos pelo monitor de rendimento da ceifeira-debulhadora.....	61
Figura 35 – Carta de produtividade elaborada através da equação de regressão obtida pela relação entre o NDVI e a produtividade, na data de 05 de janeiro.....	62
Figura 36 – Subtração dos valores dos pixels entre a carta de produtividade e a carta de produtividade estimada.....	63
Figura 37 – Carta de margem bruta (€/ha) da zona de estudo	67
Figura 38 – Amostragem de solo das parcelas em estudo referente ao ano de 2018	76

Índice de tabelas e quadros.

Tabela 1 – Escala de Zadoks <i>et al.</i> com os estádios fenológicos do trigo mole.....	4
Tabela 2 – Superfície cultivada pelos principais cereais praganosos em Portugal (2015/2018). Adaptado de INE (2020)	6
Tabela 3 – Características da área em estudo	24
Tabela 4 – Unidades de fertilizante aplicados à cultura de trigo mole durante a campanha.	29
Tabela 5 – Itinerário técnico da cultura de trigo mole, nos pivots 7 e 8, no ano agrícola de 2019/20	34
Tabela 6 – Sequência temporal das idas ao campo para recolha de dados.....	37
Tabela 7 – Estimativa de produtividade (kg/ha) nos pontos de amostragem	52
Tabela 8 –Níveis de fertilização em cada ponto de amostragem, com o índice NDVI à data de escolha dos pontos e realização da carta, e valor de produtividade correspondente ao pixel da cada ponto, na carta de produtividade e no resultado das amostras recolhidas. As cores utilizadas na coluna “Taxa de aplicação” são referentes às mesmas utilizadas na carta de prescrição.	53
Tabela 9 – Variação percentual entre as duas formas de obtenção de dados de produtividade. A vermelho diferenças superiores a 50%.	54
Tabela 10 – Resultados obtidos através da colheita manual de plantas nos pontos de amostragem.....	55
Quadro 1 – Análise estatística ANOVA aos dados de produtividades obtidos pelas amostras.....	77
Quadro 2 – Estatística de regressão entre o nº de plantas e NDVI.....	78
Quadro 3 – Análise estatística ANOVA aos dados recolhidos nas medições de campo.....	78
Quadro 4 – Estatística de regressão entre a altura média de plantas e o NDVI	79
Quadro 5 – Folha de registo para estimativa de produtividade.	79
Quadro 6 – Estatística de regressão entre a altura média de plantas e a estimativa de produtividade	80
Quadro 7 – Estatística de regressão entre o índice NDVI e a estimativa de produtividade	80
Quadro 8 – Estatística de regressão entre o nº de plantas e a estimativa de produtividade	80
Quadro 9 – Estatística de regressão entre o índice NDVI e a produtividade obtida através do monitor de rendimento da ceifeira-debulhadora.....	81

Quadro 10 – Estatística de regressão entre o índice NDVI e a produtividade obtida através das amostras recolhidas manualmente nos pontos de amostragem	81
Quadro 11 – Estatística descritiva da produtividade sujeita às diferentes taxas de aplicação	81
Quadro 12 – Estatística de regressão entre a zona menos produtiva e o seu índice NDVI correspondente.....	82
Quadro 13 – Estatística de regressão entre a zona mais produtiva e o seu índice NDVI correspondente.....	82
Quadro 14 – Custos de produção relacionados com a cultura de trigo mole nos pivots 7,8 e 9.	83
Quadro 15 – Estatística descritiva dos valores de margem bruta nos diferentes pontos de amostragem.....	84

Índice de gráficos.

Gráfico 1 – Gráfico termopluiométrico do período de 1981 a 2010	26
Gráfico 2 – Diagrama ombrotérmico do ano agrícola de 2019/20	26
Gráfico 3 – Número de plantas em cada ponto e índice NDVI médio no local a 26 de dezembro de 2019.....	46
Gráfico 4 – Correlação entre o índice NDVI e o nº de plantas contabilizadas em cada ponto a 26 de dezembro de 2019	47
Gráfico 5 – Evolução temporal da altura média de plantas nos pontos de amostragem (cm)	48
Gráfico 6 – Relação entre a altura média de plantas e os valores de produtividade obtidos. A laranja, está representada a variável produtividade obtida por amostras de campo e a azul está representada a variável produtividade obtida pelo monitor de rendimento da ceifeira	49
Gráfico 7 – Correlação entre o índice NDVI e a altura média de plantas medida em cada ponto	50
Gráfico 8 – Método de comparação do tipo “radar” para evidenciar os outliers ou semelhanças entre os valores obtidos por carta de produtividade e recolha de dados no campo	54
Gráfico 9 – Gráfico de evolução temporal do índice NDVI nos pontos de amostragem	56
Gráfico 10 – Relação NDVI x Produtividade (carta) ao longo do desenvolvimento vegetativo da cultura.....	57
Gráfico 11 – Relação NDVI x Produtividade (amostras) ao longo do desenvolvimento vegetativo da cultura.....	58
Gráfico 12 – Relação entre a taxa de aplicação e a produtividade nos diferentes pontos de amostragem. A barra vermelha representa a aplicação a 150 kg/ha; a azul, a aplicação a 200 kg/ha; a verde, a aplicação a 250 kg/ha.	59
Gráfico 13 – Relação linear entre os valores de produção em zonas mais e menos produtivas com o valor de NDVI a 5 de janeiro.....	65
Gráfico 14 – Relação entre a taxa de aplicação e a produtividade nas diferentes zonas de aplicação. A barra vermelha representa a aplicação a 150 kg/ha; a azul, a aplicação a 200 kg/ha; a verde, a aplicação a 250 kg/ha.	66
Gráfico 15 – Relação entre a taxa de aplicação e a margem bruta média nos diferentes pontos de amostragem. A barra vermelha representa a aplicação a 150 kg/ha; a azul, a aplicação a 200 kg/ha; a verde, a aplicação a 250 kg/ha.	68

Gráfico 16 – Relação entre a taxa de aplicação e a margem bruta média nos diferentes pontos de amostragem. A barra vermelha representa a aplicação a 150 kg/ha; a azul, 200 kg/ha; a verde, 250 kg/ha.....69

Acrónimos.

ANOVA – Análise de variância

AP – Agricultura de Precisão

CEa – Condutividade elétrica aparente

FAO - *Food and Agriculture Organization*

GNSS -*Global Navigation Satellite System*

GPS – *Global Positioning System*

IDW – *Inverse Distance Weighted*

INE – Instituto Nacional de Estatística

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

K – Potássio

MO – Matéria orgânica

MS – Matéria seca

N – Azoto

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*

NDWI – *Normalized Difference Water Index*

NUE – *Nitrogen Use Efficiency*

P – Fósforo

PMG – Peso de mil grãos

REM – Radiação eletromagnética

RGB – *Red, Green, Blue*

RTK – *Real Time Kinematic*

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

UE – União Europeia

URT – *Uniform Rate Technology*

VRT – *Variable Rate Technology*

1.Introdução

O conceito de Agricultura de Precisão está normalmente associado à utilização de equipamento de alta tecnologia (seja *hardware*, no sentido genérico do termo, ou *software*) para avaliar, ou monitorizar, as condições numa determinada parcela de terreno, aplicando depois os diversos factores de produção (sementes, fertilizantes, fitofármacos, reguladores de crescimento, água, etc.) em conformidade. Tanto a monitorização como a aplicação diferenciada, ou à medida, exigem a utilização de tecnologias recentes, como os sistemas de posicionamento a partir de satélites, GNSS (inicialmente apenas se utilizava o sistema americano – GPS), os SIG ou os sensores eletrónicos, associados quer a reguladores automáticos de débito nas máquinas de distribuição quer a medidores de fluxo nas máquinas de colheita (Coelho *et al.*, 2009).

A deteção remota constitui-se também como uma importantíssima forma de observação dos sistemas agrícolas em geral e de cada parcela em particular, alvo da gestão no âmbito da AP. Dadas as suas características, a deteção remota é bastante eficaz na caracterização da variabilidade temporal e espacial. No caso da deteção remota por satélite multiplicam-se as plataformas de acesso quer às imagens RGB, falsa-cor e outras combinações mais específicas para a agricultura quer também em relação a índices de vegetação como o conhecido NDVI, entre outros. Torna-se de facto muito fácil a consulta das imagens mais recentes assim como do histórico (Braga, 2018).

As aplicações diferenciadas de fertilizantes podem não só contribuir para aumentar consideravelmente o rendimento económico das culturas como ajudam a reduzir o arrastamento de nutrientes e a consequente contaminação das águas residuais e subterrâneas. Para as aplicações de N em cobertura, tem sido utilizada a taxa fixa, ou seja, uma única dose, distribuída de maneira uniforme em toda a parcela, não sendo levadas em consideração as diferentes respostas da cultura, a variabilidade da parcela ou outros factores que interferem na eficiência da utilização do N aplicado (Coelho *et al.*, 2009).

1.1 Objetivo.

Este trabalho tem por objetivo a avaliação da eficiência da aplicação diferenciada de N, em fertilização de cobertura, na produtividade de trigo mole, utilizando a tecnologia VRT, com recurso à interpretação de índices de vegetação (NDVI), em conjugação com parâmetros de variabilidade do solo, obtidos a partir de imagens do Satélite Sentinel 2.

2. Enquadramento Teórico

2.1 A cultura do trigo.

O trigo é, juntamente com o milho e arroz, um dos cereais mais produzidos no mundo. Atualmente o maior produtor e consumidor de trigo do mundo é a China, sendo também o maior importador desde 2013 (FAO, 2018). Este cereal é um alimento básico, utilizado para obtenção de farinha para produzir pão, sendo também utilizado na alimentação animal.

Acredita-se que o trigo (*Triticum aestivum* L.), como é conhecido hoje, seja originário de gramíneas silvestres que se desenvolviam nas proximidades dos rios Tigre e Eufrates (Ásia), por volta dos anos 10.000 a 15.000 a.C. Contudo, os primeiros registos encontrados datam do ano 550 a.C., o que leva a concluir que a maioria das características da planta são conhecidas há mais de 2.000 anos.

O trigo é uma gramínea pertencente á família Poaceae, à classe das Monocotiledóneas (ou Liliopsida), à ordem Poales, à tribo Hordeas e ao género Triticum, sendo a espécie em estudo o *Triticum aestivum* L., trigo mole para panificação.

A espécie *Triticum aestivum* L. é hexaploide ($2n = 42$). Uma hibridação natural entre um tetraploide (*Triticum turgidum*; $2n = 28$) e uma gramínea selvagem (*Aegilops squarrosa*; $2n = 14$) deu origem ao T. *aestivum* e outros trigos hexaploide menos conhecidos.

O trigo mole (*Triticum aestivum* L.) encontra a área mais importante de produção na zona temperada do hemisfério Norte (Bellido, 1991). Por ser a variedade utilizada para a panificação, é a mais cultivada, disponível e utilizada na alimentação animal, ainda que, por vezes se encontre misturado com o trigo duro (*Triticum durum* L.), a variedade tetraploide ($2n = 28$) cultivada para a indústria das massas alimentícias.

2.1.1 Características botânicas e fisiológicas

O trigo (*Triticum* sp.) apresenta características morfológicas muito semelhantes às dos demais cereais de inverno que têm a mesma finalidade de produção de grãos. A planta de trigo é estruturada em raízes, colmo, folhas e inflorescência (Scheeren *et al.*, 2015).

O sistema radicular do trigo é composto por raízes seminais, originadas diretamente da germinação da semente, responsáveis pelo estabelecimento da plântula, por raízes permanentes, que captam nutrientes e água da solução do solo, e eventualmente por raízes adventícias, que surgem acima da superfície do solo

As plantas de trigo têm, no final, 5 a 6 folhas, correspondendo ao número de nós. Cada folha é composta pela bainha, lâmina, lígula e um par de aurículas, normalmente pilosas, na base da lâmina (figura 1).



Figura 1: Representação das estruturas morfológicas da planta de *Triticum aestivum*.

O colmo das plantas de trigo normalmente é oco, cilíndrico e com quatro a sete entrenós. Na fase de afilhamento, são emitidos novos colmos denominados de filhos envolvidos em estruturas foliares.

A inflorescência do trigo é uma espiga composta, dística, formada por espiguetas alternadas e opostas no ráquis. Cada espiguetas é constituída por flores dispostas alternadamente e presas à ráquila. Na base da espiguetas estão duas brácteas que recebem o nome de glumas e que têm a função de proteger as flores de cada espiguetas. Na antese, após a fecundação, as flores abrem-se e expulsam as anteras, ocorrendo a formação dos grãos (Scheeren *et al.*, 2015)

O grão do trigo, chamado cariopse, é pequeno, seco e indeiscente. Forma-se apenas um grão a partir de cada flor. No trigo, o peso específico é medido e expresso na base de 100 litros, isto é, peso por hectolitro. Normalmente o conteúdo de proteínas é aproximadamente 12%, podendo variar de 6 a 20% (Scheeren *et al.*, 2015).

2.1.2 Estádios de desenvolvimento

O desenvolvimento vegetal pode-se definir como a sequência de acontecimentos fenológicos, controlados por fatores genéticos e ambientais, que determinam as modificações morfológicas e funcionais da planta e que conduzem à acumulação de biomassa e a formação dos componentes do rendimento (Pinheiro, 2014).

Os estádios fenológicos mais conhecidos são a germinação, afilhamento, alongamento, emborrachamento, espigamento, floração e maturação. No entanto, foram descritas diversas escalas de desenvolvimento, sendo mais divulgadas a escala de Feekes,

em 1940, e a de Zadoks, de 1974. A escala de Zadoks *et al.* (1974) proporciona uma visão mais detalhada de cada estágio, pois está dividida em 10 etapas e, cada uma, em 10 subfases (tabela 1). A temperatura ideal para o pleno desenvolvimento do trigo é em torno de 20°C. Para o afilhamento, 15 a 20°C e para o desenvolvimento das folhas, entre 20 e 25°C. Danos severos, por frio ou por calor, causados ao trigo durante o estágio reprodutivo podem implicar grandes quebras produtivas.

Deste modo, a escala de Zadoks *et al.* (1974) contempla os seguintes estádios:

Tabela 1: Escala de Zadoks *et al.* com os estádios fenológicos do trigo mole.

Etapa Principal	Estádio	Subfase
0	Germinação e Emergência	0.0 a 0.9
1	Desenvolvimento de plântulas 1.0 – 1ª folha a sair do coleótilo 1.1 – 1ª folha desdobrada	1.0 a 1.9
2	Afilhamento 2.0 – Apenas o colmo principal 2.1 – Colmo principal e 1 filho	2.0 a 2.9
3	Alongamento do colmo 3.0 – Espiga com 1 cm 3.1 – 1º nó detetável 3.7 – Extremidade da folha bandeira visível 3.9 – Folha bandeira completamente visível	3.0 a 3.9
4	Emborrachamento 4.0 – Bainha da folha bandeira alongada 4.7 – Início da abertura da bainha da folha bandeira	4.0 a 4.9
5	Espigamento 5.5 – Metade da espiga emergida sobre a lígula da folha bandeira	5.0 a 5.9
6	Ântese 6.1 – Início da ântese 6.5 – Metade da ântese 6.9 – Ântese completa	6.0 a 6.9
7	Grão leitoso 7.1 – Grão aquoso 7.5 – Metade no estado leitoso 7.7 – Completamente leitoso	7.0 a 7.9
8	Grão pastoso 8.3 – Início do estado pastoso 8.5 – Grão mole 8.7 – Grão duro (unha do polegar marcada)	8.0 a 8.9
9	Maturação 9.1 – Grão duro (difícil de ser dividido) 9.2 – Grão duro (unha do polegar não marcada)	9.0 a 9.9

O diagrama seguinte (figura 2) identifica as fases, sementeira (Se), emergência (Em), iniciação floral (IF), “*Double ridge*” (DR), formação da espiguetas terminal (ET), espigamento (Esp), ântese (Ant), início do enchimento do grão (EG), maturação fisiológica (MF) e colheita (C). As caixas representam os períodos de diferenciação de alguns órgãos durante as fases vegetativa, reprodutiva ou de enchimento do grão (IPF- iniciação dos primórdios florais); MPF- morte dos primórdios florais). As linhas representam os momentos no tempo em que os diferentes componentes do rendimento se formam (Slafer & Rawson, 1994).

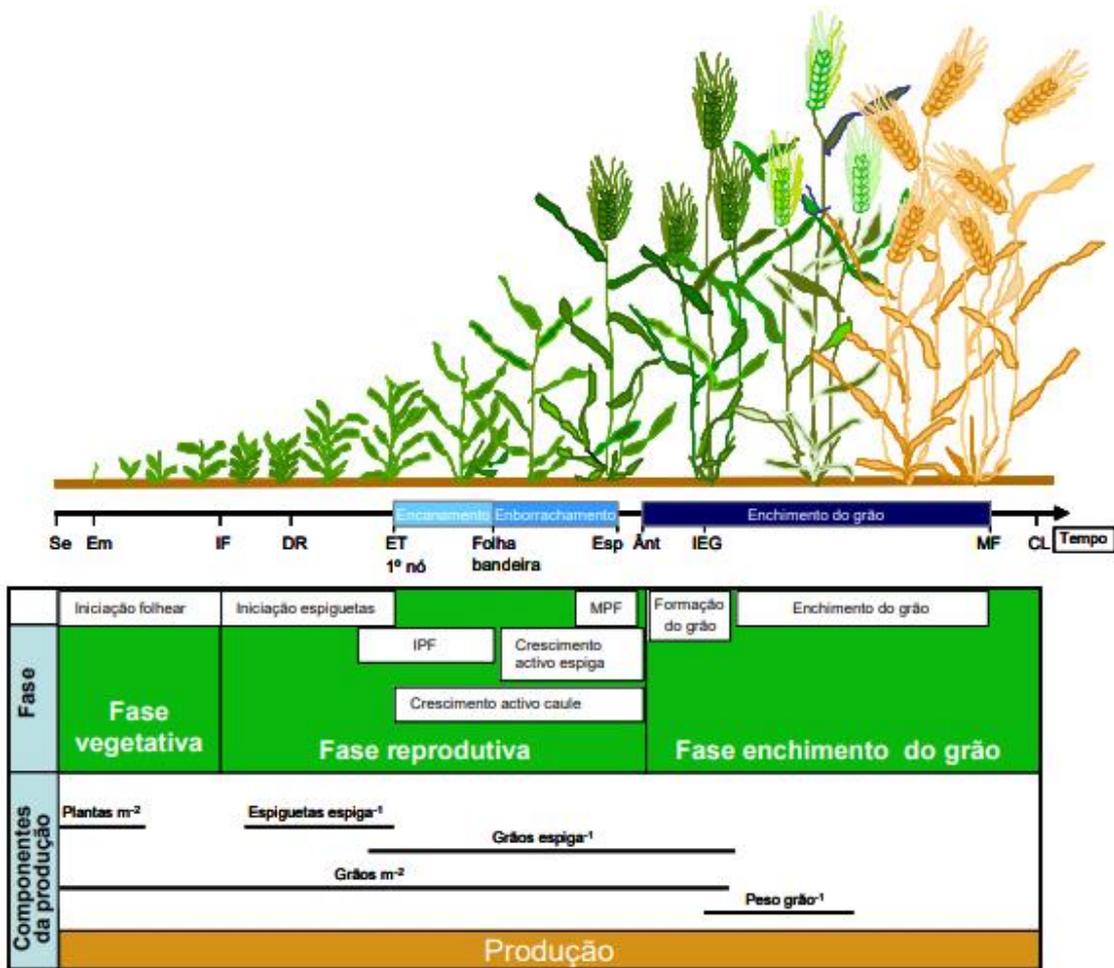


Figura 2: Diagrama da evolução nos estados fenológicos do trigo e acompanhamento dos mesmos com indicadores de produtividade. Adaptado de Slafer e Rawson (1994).

2.2 Importância da cultura em Portugal

Em Portugal os cereais têm um grau de autoaprovisionamento de 25,5%, sendo o grau de autoaprovisionamento do trigo de 5,7% (Diniz, 2016). Este baixo valor faz com que Portugal esteja muito dependente das importações de cereais. Mais de metade dessas importações são destinadas à alimentação animal (Diniz, 2016).

Os cereais nos últimos anos têm diminuído a sua produção, consequência da perda de superfície cultivada. Segundo os últimos dados disponíveis pelo INE (tabela 2), a cultura de trigo mole, perdeu cerca de 14.000 ha, entre 2015 e 2018. O mesmo acontece com os restantes cereais de outono-inverno, embora com menor expressão percentual.

Tabela 2: Superfície cultivada pelos principais cereais praganosos em Portugal (2015 -18). Adaptado de INE (2020).

Localização geográfica	Período de referência dos dados	Superfície das principais culturas agrícolas (ha)						
		Espécie						
		Trigo mole	Trigo duro	Centeio	Aveia	Cevada	Triticale	
		ha	ha	ha	ha	ha	ha	
Portugal	PT	2018	22872	4153	15761	37332	20526	16378
		2017	24885	4134	16249	35435	23200	17185
		2016	33511	4688	17268	42411	20622	21085
		2015	37015	2721	18099	40415	21170	22734

A redução da área de cereais praganosos em Portugal, atingiu na última campanha, segundo dados do INE, o valor mais baixo dos últimos cem anos, o que representa uma redução de 10% da produção agrícola nacional, para cerca de 3.5%, apenas na última década. A maior parte desta área tem vindo a ser convertida em pastagem, alguma ao abandono, e outra parte em culturas economicamente mais atrativa como o olival ou o amendoal (Palha, 2019).

Este facto deve-se a diversos factores, dos quais podemos destacar os baixos preços do cereal pagos à produção, a fraca qualidade dos nossos solos, as alterações climáticas e a enorme volatilidade das produções em sequeiro. Isto faz com que Portugal dependa em cerca de 80% das importações, de bens que são a base da alimentação humana e animal, sendo um caso único na Europa e no Mundo.

Este problema não afeta só os agricultores, afeta em grande medida o consumidor em geral, e o próprio País, devido ao enorme déficit da balança comercial agrícola, os cereais representam 30% das importações agrícolas e 10% das importações alimentares.

É também indispensável que as explorações agrícolas, e quem as dirige, adotem técnicas mais modernas e eficientes de produção. Como o custo do itinerário técnico é relativamente baixo, as culturas têm sido feitas com recurso a “receitas” antigas, que não tomam em conta o potencial produtivo real da cultura, o que faz com que em anos de grande potencial os “*inputs*” sejam poucos, podendo não se atingir produções ambiciosas, e o contrario também acaba por ser verdade, em anos climáticos maus, não se deve investir tanto na cultura (Palha, 2019).

2.3 Fertilização Azotada

O papel essencial da fertilização é manter a fertilidade do solo e satisfazer a procura por parte das plantas dos elementos nutritivos em função dos objetivos da qualidade e do rendimento pretendido. A quantidade de corretivos e sobretudo de adubos distribuídos periodicamente pelo solo representam uma parte importante dos custos da agricultura moderna, com 20% nas grandes culturas, 15% na pecuária e 10% na viticultura. (Alpendre, 2018).

2.3.1 Azoto (N)

É constituinte dos mais importantes compostos e complexos orgânico minerais da planta. Como exemplo podem citar-se os aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, aminas, clorofila, etc. O N é um constituinte das proteínas e da clorofila, pelo que é o principal estimulante do crescimento vegetal. O conteúdo da planta em N varia entre 2 e 4% da MS. Destes, 85% correspondem às proteínas e 10% aos ácidos nucleicos.

Absorção

O N é absorvido tanto na forma nítrica (ião nitrato NO_3^-) como na forma amoniacal (ião amónio NH_4^+), sendo ambos metabolizados pela planta. Contudo a forma nítrica é preferencialmente absorvida, sendo absorvido com atividade metabólica, ou seja, com consumo de energia.

Deficiência

O sintoma característico é a clorose generalizada da planta, começando pelas folhas mais velhas. Este facto é devido à grande mobilidade do N dentro da planta, estendendo-se desde a ponta da folha pela nervura central até abarcar toda a folha. Em casos graves as plantas murcham e morrem.

A maior parte do azoto do solo (0,02 a 0,4% do peso de solo) está na forma orgânica (98%) como componente dos resíduos orgânicos, húmus e outros compostos mais ou menos complexos como proteínas, nucleótidos, aminoácidos, aminas, amidas, etc.

Os compostos inorgânicos com N que podem ser encontrados no solo são:

1. nitrato (NO_3^-),
2. nitrito (NO_2^-),
3. amónio (NH_4^+) de troca,
4. NH_4^+ não permutável (fixado em minerais de argila),
5. gás díazoto (N_2) e
6. óxido nitroso (N_2O).

As formas mais disponíveis, NO_3^- e NH_4^+ de troca, são as de maior interesse imediato para a produção vegetal porque encontram-se na solução do solo. Outra que merece consideração é o NH_4^+ fixado nos minerais de argila porque pode constituir mais de 50% do N total em alguns solos.

2.3.2 Fertilidade do solo em azoto

A aplicação do N às culturas permite uma resposta mais clara e consistente na produção. Depois da água, o azoto é o fator limitante de maior transcendência no crescimento vegetal.

A disponibilidade de N para as culturas, depende do conteúdo em azoto da solução de solo, da quantidade de MO e da sua taxa de mineralização. O balanço das formas assimiláveis de N para a planta na solução do solo é o resultado dinâmico de uma série de reações que se produzem continuamente e das quais resulta um constante movimento de entradas e saídas de N assimilável.

Ganhos de azoto pelo sistema solo-planta

A maioria dos solos está constantemente a perder azoto por um ou mais processos e o ciclo do N no solo deve possuir mecanismos que permitam ganhar algum para contrabalançar as perdas e tender para o equilíbrio.

Os solos podem ganhar N por vários meios, os mais frequentes são:

- a precipitação e água da rega;
- a fixação biológica do N₂;
- as adições de resíduos animais e vegetais;
- fertilizantes comerciais;
- etc...

O processo natural mais importante para aumento do teor em N nos solos agrícolas das regiões temperadas é através da fixação simbiótica por parte das culturas leguminosas.

Principais meios de perdas de N inorgânico no solo

- a emissão de NH₃ pelo solo, pelas plantas, excrementos de animais e fertilizantes;
- a desnitrificação;
- a lixiviação;
- a retenção do N em animais;
- a transferência do N para áreas não produtivas através de resíduos vegetais e de excrementos de animais;
- a erosão pelo vento e água;
- fogo.

Excluindo a retenção do N nos animais e a transferência com remoção do N em excrementos animais, as várias formas de N mineral (NH₃, NH₄⁺, NO₃⁻ e NO₂⁻) são as intermediárias em todos os principais meios de perda de N do solo; o tamanho, as formas, as épocas de ocorrência e os fluxos na bolsa de N-mineral no solo são os factores determinantes na magnitude das perdas. Apenas 1 a 2% do N do solo está presente numa forma suscetível de se perder da solução do solo através da lixiviação, ou por escorrimento, ou por desnitrificação e volatilização.

2.3.3 Fertilização azotada do trigo

As necessidades de azoto do trigo, são em valor médio, de 25 a 30 kg por cada 1.000 kg de grão produzido. Estas necessidades podem variar, segundo as variedades escolhidas e condições climáticas, desde 28 a 40 kg de azoto por cada 1.000 kg de trigo, sendo a resposta mais eficiente nas variedades mais recentes de “palha curta”. Outro dado a considerar é o azoto excedente que não é utilizado pela cultura, que para solos profundos se estima em um nível médio de 30 kg N/ha. A dose global de fertilizante azotado habitualmente utilizada em trigo varia de 100 a 250 kg N/ha, segundo o rendimento esperado (4 a 10 ton/ha em regadio), a precipitação e as técnicas de cultivo. Em zonas com déficit hídrico, as doses são inferiores, situando-se entre 80 e 100 kg N/ha.

A repartição da dose global de fertilizante azotado, depende das condições climáticas durante o desenvolvimento da cultura e das práticas de cultivo, em especial a época de sementeira, a densidade de plantas e as características da variedade. No fracionamento há que ter em conta a influência e importância da lixiviação invernal e que as maiores necessidades de azoto são no período compreendido entre o afilhamento e encanamento (Bellido, 2010).

Pode ser conveniente realizar, às vezes, pequenas aplicações de azoto à sementeira para que tenham um efeito de “arranque”, em especial em sementeiras tardias para incentivar o afilhamento, e em solos pobres onde a cultura anterior tenha sido esgotante. Também pode ser aconselhado em solos fortes, que tenham um elevado poder de retenção.

A aplicação seguinte pode realizar-se no princípio do afilhamento (estado de 3 a 5 folhas). A época e a quantidade da dose a aplicar orientam a qualidade do afilhamento. A dose a aplicar nesta etapa será tanto mais importante quanto mais baixa for a densidade de plantas, sementeira tardia ou variedade precoce. Não se deve ultrapassar, nesta aplicação, as necessidades em azoto da cultura, pois um excessivo desenvolvimento vegetativo pode provocar a acama (Bellido, 2010).

Outra aplicação pode efetuar-se no final do afilhamento e começo do encanamento. Sem dúvida, a dose desta aplicação é a mais importante pela sua influência na formação do rendimento, pois aumenta o vigor dos colmos formados, incrementa a proporção de colmos com espigas, melhora o desenvolvimento das folhas superiores, favorece a fertilidade da espiga e melhora o crescimento do grão (Bellido, 2010).

2.4 Agricultura de Precisão

Nos Estados Unidos e em alguns países da Europa surgiu nos anos 80 do século passado um novo conceito de gestão, assente basicamente na aplicação de novas tecnologias que permitem ao agricultor um conhecimento mais aprofundado das potencialidades e das limitações dos seus campos agrícolas, e a tomada de consciência de que, numa mesma parcela de terreno, as características dos solos são variáveis e que esta variabilidade se reflete na produção.

O conceito de Agricultura de Precisão está normalmente associado à utilização de equipamento de alta tecnologia (seja «*hardware*», no sentido genérico do termo, ou «*software*») para avaliar, ou monitorizar, as condições numa determinada parcela de terreno, aplicando depois os diversos factores de produção (sementes, fertilizantes, fitofármacos, reguladores de crescimento, água, etc...) em conformidade.

Tanto a monitorização como a aplicação diferenciada, ou à medida, exigem a utilização de tecnologias recentes:

- sistemas de navegação a partir de satélites (**GNSS** – «*Global Navigation Satellite System*»);
- sistemas de informação geográfica (**SIG**);
- **sensores** eletrónicos, associados quer a medidores de fluxo nas máquinas de colheita, quer a reguladores automáticos de débito nas máquinas de distribuição;
- aplicação dos factores de produção de forma variável, utilizando tecnologia VRT, «*Variable Rate Technology*»).

No ciclo tecnológico da AP (figura 3) qualquer um dos três pilares tem em comum informação georreferenciada, obtida através do sistema de navegação por satélite - GNSS.

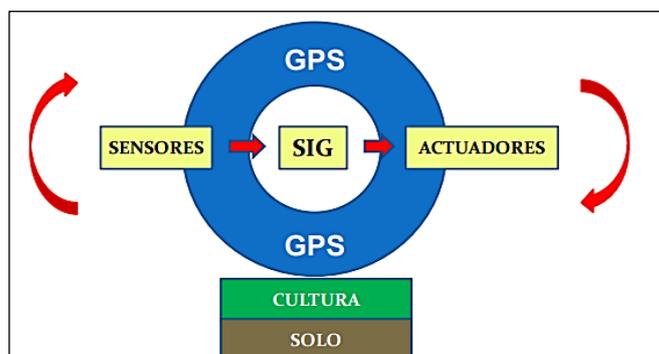


Figura 3: Esquemática do funcionamento do ciclo das tecnologias utilizadas em AP. Adaptado de apontamentos da UC Mecanização Agrícola – Universidade de Évora

A AP representa um sistema de cultura que visa a gestão da variabilidade temporal e espacial das parcelas. Possui dois objetivos genéricos:

- Aumento do rendimento dos agricultores, alcançado por duas vias distintas, mas complementares:
 - a) A redução dos custos de produção;
 - b) O aumento da produtividade (e, por vezes, também da qualidade) das culturas.
- Redução do impacto ambiental resultante da atividade agrícola, relacionado com o rigor do controlo da aplicação dos fatores de produção que deverá ser feita, tanto quanto possível, na justa medida das necessidades das plantas.

2.4.1 Aplicação diferenciada com recurso a VRT

As VRT podem ser definidas como o conjunto das tecnologias utilizadas para efetuar aplicações diferenciadas dos factores de produção tendo em conta a informação recolhida para cada unidade de área específica, num determinado instante e numa determinada parcela de terreno. A variabilidade temporal e/ou espacial é, deste modo, tida em conta quando se aplicam os fertilizantes, os fitofármacos, as sementes ou a água de rega (Coelho *et al*, 2009).

As aplicações diferenciadas no espaço são efetuadas com dois métodos distintos:

- Métodos baseados em mapas, as taxas de aplicação variam, na maior parte dos casos, de acordo com a informação fornecida por um SIG, acerca da variabilidade espacial das parcelas. O GNSS é fundamental neste caso, dado que o SIG tem de saber identificar, a cada instante, em que posição se encontra, para poder ajustar as taxas de aplicação (figura 4).

Assim, no seu todo, o processo compreende os seguintes passos:

1. amostragem da parcela;
2. determinação da variável alvo;
3. elaboração de um mapa dessa variável alvo;
4. construção do mapa de prescrição;
5. introdução do mapa de prescrição no controlador VRT.

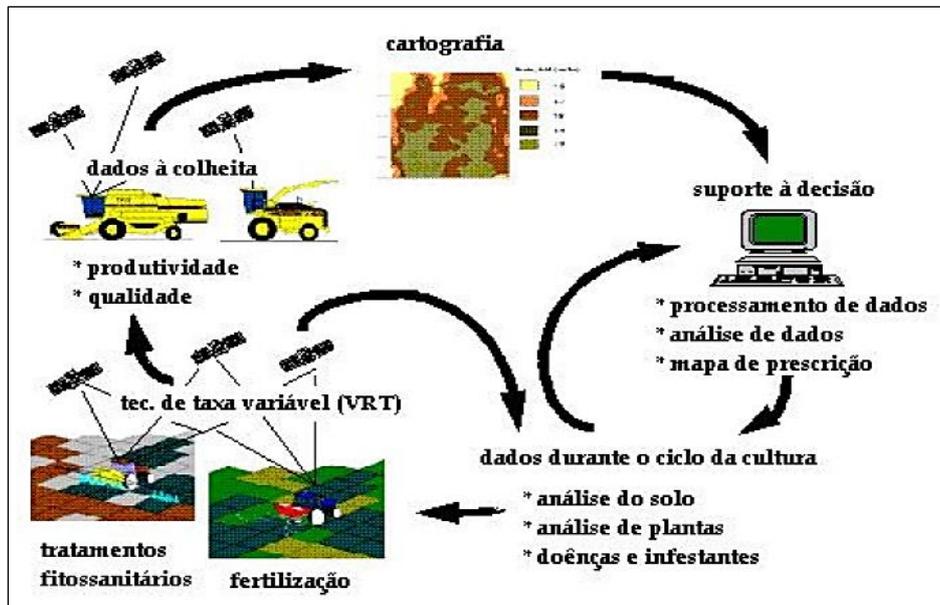


Figura 4: Ciclo de atuação na gestão da variabilidade numa parcela. Extraído de Manual de Agricultura de Precisão, AJAP (2009).

- Métodos baseados em sensores, as aplicações são efetuadas de acordo com informação fornecida por aqueles, em tempo real. Estes sensores podem avaliar as condições do solo ou das culturas, fornecendo informação para que se realizem as aplicações em conformidade. Neste caso, não é necessário o recurso a sistemas de posicionamento.

As aplicações diferenciadas estão dependentes, por outro lado, de tecnologias para controlar as taxas de aplicação dos factores de produção - os chamados controladores. Estes controladores não são mais do que microprocessadores que utilizam a informação dos sensores, fornecida diretamente ou via SIG, para calcular a quantidade de um dado factor de produção que é necessário aplicar em cada unidade de área. Naturalmente, estes cálculos são efetuados de acordo com algoritmos cujo objetivo é otimizar a aplicação do factor. O resultado destes cálculos é transmitido pelos controladores às bombas, válvulas, etc., que acionam ou regulam os mecanismos de distribuição, fazendo variar as taxas de aplicação consoante as necessidades específicas em cada unidade de área. Estas bombas ou válvulas, podem assumir diferentes formas (centrífugas, de pistão, ou de membrana; de controlo mecânico, elétrico, pneumático ou hidráulico; ...). O objetivo, no entanto, é sempre o mesmo: variar as taxas de aplicação de forma automática. É justamente esta automatização da aplicação diferenciada dos factores de produção, através de atuadores, que fecha o ciclo das tecnologias de Agricultura de Precisão (Coelho *et al*, 2009).

2.5 Detecção Remota

A Detecção Remota é uma técnica que nos permite obter informação sobre um objeto ou fenómeno pela análise de dados recolhidos por um dispositivo que não está em contacto com o objeto ou fenómeno, ou seja, sem contacto mecânico. Na prática, a maioria das aplicações que são consideradas fazendo parte da deteção remota têm de se enquadrar nos seguintes critérios: (Sousa & Silva, 2017)

- A transferência de informação entre o alvo e o sensor (observador) ocorre por meio de radiação eletromagnética. Isto imediatamente exclui a deteção remota por meio de ondas sonoras ou por via química;

- A observação leva à produção de uma imagem espacial;

- As imagens terão de ser em formato digital, como tal podem ser armazenadas, processadas e interpretadas em computadores;

- A observação é feita do espaço. O sistema de imagem é colocado numa plataforma espacial ou satélite.

2.5.1 Radiação eletromagnética

A luz ou de uma forma geral a radiação eletromagnética é uma forma de energia que é transferida num certo período, de um ponto para o outro. A descrição da REM passa, portanto por um aspeto energético e um aspeto temporal. A REM apenas é perceptível (visível, sensível, mensurável...) assim que colidir com uma determinada superfície. Portanto a terceira dimensão a considerar será a dimensão espacial. Um quarto aspeto a ser considerado, é a distribuição hemisférica da REM: a REM, que chega a uma determinada superfície, varia com a orientação (Sousa & Silva, 2017).

A aquisição de informação é feita através do registo da energia refletida ou emitida (sob a forma de radiação eletromagnética) pelo objeto a detetar. Os dados brutos assim obtidos são depois processados e analisados para extrair informação de interesse sobre o objeto a detetar.

Isto é exemplificado pelos sistemas de aquisição de imagens (figura 5), onde estão envolvidos os seguintes sete elementos:

A – Fonte de energia ou iluminação – o primeiro requerimento é a existência de uma fonte de energia que ilumine ou forneça radiação eletromagnética ao objeto em estudo.

B – A radiação e a atmosfera – a energia emitida pela fonte entra em contacto e interage com a atmosfera que atravessa na sua viagem até ao objeto. Esta interação pode ter lugar uma segunda vez, quando a energia é refletida pelo objeto para o sensor.

C – Interação com o objeto – após a energia ter atingido o objeto, passando pela atmosfera, esta interage com o objeto dependendo das propriedades do objeto e da radiação.

D – Registo da energia pelo sensor – após a energia ter sido difundida ou emitida pelo objeto, é necessário um sensor (remoto – que não se encontre em contacto com o alvo) para recolher e registar a radiação eletromagnética.

E – Transmissão, receção e processamento – a energia registada pelo sensor é transmitida, normalmente de forma eletrónica, para uma estação que recebe e processa os dados para uma imagem.

F – Interpretação e análise – a imagem processada é interpretada, visual e/ou digitalmente, de forma a extrair informação sobre o objeto iluminado.

G – Aplicação – o objetivo final do processo de deteção remota é atingido quando aplicamos a informação que conseguimos extrair da imagem do objeto, de modo a compreendê-lo melhor, revelar novas informações, ou contribuir para a resolução de um determinado problema.

Estes sete elementos descrevem o processo da deteção remota, de jusante para montante, até atingir o seu objetivo final.

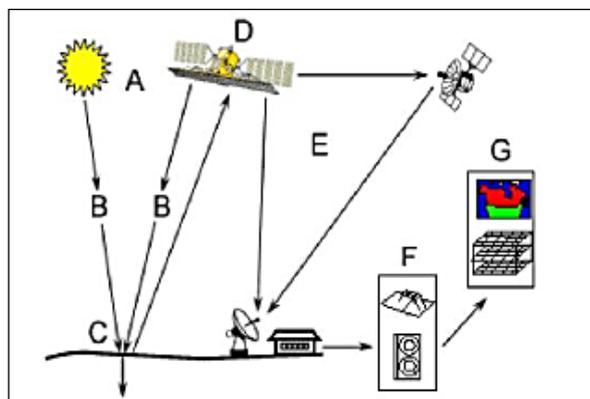


Figura 5: Esquema elucidativo dos processos de Deteção Remota. Extraído de Fundamentos Teóricos de Deteção Remota (Sousa & Silva, 2017)

2.5.2 Sensores

- Sensores passivos – medem a energia que se encontra disponível na natureza, energia do sol. Estes sensores apenas podem ser utilizados quando existe luz natural disponível, ou seja, apenas nas alturas em que o sol está a iluminar a Terra (Sousa & Silva, 2017).
- Sensores ativos – dispõem da sua própria fonte de energia. O sensor emite radiação que é dirigida para o objeto a estudar, sendo posteriormente refletida e registada pelo sensor.

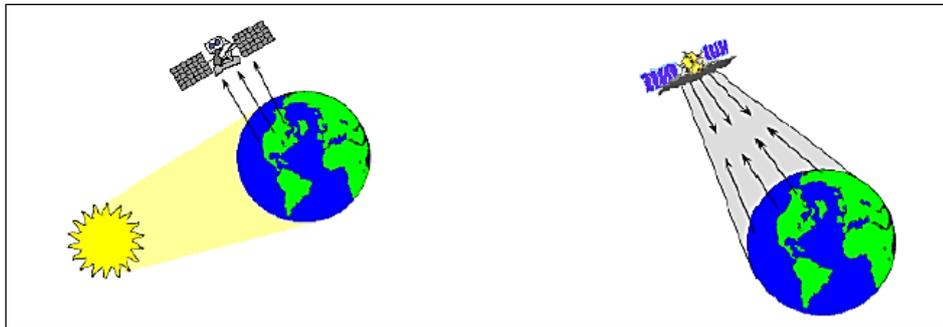


Figura 6: Princípio de funcionamento de sensores passivos (à esquerda) e ativos (à direita). Extraído de Fundamentos Teóricos de Detecção Remota (Sousa & Silva, 2017)

2.5.3 Resolução

Uma plataforma de detecção remota por imagem que opere nas regiões do visível e infravermelho é classificada em termos da sua resolução espectral, espacial, temporal e radiométrica (Sousa & Silva, 2017).

❖ Resolução Espacial

Em detecção remota, o termo resolução espacial refere-se ao pormenor de detalhe numa imagem. Geralmente corresponde ao tamanho do pixel. (Verbyla,1995). Corresponde à menor área da superfície terrestre que se pode observar através de um sensor. Esta área designa-se por pixel (*picture elements*). Cada pixel tem um valor associado - número digital - que representa a radiação recebida pelo sensor da superfície terrestre.

A resolução espacial dos sensores passivos depende principalmente do seu campo de visão (*Instantaneous Field of View- IFOV*).

❖ **Resolução Espectral**

Descreve a capacidade do sensor para definir intervalos pequenos de comprimento de onda. Quanto maior a resolução espectral de um sensor maior é o seu número de intervalos de comprimento de onda, ou seja, maior é o seu número de bandas multiespectrais.

❖ **Resolução Radiométrica**

É o número de níveis distintos, ou discretos, em que o sinal pode ser dividido. Pode se dizer que a resolução radiométrica de uma imagem é o número de tons de cinzento discerníveis entre o preto e o branco.

❖ **Resolução Temporal**

Intervalo de tempo decorrido entre duas observações consecutivas segundo o mesmo ângulo, do mesmo local na superfície terrestre.

2.5.4 Satélites Sentinel

A geração de satélites da constelação Copernicus, designados por Sentinel, desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA) e financiado pela Comissão Europeia disponibilizam diversa informação ótica e de radar para observação da superfície terrestre.

Os satélites Sentinel vieram preencher a lacuna existente relativamente à cobertura de grandes áreas sem influência de nuvens para a monitorização de vegetação de rápido crescimento.

A missão **Sentinel-1** apresenta uma órbita quase polar com um sensor C-SAR (Synthetic Aperture Radar) e capacidade de recolha de dados durante 24 horas, sob quaisquer condições meteorológicas. Esta missão foi desenvolvida para a monitorização dos meios terrestre e marinho – particularmente útil na gestão de emergências atendendo que o tempo de aquisição e disponibilização de imagens é reduzido (menos de uma hora). Produz imagens da superfície terrestre de dia e de noite, em blocos de 250 km de diâmetro e resolução espacial de 5 metros.

O **Sentinel-2A** foi o primeiro satélite ótico da série a ser operado pela ESA, lançado a 23 de Junho de 2015, apresentando uma resolução espacial de 10 m para a região do visível, 20 m para a região do infravermelho e 60 m para correções atmosféricas. Possui sensores passivos digitais de matriz linear (CCD): com uma bateria de sensores em linha. A resolução espectral apresenta 13 bandas – visível, infravermelho próximo e médio (figura 7). A resolução temporal é de 5 dias. Atualmente as imagens estão disponibilizadas de forma gratuita, podendo ser visualizadas na plataforma Sentinel Hub – Playground.

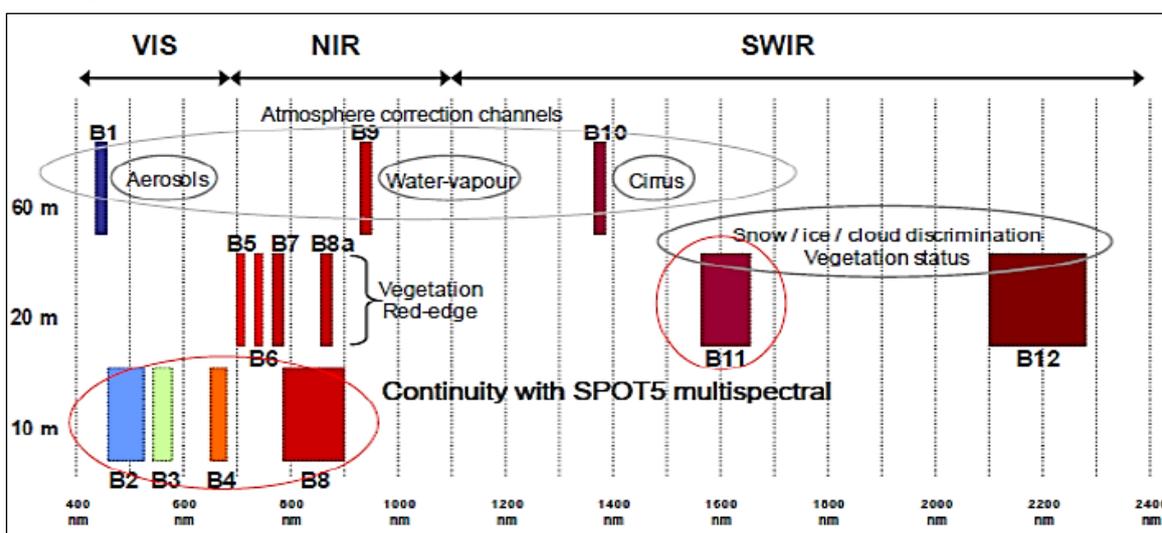


Figura 7: Bandas disponíveis no Satélite Sentinel 2A.

Fonte: <https://www.cursosteledeteccion.com/combinacion-de-bandas-en-imagenes-sentinel2/>

As principais aplicações do Sentinel-2 assentam nos seguintes serviços:

- Monitorização do meio terrestre, na criação de mapas de ocupação e uso do solo, caracterização de alterações e mapas de variáveis biogeofísicas (e.g. percentagem de coberto vegetal, índice de clorofila, índice de área foliar);
- Suporte à gestão de emergências, nomeadamente através do mapeamento de áreas urbanas localizadas em zonas de risco de ocorrência de desastres naturais;
- Segurança, nomeadamente vigilância marítima e de fronteiras, atividades de apoio à ação externa da UE;
- Monitorização de alterações climáticas.

2.5.5 Índices de Vegetação

Os índices de vegetação são combinações matemáticas entre diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético. O seu principal objetivo é salientar as diferenças entre a vegetação e outros alvos como, por exemplo, o solo e a água. Esses dados podem ser obtidos por sensores equipados em drones, aviões, satélites, espectro radiômetros, etc... Obtidos, é possível medir indiretamente diversas variáveis no campo, como a produtividade, o índice de área foliar e os teores de biomassa, entre outros (Horus Aeronaves, 2016).

O “*Normalized Difference Vegetation Index*” (NDVI), desenvolvido por Rouse *et al.* (1974), é um índice muito utilizado em estudos do coberto vegetal pois permite distinguir a vegetação fotossinteticamente ativa da restante. Permite, assim, estudar, a longo prazo, as modificações do coberto vegetal. O NDVI também permite acompanhar as alterações fenológicas da vegetação (ao longo das estações do ano) desde o máximo da atividade fotossintética até ao período de senescência (Lira *et al.*, 2011). O NDVI é calculado através da seguinte equação:

$$NDVI = \frac{(Infravermelho \text{ Próximo} - Vermelho)}{(Infravermelho \text{ Próximo} + Vermelho)}$$

O valor teórico do NDVI varia entre -1 e 1. A água, a neve e o gelo têm valores negativos uma vez que estes corpos possuem refletância mais elevada no vermelho do que no infravermelho próximo. Como as rochas e solos apresentam resposta semelhante nestas duas bandas espectrais, são caracterizados por um NDVI próximo de zero. A vegetação, possui, no geral, valores positivos deste índice espectral. À medida que a biomassa e grau de cobertura das plantas aumenta, o valor do NDVI aumenta. O valor do NDVI de zonas de elevada densidade de coberto vegetal tenderá, para o valor 1 (Braz *et al.*, 2015). Existem estudos que mostram a importância deste índice na relação entre a dinâmica da vegetação e a biodiversidade (nomeadamente na distribuição de algumas espécies de fauna (Pettorelli *et al.*, 2005).

O NDVI tem a vantagem de ser de cálculo fácil. No entanto, é muito sensível à influência do substrato em que a vegetação ocorre, especialmente nos casos de baixa densidade do coberto vegetal. Por outro lado, torna-se pouco sensível para elevados valores da biomassa (Shahrokhnia & Ahmadi, 2019).

O “*Normalized Difference Water Index*” (NDWI), é um método proposto por 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 refletância dos patamares do coberto vegetal.

$$NDWI = \frac{(Infravermelho\ Pr\u00f3ximo - Infravermelho\ de\ Ondas\ Curtas)}{(Infravermelho\ Pr\u00f3ximo + Infravermelho\ de\ Ondas\ Curtas)}$$

Neste caso este índice está relacionado com o teor de água nas folhas da planta, através da energia refletida pelo infravermelho médio, mais precisamente pelos picos de absorção da água neste intervalo de comprimento de onda. O seu intervalo de variação é igual ao NDVI [-1 a 1], indicando os valores negativos pouco teor de água e valores positivos elevado teor de água nas folhas.

2.6 Aplicação de fertilizantes a taxa variável

Durante a última década foram realizados diversos trabalhos sobre a temática de Agricultura de Precisão, nomeadamente sobre a aplicação em taxa variável de fatores de produção, tendo sido utilizados diversos sensores aplicados ao solo e às plantas de modo a definir a variabilidade de uma parcela. Combinando os registos desses sensores, histórico produtivo da parcela, informação topográfica, sistema VRT e GNSS, é possível implementar aplicações diferenciadas. A questão fundamental é como otimizar a distribuição de azoto com recurso a toda esta tecnologia.

De forma geral, os métodos de aplicação de N em taxa variável podem ser divididos em dois grupos: redistribuição de uma quantidade previamente definida de N ou determinação das necessidades de N em locais específicos. O primeiro requer conhecimento da variabilidade intra parcelar, enquanto que o último é mais difícil de desenvolver porque requer uma maior noção da variabilidade da parcela e variabilidade cultural e climática do ano em questão. (Berntsen *et al.*, 2006)

Um estudo de caso relacionado foi efetuado na Unidade Piloto da Rede de AP em Não-Me-Toque, Rio Grande do Sul, na campanha de 2012, através do uso de sensores óticos ativos como ferramenta para a definição da dose de azoto a ser aplicada em cobertura na cultura do trigo. No momento da aplicação de azoto em cobertura, a área foi

dividida em dois talhões: um com aplicação a taxa fixa e outro a taxa variável. Foi utilizado equipamento comercial dotado de sensor ótico ativo para aplicação em taxa variável, denominado de *GreenSeeker*. A área de estudo foi monitorizada antes e depois da aplicação de azoto. Ao longo do desenvolvimento da cultura, foram sendo acompanhadas as evoluções no registo NDVI da parcela.

A estratégia de aplicação utilizada foi a de redistribuição de adubo, ou seja, utilização de uma dose alvo, no caso, 150 kg de ureia ha⁻¹, com aplicação desta dose na média da área a taxa variável. Na área de taxa fixa, a aplicação foi da mesma dose independente do padrão das plantas presentes. No momento da colheita, foram marcados cerca de 100 pontos para colheita de amostras e avaliação do rendimento de grãos, componentes do rendimento de grãos e qualidade tecnológica do trigo.

Os resultados de NDVI observados evidenciaram uma variação de NDVI de 0,320 a 0,472 quando este foi avaliado antes da aplicação de ureia. 23 dias após a aplicação de ureia, momento em que já é esperado efeito das doses de N aplicadas (tanto fixas como variáveis), os valores de NDVI, com mais de 13.000 pontos de leitura, variaram de 0,382 até 0,852, mas com valor de CV de 3,56%, abaixo do valor observado na leitura antes da aplicação de N (7,63%).

Nos resultados de rendimento de grãos, as colheitas foram direcionadas, em cada ponto, para regiões onde as plantas se encontravam eretas e sem danos aparentes de geada. Na média dos pontos amostrados, a área com taxa fixa obteve valores superiores (em números absolutos) à área tratada com taxa variável em todas as características avaliadas, com exceção da proteína no grão.

O equipamento utilizado para aplicação a taxa variável permite agilidade e flexibilidade na variação da dose de azoto aplicada. Pires *et al.* (2014), afirma que é necessário considerar uma dose máxima para cada cultivar em função da sua resposta em termos de potencial produtivo, evitando que se estejam a aplicar fertilizantes com consequências económicas inviáveis e gerando um impacto ambiental negativo.

Também em Itália, no anos de 2008/09 e 2009/10, foram realizados ensaios com tratamento diferenciado de N. A hipótese testada neste estudo consistia na forma como a produtividade do trigo respondia de modo diferente às taxas variáveis de N, e que resposta produz a parcela à aplicação de N por este ser espacialmente variável. Em palavras mais simples, 90 kg N ha⁻¹ poderia dar a mesma resposta que 30 kg N ha⁻¹, mas a resposta pode

mudar espacialmente. Os objetivos deste estudo foram demonstrar que a taxa variável de N leva a uma maior eficiência de uso, avaliar a capacidade de alto espectro na resolução do satélite para detetar a resposta da cultura à fertilização usando índices vegetativos, e determinar se a variabilidade foi mais influenciada pela zona de gestão ou pela taxa variável de N.

O tratamento diferenciado ocorreu em 27 talhões, com dimensões de 50m x 75m. As classes de taxa variável foram 30, 70 e 90 kg N ha⁻¹. Foram analisadas imagens com 5 bandas espectrais. Com recurso a estas imagens foram calculados 24 índices vegetativos, sendo um deles o NDVI, o índice de vegetação mais abordado nesta dissertação.

De forma conclusiva, o MTCI “*Merris Terrestrial Chlorophyll Index*” e o NDVI assumiram-se como bons índices de vegetação, tendo havido uma correlação estável entre o valor e a produtividade. Por outro lado, fertilização variável de N mostrou que o indicador NUE (Uso eficiente do azoto) pode ser significativamente melhorado se o fertilizante adequado for aplicado espacialmente da maneira e quantidade certa. (Basso *et al.*, 2015)

$$\text{Nota: } MTCI = \frac{\rho_{850} - \rho_{730}}{\rho_{730} - \rho_{675}}$$

Outro estudo efetuado no centro de Itália, com 168 unidades de experimentação numa parcela de 14 ha, fez a comparação entre fertilização com métodos convencionais e VRT, combinando NDVI, mapa de produtividade e valor proteico. As classes de aplicação a taxa fixa foram 30 kg N ha⁻¹ e 120 kg N ha⁻¹, enquanto que a aplicação VRT variou entre 68 e 120 kg N ha⁻¹ e 90 e 150 kg N ha⁻¹. Os resultados não foram significantes, embora Vizzari *et al.* (2019) evidenciou que a gestão eficiente de N reduza o custo económico e o impacto ambiental do fertilizante azotado. Raun *et al.* (2002) demonstrou que o VRT melhora a NUE em 15% comparando com uma taxa fixa.

Foi utilizado um distribuidor centrífugo com capacidade para variar a taxa de aplicação ha⁻¹, mas como foi sujeito a variações de taxa abruptas, Vizzari *et al.* (2019), colocaram em dúvida a rapidez de abertura das válvulas.

O estudo foi muito afetado pela instabilidade climática do clima mediterrânico, que torna a produtividade e qualidade do trigo imprevisível, ficando mais dependentes das propriedades do solo, na capacidade de retenção de água e absorção de azoto. Nesta

situação, o VRT pode mitigar parcialmente a heterogeneidade de produção causada por fatores ambientais.

Em relação ao índice NDVI como ferramenta para a estimativa de produtividade de trigo, Sultana *et al.* (2014) mostrou que existe uma clara associação entre a produtividade e o NDVI medido, mas na fase de maturação esta relação ainda é mais elevada. Esta conclusão aproxima-se do estudo de Liu *et al.* (2006) que confirma a alta correlação entre NDVI e produtividade especialmente na fase de enchimento do grão.

Em Portugal, um estudo inserido na mesma temática, abordou a fertilização em cobertura na cultura da cevada. O objetivo do estudo foi a avaliação do efeito da dose e do fracionamento da fertilização azotada sobre a produção e qualidade do grão de cevada em regadio.

Este estudo ocorreu na região de Beja, onde foram instalados no ano agrícola de 2003/04 ensaios de campo com a cultura da cevada, com dois factores. Cinco doses de N (0, 75, 100, 125 e 150 kg/ha) e cinco fracionamentos/épocas de aplicação (sementeira, sementeira + afilhamento, sementeira + encanamento, afilhamento + encanamento e sementeira + afilhamento + encanamento).

Os resultados obtidos mostram que a maior produção de grão foi obtida com as mais altas doses de N (125 e 150 kg/ha) e com os fracionamentos sementeira + afilhamento e sementeira + afilhamento + encanamento. O teor de proteína do grão aumentou com as doses de N mais altas e com as aplicações mais tardias (afilhamento + encanamento), mas dentro dos limites requeridos pela indústria.

Os resultados obtidos, concordantes com os referidos por Patanita *et al.* (2005), além de indicarem uma resposta positiva da cevada ao aumento da dose de N aplicada, revelam a importância da aplicação de N à sementeira e logo nas primeiras fases de crescimento da cultura.

3. Materiais e metodologia de trabalho

3.1 Materiais

3.1.1 Descrição da área de estudo.

O ensaio realizou-se na exploração agrícola da Herdade das Romeiras, localizada no distrito de Évora, concelho de Estremoz. As parcelas de trigo em estudo, correspondem ao pivot 7 e 8, com uma área de 48 ha, possuindo um sistema de rega por aspersão através de *center pivot*. Dentro desta área também existe uma superfície em regime de sequeiro, não abrangida pelo sistema de rega.

A cultura foi semeada por sementeira direta, com uma densidade de 170 kg/ha, tendo sido realizada no final de Outubro de 2019. A colheita foi feita no início de Julho de 2020. (tabela 3)

Tabela 3: Características da área em estudo.

Cultura	Trigo Mole
Área de estudo	48 ha
Local	Latitude: 38.909878 Longitude: -7.752829
Densidade de Sementeira	170 kg/ha
Data de Sementeira	Outubro de 2019
Data de Colheita	Julho de 2020
Amostragem	10 pontos

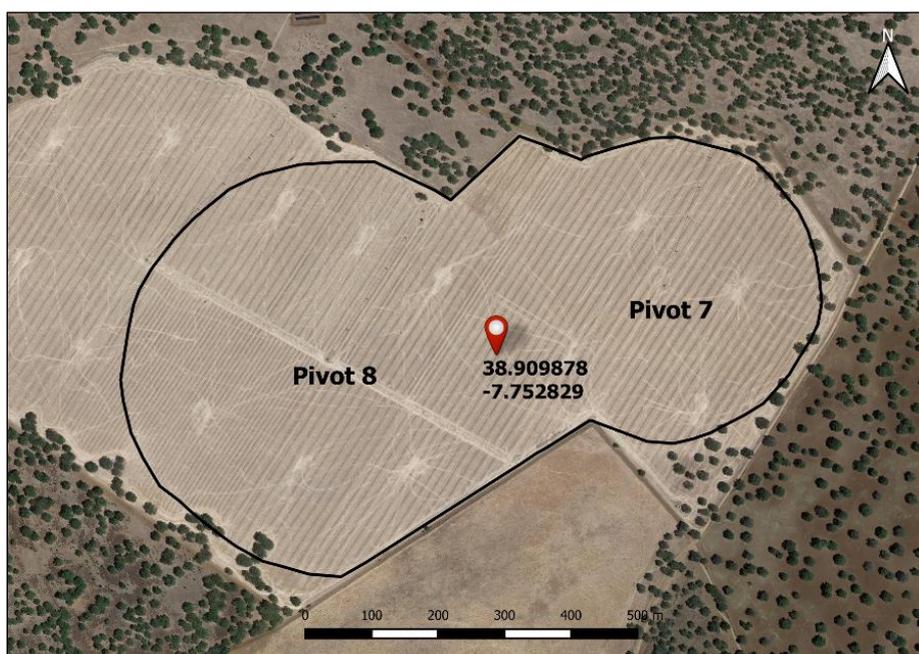


Figura 8: Superfície utilizada para a realização dos ensaios (pivot 7 e 8).

3.1.2 Caracterização Climática

Para efeitos de caracterização climática da zona onde se localiza a exploração, utilizou-se a normal climatológica da Estação Meteorológica de Évora (Lat.:38°34N; Lon.:07°54W; Alt.: 309m), correspondente ao período 1981/2010.

O clima é o comportamento e a dinâmica das condições da atmosfera de um dado local, composto por um conjunto de condições meteorológicas que se sucedem e se repetem ciclicamente ao longo de alguns meses ou anos - define-se no mínimo por um período de 30 anos (gráfico 1). Ao caracterizar o clima de uma região, estabelecemos um panorama sobre o regime anual de chuvas, as estações que se definem localmente, as temperaturas médias e uma série de elementos que marca as suas condições naturais.

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, que corresponde à última revisão de Köppen em 1936, a zona onde o ensaio se realiza apresenta o clima mediterrânico Csa (figura 9), que tem como particularidade própria e única, nos tipos de clima existentes no mundo, a falta de precipitação no Verão. Define-se como clima temperado com Verão quente e seco nas regiões interiores do vale do Douro, assim como nas regiões a sul do sistema montanhoso Montejunto-Estrela (exceto no litoral oeste do Alentejo e Algarve). É o único clima em que as temperaturas máximas anuais coincidem com os teores mínimos de precipitação.

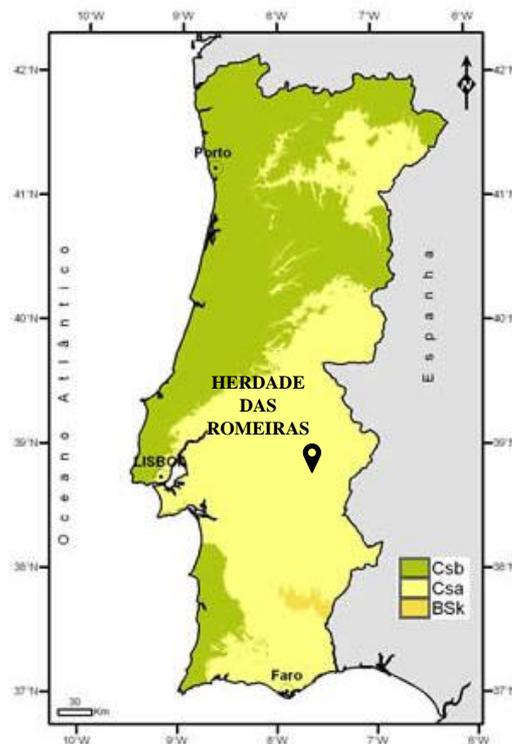


Figura 9: Classificação Climática de Köppen para o continente português, com a zona do ensaio assinalada.

O inverno 2019/20 (dezembro 2019, janeiro e fevereiro 2020) em Portugal continental classificou-se como extremamente quente e seco. Fevereiro de 2020 foi o mais quente desde 1931 e o valor da temperatura máxima do ar foi o mais alto desde 1931. Foram ultrapassados os maiores valores da temperatura máxima do ar para o mês de fevereiro em cerca de 40% das estações meteorológicas da rede IPMA, entrando numa situação de seca meteorológica nas regiões a sul do Tejo (IPMA, 2020).

A primavera de 2020, em Portugal continental, classificou-se como muito quente em relação à temperatura do ar e normal em relação à precipitação. Verificou-se que em todos os meses de primavera (março, abril e maio) ocorreram anomalias positivas da temperatura do ar (máxima, média e mínima), destacando-se o mês de maio com valores muito acima do normal. Nos 3 meses de primavera apenas o mês de maio registou um total de precipitação inferior ao normal, nos meses de março e abril os totais de precipitação foram superiores ao valor médio, em especial no mês de abril (IPMA, 2020).

De referir que o período de janeiro a agosto de 2020 foi o mais quente dos últimos 90 anos. A precipitação acumulada no ano agrícola 2019/20, foi de 560 mm (gráfico 2).

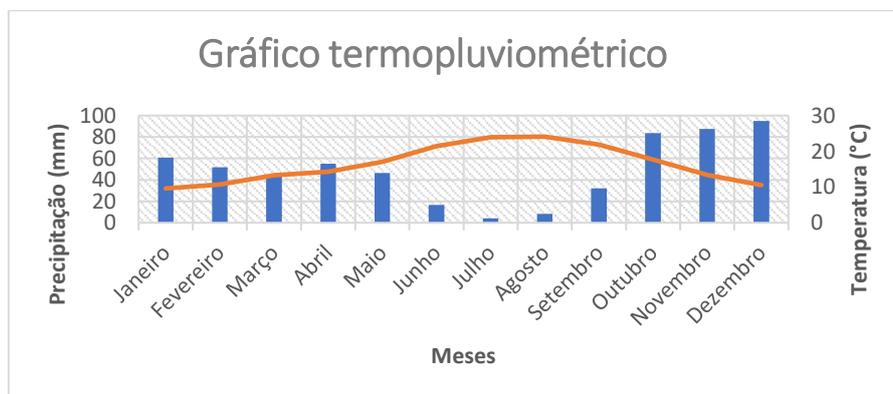


Gráfico 1: Gráfico termopluiométrico do período de 1981 a 2010.

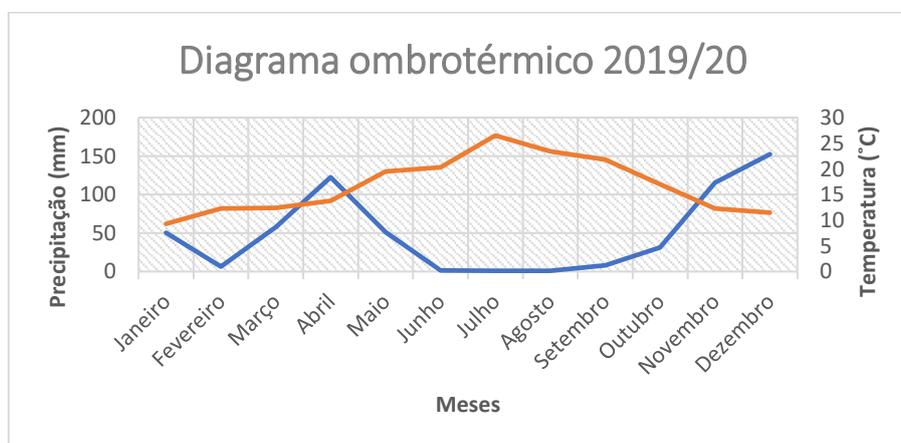


Gráfico 2: Diagrama ombrotérmico do ano agrícola de 2019/20.

3.1.3 Caracterização Edáfica

Com base no livro de José Carvalho Cardoso, “Solos de Portugal - Sua Classificação, Características e Gênese. I. A Sul do Rio Tejo. 1965”, as parcelas do ensaio possuem uma grande heterogeneidade de solos. Verifica-se o predomínio de solos das famílias Pac, Pag e Vcm. São solos de textura franco-argilo-arenosa a argilosa, com proveniência destacada em calcários, principalmente (figura 10).

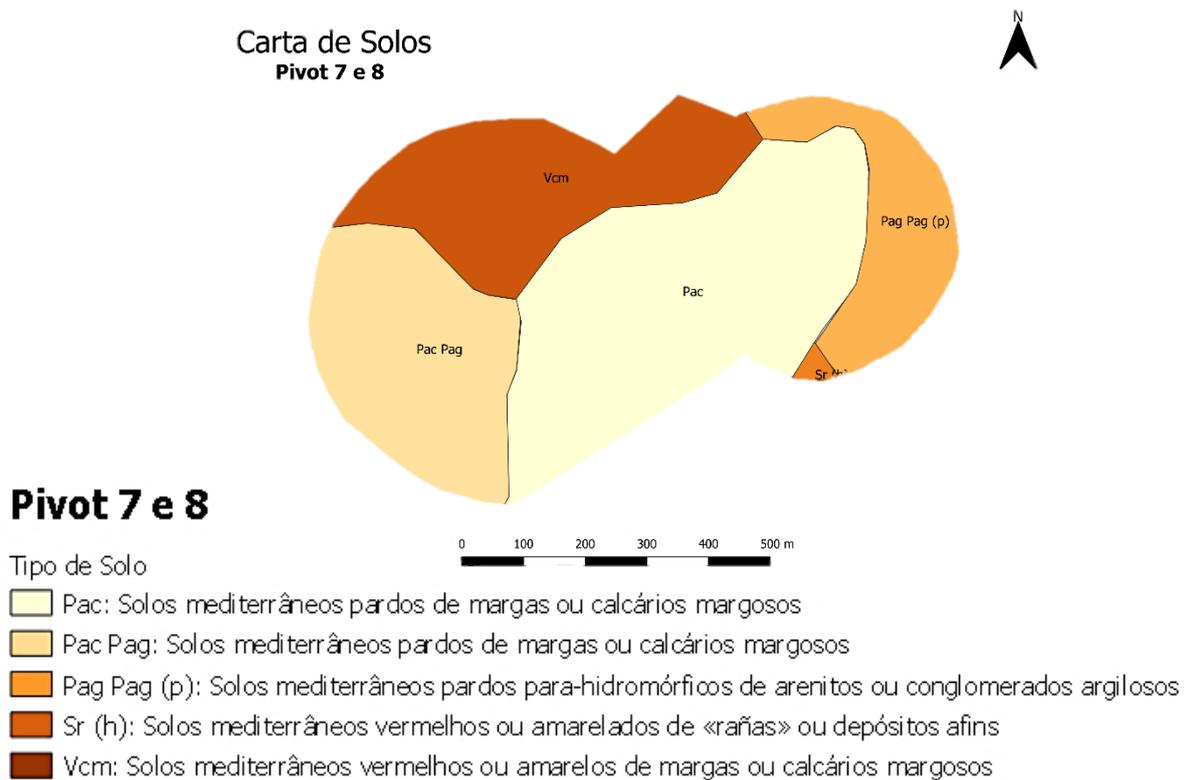


Figura 10: Carta de Solos da área em estudo. Adaptado de Carta de Solos de Portugal nº36B.

- **Solos mediterrâneos pardos de margas ou calcários margosos (Pac)**

O horizonte Ap, tem cerca de 20 a 35 cm, é pardo ou castanho, nalguns casos pardo-amarelado. Possui textura franca, franco-argilo-arenosa ou franco-argilosa, por vezes com alguns elementos grosseiros subangulosos (quartzo e quartzitos). Tem estrutura granulosa média a grosseira moderada ou forte. É friável a firme. Possui um pH entre 6 e 7 (Carvalho Cardoso, 1965).

O horizonte B, tem cerca de 20 a 60 cm, é castanho ou pardo-amarelado, de textura franco-argilo-arenosa a argilosa. A estrutura é anisoforme angulosa grosseira moderada ou prismática média ou grosseira moderada ou forte. Existem películas de argila nas faces dos agregados. O pH situa-se entre os 7 e 8.5.

No horizonte C e Cca, a composição é de margas ou calcários margosos, por vezes calcários não compactos misturados com xistos, grés argilosos, argilitos, argilas ou grés-argilo-calcários.

- **Solos mediterrâneos pardos para-hidromórficos de arenitos ou conglomerados argilosos (Pag)**

O horizonte superficial A1, tem cerca de 20 a 35 cm, cor parda, parda-acinzentada ou cinzenta-clara. A textura é arenosa a franco-arenosa. Pode não ter agregados, e tendo possuem uma estrutura granulosa fina fraca. É um horizonte solto ou muito friável. O pH situa-se entre 5 e 6 (Carvalho Cardoso, 1965).

O horizonte B, com 20 a 60 cm, possuir cor pardo-acinzentada, pardo-amarelada ou pardo-oliváceo, com ou sem manchas e pontuações ferruginosas. A textura é franco-argilo-arenosa, argilo-arenosa ou argilosa. A estrutura é prismática grosseira fraca a maciça, havendo algumas películas de argila nas faces dos agregados. É um horizonte aderente, plástico, muito compacto. O pH é de 5 a 6.5.

No horizonte C, apresentam-se formações detríticas predominantemente areno-argilosas, em geral grés ou conglomerados, mais ou menos consolidadas, de cimento argiloso, ou argilo-calcário.

- **Solos mediterrâneos vermelhos ou amarelos de margas ou calcários margosos (Vcm)**

O horizonte A1, tem 15 a 30 cm, cor pardo-avermelhada ou vermelha. A textura pode variar de franca, franco-argilo-arenosa ou franco-argilosa, por vezes argilosa. É um horizonte friável a firme. Efervescência nula ao CIH. O pH situa-se entre 6 e 7.5 (Carvalho Cardoso, 1965).

O horizonte B tem cerca de 20 a 40 cm, cor vermelha ou vermelho-escura. A textura é tendencialmente mais argilosa. Há por vezes pequenas concreções ferruginosas e películas de argila nas faces dos agregados. É um horizonte firme, com pH entre 6.5 a 8.

O horizonte Cca C, é composto por margas ou calcários margosos, por vezes calcários não compactos misturados com xistos, grés argilosos, argilitos, argilas ou grés-argilo-calcários.

3.2 Irrigação e Fertilização

A primeira rega foi realizada no dia 26 de fevereiro de 2020, rega que permitiu compensar a perda de água por evapotranspiração, provocada pelas altas temperaturas que se fizeram sentir, e falta de precipitação, comparativamente com os valores normais para o mês de fevereiro. A última rega realizou-se no dia 9 de junho de 2020. No total do ciclo da cultura foram distribuídos 1450 m³/ha ao longo de 5 meses, sendo que no mês de abril apenas se efetuaram duas regas, pois choveram cerca de 122.4 mm (gráfico 2). No mês de março regou-se cerca de 572 m³/ha, no mês de abril 253 m³/ha, no mês de maio 481 m³/ha e no mês de junho 117 m³/ha.

Realizaram-se três fertilizações de cobertura com adubos sólidos e uma adubação de fundo. Segundo o Manual de Fertilização das Culturas – LQARS, e tendo em conta os níveis de P₂O₅ e K₂O extraíveis do solo (figura 38 - anexos), a adubação de fundo, a 285 kg/ha foi realizada para uma produção objetivo de 8 ton/ha, no dia 19 de outubro. Foram aplicadas 29 unidades de N ha⁻¹, 51 unidades de P ha⁻¹ e 34 unidades de K ha⁻¹. A primeira adubação de cobertura (11 de janeiro) registou 54 unidades de N ha⁻¹. A segunda e terceira, (13 de fevereiro e 26 de março) registaram 48 unidades de N ha⁻¹ em cada aplicação. Aplicou-se uma solução via fertirrega com 32 unidades de azoto, no dia 1 de maio, contabilizando um total de 45 unidades de N ha⁻¹. A última aplicação de fertilizante ocorreu no dia 5 de maio, com uma solução composta por 6 unidades de azoto, 9 unidades de fósforo e 12 unidades de potássio, e ainda com a presença de matéria orgânica líquida (MOL) e micronutrientes. Esta aplicação contabilizou um total de 7 unidades de N ha⁻¹, 11 unidades de P ha⁻¹ e 14 unidades de K ha⁻¹. No total aplicaram-se 216 kg N ha⁻¹, colmatando as necessidades da cultura em azoto para um objetivo de produção de 8 ton/ha. (ver capítulo 2.3.3)

Tabela 4: Unidades de fertilizante aplicados à cultura de trigo mole durante a campanha.

	Fertilizante	kg/ha	Formulação	N	P	K	S	Ca
19/out	PLUS Master 14	285	10.18.12	10	18	12	5	0
11/jan	Nitrolusal 27%	150	27.0.0	27	0	0	0	4
13/fev	Nergetic Dynamic DS+	200	24.0.0	24	0	0	14	5
26/mar	Nergetic Dynamic DS+	195	24.0.0	24	0	0	14	5
01/mai	Solução 32 N	142	32.0.0	32	0	0	0	0
05/mai	Humifosfato 9	117	6.9.12	6	9	12	0	0
			TOTAIS	216	62	48	70	26

3.3 Condutividade Elétrica Aparente do Solo

A condutividade elétrica é a capacidade que um material possui em conduzir corrente elétrica. Os valores da CEa encontram-se relacionados com as propriedades do solo, parâmetros de fertilidade e também com a produtividade das culturas, sendo que o mapeamento da condutividade elétrica pode também ser utilizado para delinear zonas de gestão diferenciada.

Na figura 11 está representada a carta de condutividade elétrica obtida através do seu levantamento, com recurso ao sensor “Veris XA2000”. Este levantamento foi efetuado em 2015. As unidades da legenda são em mS/m.

A CEa do solo da parcela varia entre 5 e valores superiores a 90 mS/m. Como a área representada é de cerca de 70 ha, existe bastante heterogeneidade entre as parcelas, mas é evidente uma diferença entre o pivot 8, constituído por zonas com CEa superior, essencialmente valores acima de 30 mS/m, e o pivot 7, com zonas de CEa inferior, maioritariamente entre 5 e 20 mS/m.

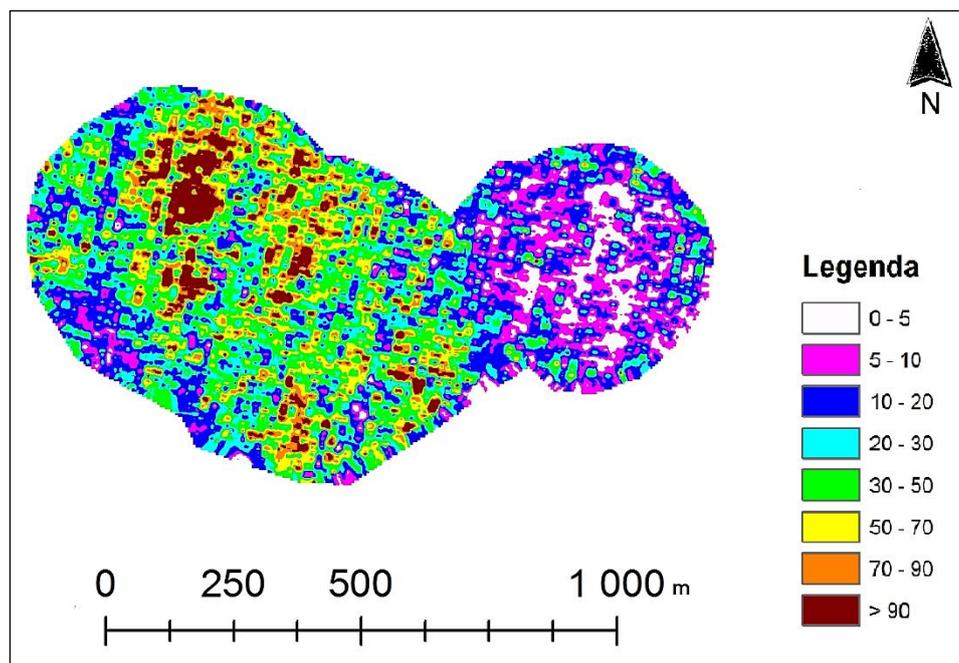


Figura 11: Mapa de Condutividade Elétrica Aparente do Solo nos pivots 7,8 e 9.

3.4 Itinerário técnico da cultura – cronologia

1. Inicialmente aplicou-se adubo de fundo, na ordem dos 285 kg/ha, sem diferenciação. O adubo utilizado foi o PLUS Master 14 da ADP Fertilizantes, composto por 10 unidades de azoto, 18 de fósforo e 12 de potássio. Conta ainda com a adição de enxofre, em 5 unidades.

2. A sementeira foi realizada alguns dias depois das “primeiras águas”, em cima de cama de restolho de girassol. Foi efetuada sementeira direta por dois semeadores, debitando 170 kg/ha de semente de trigo mole, da variedade Adagio, que tinha apresentado bons resultados em anos anteriores.



Figura 12: Emergência da cultura do trigo e da cultura anterior, girassol.

3. Posteriormente, foi realizada uma aplicação de herbicida, para controlo das infestantes presentes na parcela. Utilizaram-se os herbicidas “Mustang”, composto por florasulame e 2,4-D, e “U46 Combi Fluid”, uma solução concentrada de 2,4-D e MCPA para o combate a infestantes de folha larga, na dose de 0.75 e 0.6 L/ha, respetivamente. Adicionou-se um molhante, o “Genapol”, à dose de 0.75 L/ha, para melhorar a absorção foliar e a penetração das substâncias ativas nos alvos a tratar.



Figura 13: Controlo químico de infestantes com recurso a trator e pulverizador montado.

4. De seguida, seguiram-se duas adubações de cobertura, uma delas com Nitrolusal 27% da ADP Fertilizantes, onde se aplicou 175 kg/ha nas zonas com índices NDVI mais reduzidos e 150 kg/ha nas zonas com índices mais elevados, numa tentativa de equilibrar o desenvolvimento nas zonas piores. A aplicação diferenciada, foi realizada de forma manual pelo operador, que com acesso ao mapa de aplicação, alterou o débito instantâneo do distribuidor de adubo. Este facto deveu-se a dificuldades técnicas na configuração do sistema alfaia-trator-GNSS.

5. Em meados de fevereiro, a adubação de cobertura com o adubo Nergetic Dynamic DS+, comercializado pela ADP Fertilizantes, depois de resolvidos os problemas técnicos foi realizada de forma automática, isto é, garantiu-se a aplicação de adubo nas quantidades definidas pelo mapa de aplicação (de 150 a 250 kg/ha), tendo sido garantidas as aplicações diferenciadas nas parcelas em estudo e mais concretamente na área do ensaio.



Figura 14: Distribuição centrífuga do fertilizante pela cultura.

6. Mais tarde, realizou-se um tratamento fitossanitário com o produto comercial “Prosaro”, uma solução concentrada de protioconazol e tebuconazol, na dose de 1 L/ha, para prevenir e curar a atividade de fungos na cultura. Foi adicionado um bioestimulante, “Profertil”, um produto à base de algas, com potássio, para melhorar o vigor no desenvolvimento radicular e vegetativo.

7. No final de março, procedeu-se à última aplicação diferenciada de azoto em cobertura, novamente com o adubo Nergetic Dynamic DS+, um produto que aposta na libertação lenta do azoto, de maneira a que a lixiviação seja menor e melhore a disponibilidade deste nutriente por parte das plantas. É um adubo que possui enxofre, de modo a corrigir as carências de nutrição na cultura de trigo mole. A aplicação variou entre 150 e 250 kg/ha.



Figura 15: Distribuição centrífuga do fertilizante, com recurso a condução automática.

8. Na transição da fase de espigamento para ântese, aplicou-se solução líquida azotada 32 N, para potenciar o vigor dos colmos formados, favorecer a fertilidade da espiga e melhorar o crescimento do grão. Além disso, contribui para o melhor desenvolvimento de filhos que tenham ficado mais atrasados, e ainda pudessem contribuir com espiga.

9. Mais tarde, aplicou-se “Humifosfato 9”, da empresa Tecnoferti, sendo um adubo composto por 6 unidades de azoto, 9 unidade de fósforo e 12 de potássio. Este adubo foi aplicado para beneficiar o rendimento, principalmente o peso específico do grão. É um adubo líquido com matéria orgânica e possui micronutrientes.

10. A colheita de trigo das parcelas realizou-se nos primeiros dias de Julho de 2020 com uma ceifeira debulhadora, cuja frente tem 6 metros e um monitor de produtividade georreferenciado.

Tabela 5: Itinerário técnico da cultura de trigo mole, nos pivots 7 e 8, no ano agrícola de 2019/20.

Data	Operação	Produto	Numeração referente à cronologia
19 outubro	Adubação de Fundo	Adubo Complexo NPK (S) 10-18-12 (5) 285 kg/ha	1
21 e 22 outubro	Sementeira	Trigo Mole Adagio 170 kg/ha	2
07, 09 e 10 dezembro	Controlo Químico de Infestantes em pós- emergência	Mustang (0.75 L/ha) u46 Combi (0.6 L/ha) Genapol (0.75 L/ha)	3
11 janeiro	Adubação de Cobertura	Adubo Nitrolusal 27% 150 a 175 kg/ha	4
13 fevereiro	Adubação de Cobertura VRT	Adubo Nergetic DS+ 150 a 250 kg/ha	5
10 março	Tratamento Fitossanitário Fungicida + Bioestimulante	Prosaro (1 L/ha) Profertil (1 L/ha)	6
26 março	Adubação de Cobertura VRT	Adubo Nergetic DS+ 150 a 250 kg/ha	7
1 maio	Adubação de Cobertura Fertirrega	Solução Azotada 32 N 142 kg/ha	8
5 maio	Adubação de Cobertura Fertirrega	Humifosfato 9 117 kg/ha	9
1 julho	Colheita	-	10

3.5 Delineamento de zonas de gestão e amostragem inteligente

Ao longo da elaboração do trabalho foram observadas imagens do satélite Sentinel-2, durante o desenvolvimento da cultura de trigo, sendo adaptadas para a realização das fertilizações de cobertura, nomeadamente para a criação de mapas de aplicação. As imagens foram retiradas da plataforma “Agromap – Agrolnsider”. O principal índice de vegetação, e tomado em conta para a aplicação, foi o NDVI.

Procurou-se perceber qual a resposta da cultura à aplicação diferenciada de azoto em cobertura, com três classes diferentes (150 kg/ha; 200 kg/ha; 250 kg/ha). As quantidades foram definidas de modo a não prejudicar a cultura, e havendo uma significativa diferença entre classes (50 kg/ha), de maneira a que os resultados fossem mais evidentes.

Desde a sementeira foram realizadas várias medições às plantas em pontos devidamente escolhidos, tendo em conta diferenças mais visíveis após o estabelecimento das plantas em toda a parcela. Foram escolhidos 10 pontos de amostragem que se inserem em área de fertilização diferenciada. O número de plantas/m², altura de plantas e estado sanitário foram sempre registados até à fase de emborrachamento, altura em que se começaram a registar dados para parâmetros de produtividade, tais como o n° de espigas/m² e espiguetas/espiga.

Na fase final de maturação, retiraram-se três amostras em redor de cada ponto. Todas as plantas foram retiradas numa área de amostragem de 0.25 m², para efetuar contagem das mesmas, peso total das plantas e peso total dos grãos. Esta avaliação, a par da interpretação da carta de produtividade e margem bruta, é a validação em termos económicos, produtivos e ambientais, de todo o processo de aplicação diferenciada de azoto.

3.6 Delineamento de pontos de amostragem

Ao longo do desenvolvimento da cultura foram retirados dados e efetuadas diversas medições e observações ao nível da evolução das plantas. Inicialmente, marcaram-se 10 pontos nas parcelas em estudo. Estes pontos foram marcados unicamente pela diferença no índice NDVI, havendo cinco pontos marcados com índice mais alto (NDVI +) e outros cinco com índice mais reduzido (NDVI -). Na marcação dos pontos não se teve em conta comportamentos de culturas anteriores nas parcelas nem zonas com maior facilidade de acesso. (figura 16)

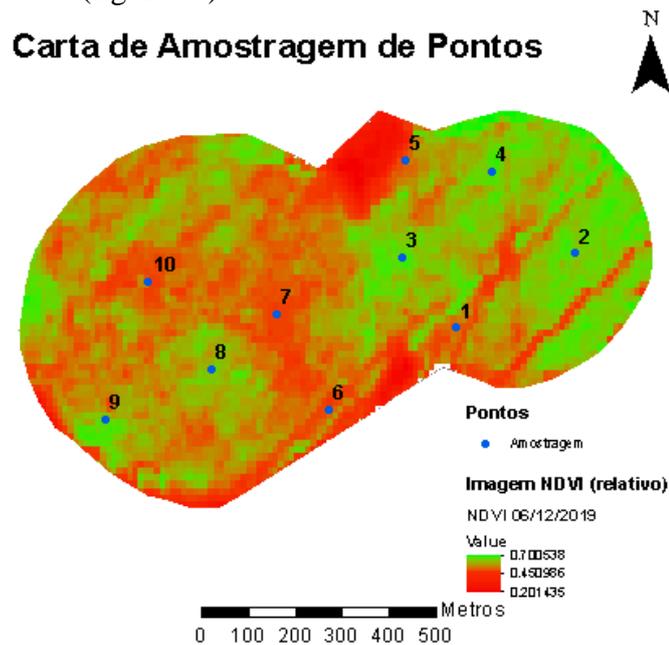


Figura 16: Imagem NDVI (06/12/2019) utilizada para marcação dos pontos de amostragem no terreno.

Os 10 pontos foram assinalados no campo com tutores a cerca de 1 metro de altura, sendo georreferenciados através de um simples dispositivo GNSS para identificação dos pontos na parcela – GARMIN eTrex H. (figura 17)



Figura 17: Dispositivo GARMIM eTrex H utilizado para marcação dos pontos no terreno.

Tabela 6: Sequência temporal das idas ao campo para coleta de dados.

Cronologia	Data	Estádio fenológico (Zadoks <i>et al.</i>)	Descrição da intervenção
I	26 de dezembro	Afilhamento – 25	Contagem do nº de plantas Medição altura média Estado sanitário
II	10 de fevereiro	Afilhamento – 29	Medição altura média Estado sanitário
III	14 de março	Emborrachamento – 41	Medição altura média Estado sanitário Contagem do nº de plantas Contagem do nº de colmos Contagem de espiguetas/espiga
IV	25 de abril	Grão leitoso – 75	Contagem do nº de plantas Contagem do nº de colmos Contagem de espiguetas/espiga
V	14 de junho	Maturação – 92	Contagem do nº de plantas Peso total das plantas Peso total dos grãos

A primeira medição foi realizada em todos os pontos, tendo sido efetuada a meio da fase de afilhamento. Em todos os 10 pontos foram medidas em seis linhas, de 3 metros cada, de forma alternada, o número de plantas e a altura média das plantas em cada uma das linhas, efetuando-se a medição a cada 50 cm nas linhas em questão. Também foram retiradas algumas notas sobre o estado sanitário das plantas (figuras 18 e 19).



Figura 18: Fotografia captada na primeira recolha de dados num dos pontos de amostragem.



Figura 19: Método de medição da altura das plantas em afilhamento.

A segunda medição, efetuada num período em que as plantas já efetuavam uma maior cobertura de solo, e o afilhamento estava numa subfase mais avançada, prestes a começar o alongamento do colmo, apenas se baseou na medição da altura das plantas nas linhas analisadas na primeira medição (figura 19) e observação do estado sanitário. Neste momento registavam-se “manchas” em toda a parcela que validavam os menores e maiores índices NDVI, observáveis a olho nú. Estas “manchas” apresentavam plantas descoloradas, locais onde começaram a aparecer infestantes e também onde as plantas tiveram dificuldade em emergir, podendo haver alguma limitação de solo. Locais de passagem de máquinas e sentidos de trabalho também ficaram evidentes.

A terceira medição, após a primeira aplicação VRT, no estado fenológico de emborrachamento, consistiu novamente na medição da altura das plantas e observação do estado sanitário das mesmas, embora apenas tenham sido efetuadas três medições na linha, uma vez que as plantas apresentavam uma maior homogeneidade. Registaram-se também componentes de produção para estimativa de produtividade final (figura 21).



Figura 20: Plantas descoloradas no fim do afilhamento.



Figura 21: Formação da espiga. Desenvolvimento das espiguetas e aristas.

Na quarta medição, fase de grão leitoso, registaram-se novamente componentes de produção para estimativa de produtividade, uma vez que houve contagem de colmos para assimilação do número de espigas, isto num quadrado de 0.25 m² de área (figura 22). Posteriormente, foram contadas as espiguetas por cada espiga recolhida em cada quadrado, tendo sido calculada uma aproximação à produção final.



Figura 22: Registo dos componentes de produção para estimativa de produtividade. Limitação da área de análise a um quadrado de 0.25 m².

Antes da colheita do grão pela ceifeira-debulhadora, foram retiradas três amostras em cada ponto inicialmente marcado, para se conseguir uma ideia representativa da variabilidade produtiva do local. A metodologia foi semelhante à recolha de dados para estimativa de produção, utilizando o quadrado de 0.25 m² de área, só que desta vez, todas essas plantas foram recolhidas com o auxílio de uma tesoura, por forma a determinar a produtividade nos pontos em questão. (figura 23)



Figura 23: Imagem elucidativa da operação de recolha das plantas de trigo, para contagem e pesagem de plantas e grãos.

Após a recolha das plantas, estas foram devidamente pesadas recorrendo a uma balança digital, antes da sua debulha, por forma a determinar o peso total de biomassa. Depois, procedeu-se à debulha manual (figuras 24 e 25), recorrendo a técnicas de crivagem vulgarmente utilizadas antes do estabelecimento das ceifeiras-debulhadoras, de modo a determinar o peso total dos grãos das amostras recolhidas.



Figura 24: Debulha manual do trigo.



Figura 25: Limpeza e separação das impurezas resultantes da debulha manual.

Todos os dados recolhidos em cada ponto contribuíram para a realização de uma análise estatística, observando-se a dispersão de cada zona, que obriga a uma análise de variância ANOVA e confirmação de diferenças estatisticamente significativas entre as médias das zonas (ver quadro 1 – anexos).

3.7 Elaboração da carta de prescrição

A carta de aplicação diferenciada foi elaborada tendo em conta a evolução da cultura no campo e na plataforma ArcGis – Agromap, onde se utilizou a imagem satélite sem nuvens, mais próxima temporalmente das operações de distribuição diferenciada de adubo, neste caso a imagem de dia 4 de fevereiro de 2020. Optou-se por se utilizar a mesma imagem para as duas aplicações, visto que a diferença de NDVI entre aplicações era residual.

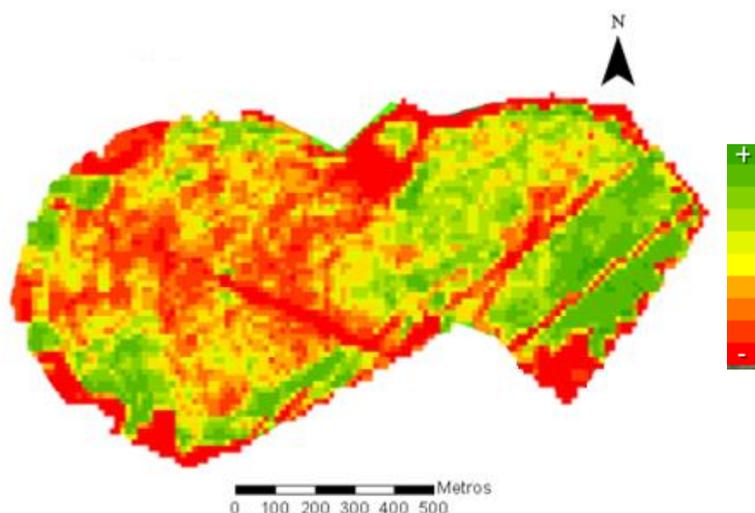


Figura 26: Imagem NDVI relativo de 04/02/2020. A verde, valores NDVI mais elevados e a vermelho, valores NDVI mais baixos.

A imagem satélite apresentava evidentes diferenças no comportamento vegetativo das plantas, isto já na fase de afilamento, onde havia uma total cobertura do solo por parte da cultura.

Nesta data (04 de fevereiro) o pivot 7 apresentava-se com melhores índices de NDVI, exceto em duas zonas, causadas pela falha na transmissão do semeador, que foram semeadas mais tarde. O pivot 8, apresentava-se de forma geral, com menores teores de clorofila nas folhas.

A imagem foi reclassificada no software ArcMap - ArcGis, em quantis para apenas duas classes, uma com índice NDVI mais alto (NDVI +) e a outra, com índice NDVI mais baixo (NDVI -). Deste modo, dividiu-se as zonas de tratamento diferenciado. Após a reclassificação, a imagem *raster* foi convertida para formato vetorial, de modo a se atribuírem as quantidades de adubo aos respetivos polígonos da carta.

O ensaio consistiu em duas repetições de cada modalidade a testar, ou seja, aplicação diferenciada a 150 kg/ha em zonas com NDVI - e 250 kg/ha em zonas com

NDVI +; aplicação diferenciada a 250 kg/ha em zonas com NDVI - e 150 kg/ha em zonas com NDVI +; aplicação a taxa fixa na ordem dos 200 kg/ha.

O ensaio foi realizado em faixas de 30 metros de largura, correspondendo a duas vezes a largura de trabalho do distribuidor centrífugo. Tentou-se alinhar as passagens do trator com a orientação das faixas, de modo a que as seções de trabalho da alfaia, distribuíssem o adubo de forma mais regular na zona do ensaio.

Fora da zona de ensaio, realizou-se também aplicação diferenciada, por duas vezes. O objetivo foi aplicar maior quantidade de adubo nas zonas onde a cultura estava a responder pior, de forma a que o azoto estimulasse o desenvolvimento vegetativo e radicular das plantas. Aplicou-se nestas zonas 200 kg/ha de adubo, sendo que nas zonas melhores fez-se o inverso, aplicando-se 150 kg/ha. (figura 27)

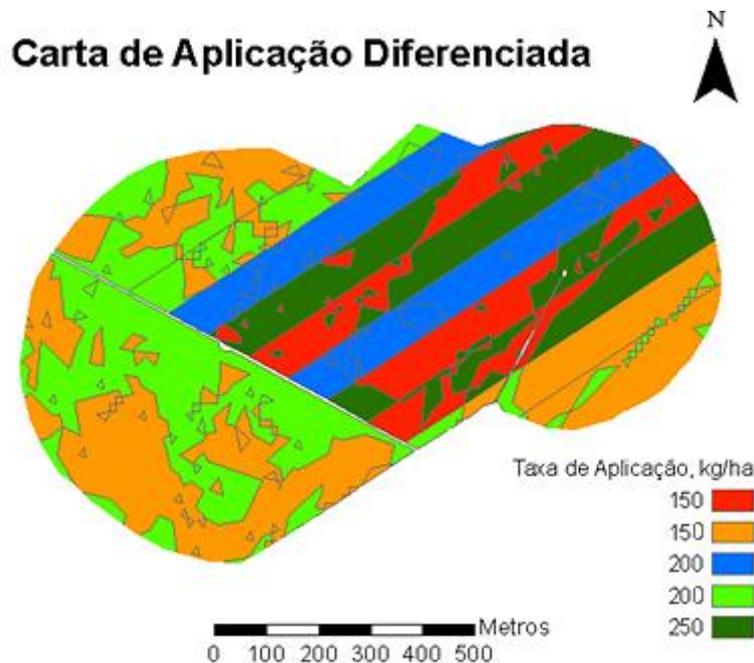


Figura 27: Carta de aplicação diferenciada utilizada para as operações de distribuição de adubo VRT.

O adubo foi aplicado através de um distribuidor Vicon RO-M Rotaflow Geosread, ligado ao trator por uma tomada ISOBUS, que serviu de transferência de informação do trator para a alfaia ao longo da aplicação, através de comandos eletrohidráulicos, ativados pela leitura georreferenciada do mapa de aplicação. A aplicação foi realizada com o auxílio de condução automática através de um recetor GNSS com sistema RTK, de alta precisão (figura 28).

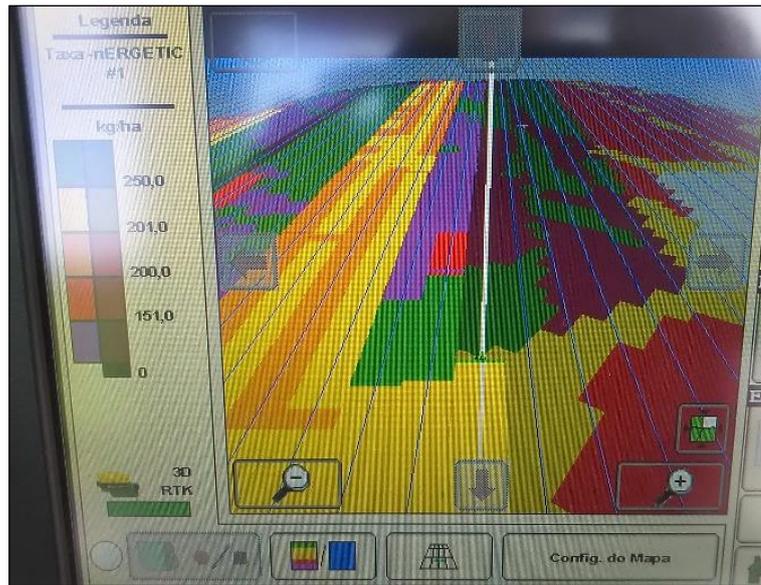


Figura 28: Carta de aplicação visualizada no monitor GreenStar 2630, sendo visível as classes e faixas de aplicação, bem como o sinal recebido pela antena GNSS RTK.

O operador possuía acesso à leitura do mapa através do monitor GreenStar 2630, da John Deere, bem como capacidade para realizar a paragem manual do distribuidor nas voltas de cabeceira e outros obstáculos (figura 29).

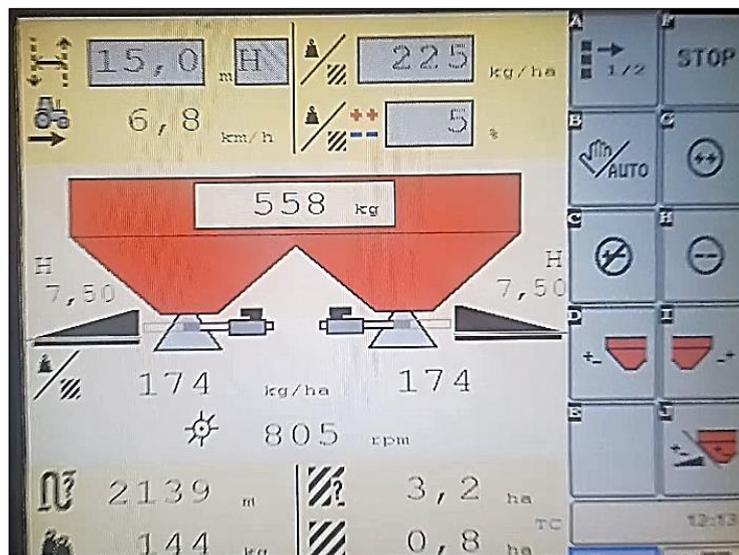


Figura 29: Página de controlo do distribuidor Vicon, onde se pode ver a taxa de aplicação instantânea, largura de trabalho, carga de adubo, etc... À direita, funcionalidades como paragem da distribuição ou fecho das adufas de cada disco.

4. Análise e discussão de resultados

A partir de todos os dados recolhidos nos diversos pontos de amostragem pretende-se avaliar a utilidade da tecnologia VRT, na aplicação de adubos de cobertura à base de N, na cultura de trigo mole, e até que ponto os índices de desenvolvimento da planta podem auxiliar na gestão diferenciada de fertilizantes.

Foi possível a elaboração de uma carta de produtividade, e realização de análises estatísticas, entre medições de parâmetros fenotípicos nos diversos pontos, diferentes níveis de fertilização e dados de produtividade finais, como forma de validação no campo.

Desde a emergência da cultura, foram observadas todas as imagens do satélite Sentinel-2, na plataforma Agromap, para controlar a evolução no desenvolvimento das plantas. Para efeitos de elaboração dos mapas de aplicação, as imagens temporalmente mais próximas da operação revelaram-se mais interessantes, pelo facto de apresentarem os índices de desenvolvimento mais atualizados. Embora, e como já foi dito anteriormente, apenas se utilizou uma imagem de satélite para construção da carta, uma vez que a diferença dos índices, espacialmente, entre aplicações, era muito reduzida, o que não justificou a escolha de mais que uma imagem, simplificando assim todo o processo. As imagens contemplam três pivots, uma vez que a parcela foi lançada na plataforma como um todo, o que não afetou a interpretação e avaliação dos índices de desenvolvimento das plantas nas parcelas em estudo.

4.1 Variação temporal e espacial do NDVI

A meados de novembro, a fase de emergência da cultura estava completa, embora com muito pouca cobertura de solo, pelo facto de as plântulas serem pequenas, registando-se uma maior absorção pelo solo, da radiação solar – transmitida sob a forma de REM (figura 31.a).

No princípio de dezembro, a cobertura de solo era superior (figura 31.c), devido ao aumento da superfície foliar das plantas. O índice NDVI tornou-se mais homogéneo devido ao aumento da biomassa vegetal por toda a parcela. Neste período, a presença de infestantes também contribuiu para o aumento do índice.

Mais tarde, no princípio de janeiro (figura 31.e), já com as infestantes controladas, houve diminuição de NDVI em diversas manchas por toda a parcela, coincidindo com uma descoloração no ápice foliar das plantas (figura 30). Este facto poderá ter sido devido às temperaturas mais baixas, exigência em azoto ou uma característica fisiológica da variedade, uma vez que estas cloroses se mantiveram por muito tempo na fase de afilamento e mesmo na fase de alongamento do colmo.



Figura 30: Descoloração no ápice foliar das plantas.

Em fevereiro, um mês especialmente seco e quente, a cultura reduziu de forma generalizada o seu índice NDVI, tendo havido uma melhoria significativa em março, após a primeira fertilização e regas de suplemento, no final do mês (figura 31.i).

A partir de meados de março, já com as aplicações de adubo realizadas, só foi possível ter acesso a uma imagem sem nebulosidade na segunda metade do mês de maio (figura 31.m), uma vez que neste intervalo temporal, a precipitação foi mais regular, não havendo imagens disponíveis na plataforma Agromap.

A fase final de maturação do grão deu-se de forma mais acelerada no pivot 7 em relação ao pivot 8, podendo ser uma clara influência do tipo de solo (figura 10), e consequente textura, do tipo franco-arenosa, havendo menor capacidade de retenção de água, acabando a cultura no final do ciclo sofrer por stress hídrico mais precocemente. Pelo contrário, no pivot 8, por possuir uma textura mais argilosa, com uma maior reserva de água, a cultura acabou por ter uma maturação mais tardia, pois as plantas tiveram disponibilidade de água por mais tempo. De realçar o facto de haver diversas zonas com NDVI superior, que se devem ao desenvolvimento de plantas infestantes, como foi o caso de *Coniza canadensis* e plantas da cultura anterior, de girassol (figura 31.o).

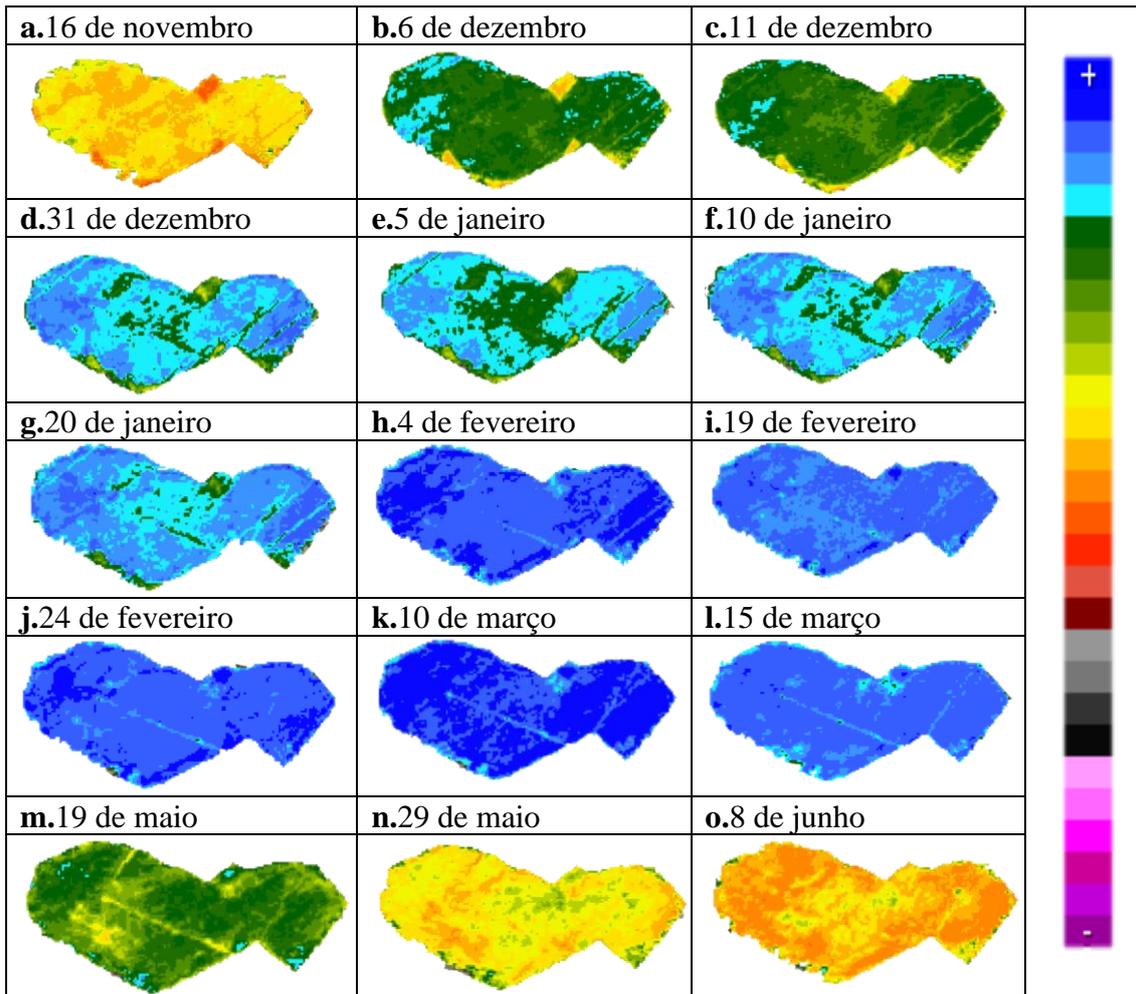


Figura 31: Imagens NDVI absoluto desde a sementeira até à maturação.

No dia 26 de dezembro efetuou-se a contagem do número de plantas em cada ponto definido. Dos 10 pontos inicialmente marcados, 5 deles apresentavam um índice NDVI + (valor máximo: 0.64 no ponto 4), representados a verde nas barras. Os restantes 5, NDVI -, representados a vermelho nas barras (valor mínimo: 0.52 nos pontos 6,7 e 10). Esta medição serviu para compreender se o índice NDVI era influenciado pelo número de plantas emergidas (gráfico 3).

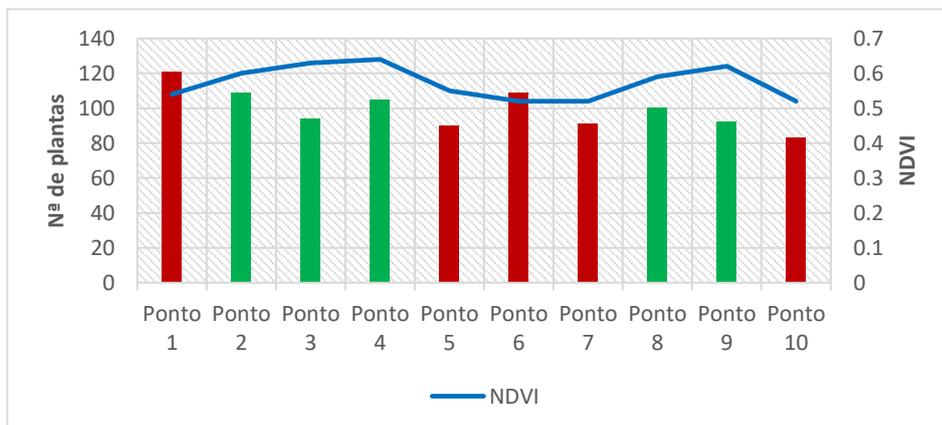


Gráfico 3: Número de plantas em cada ponto e índice NDVI médio no local a 26 de Dezembro

Com a análise do gráfico 3 é perceptível que nem sempre um maior número de plantas significa maior índice NDVI. Havendo uma maior densidade de plantas por unidade de área, é fácil afirmar que existe uma maior competição pelos recursos necessários ao seu desenvolvimento – luz, água e nutrientes. Neste caso, o nutriente é o azoto, que influencia o crescimento dos caules e das folhas, e havendo uma maior competição, o desenvolvimento de clorofila – que está fortemente correlacionado com o índice NDVI (Chai *et al.*, 2015) – é igualmente menor, afetando também o processo de fotossíntese.

Para clarificar se o número de plantas tinha alguma correlação com o índice NDVI nos pontos, elaborou-se o gráfico seguinte que evidencia uma linha de tendência praticamente nula, ou seja, o número de plantas não seguiu o índice NDVI na emergência da cultura ($R^2=0.0031$). Este resultado é bastante diferente quando não se utiliza o ponto 1 e 6, localizados no canto inferior direito, aumentando para um R^2 de 0.4168. Nestes pontos a emergência não foi homogênea, podendo ter influenciado a contagem do nº de plantas. De qualquer modo, a significância da regressão, com um nível de confiança de 95% é de 0.88, ou seja, não se revela significativa, pois não há uma relação linear entre a variável “NDVI” e a variável “Nº de plantas” (quadro 2 – anexos).

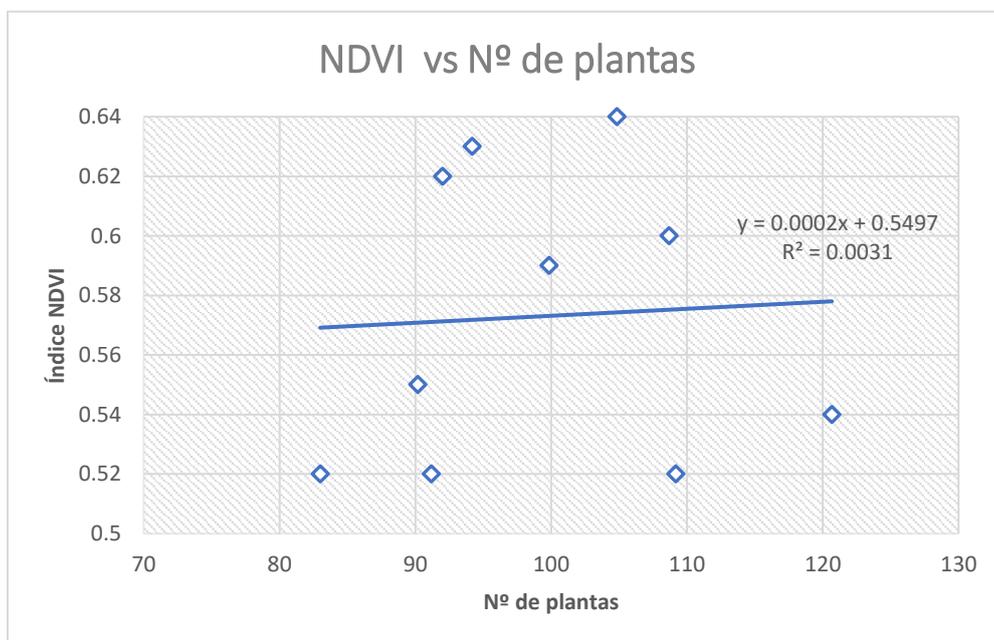


Gráfico 4: Correlação entre o índice NDVI e o nº de plantas contabilizadas em cada ponto a 26 de Dezembro de 2019.

Simultaneamente foram realizadas medições de altura nos pontos de amostragem, nas mesmas linhas de sementeira onde se efetuou a contagem do nº de plantas, até à fase de emborrachamento, resultando numa análise estatística, expressa pelo quadro 3 – anexos. No total foram efetuadas três medições de altura (26 de dezembro, 13 de fevereiro e 14 de março).

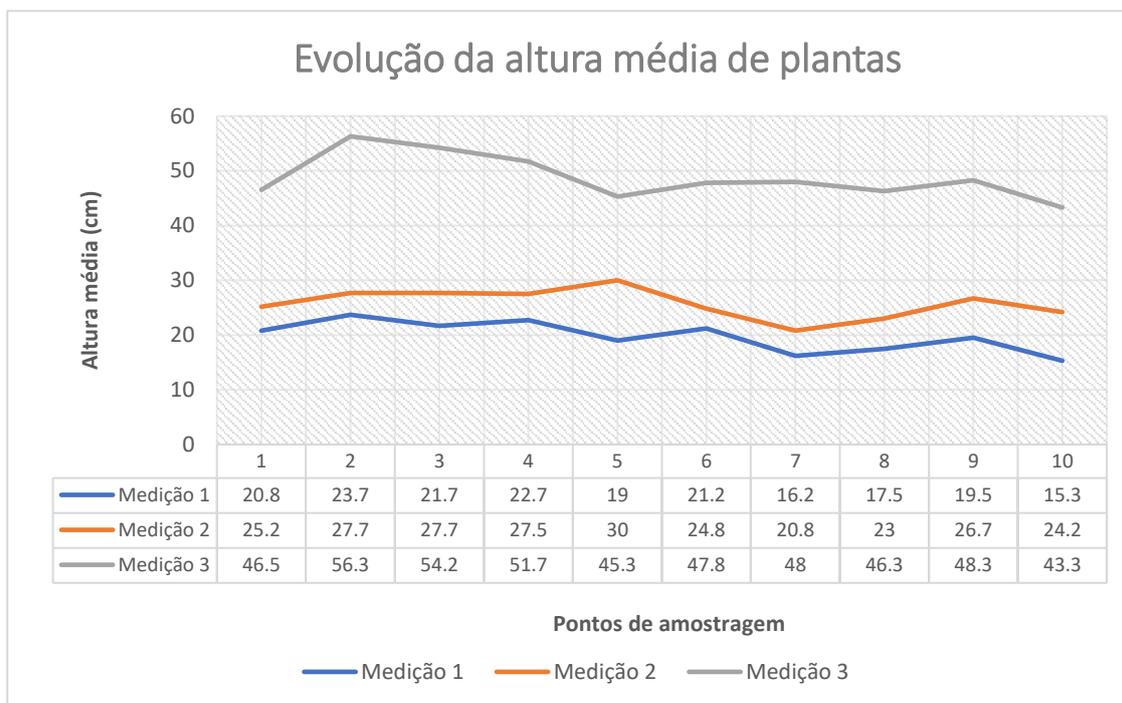


Gráfico 5: Evolução temporal da altura média de plantas nos pontos de amostragem (cm).

Na primeira medição (gráfico 5), o ponto 2 apresentou uma altura média de 23.7 cm, e o ponto 4, uma altura média ligeiramente inferior, 22.7 cm. A zona em redor destes pontos era onde as plantas apresentavam maior desenvolvimento. Pelo contrário, os pontos 10 e 7, apresentavam as alturas médias menores, com 15.3 cm e 16.2 cm, respetivamente. Em termos gerais, a variância foi de cerca de 8.3 cm em todos os pontos, o que indica uma dispersão em relação ao valor médio, que foi de 19.75 cm (quadro 3 – anexos).

Na segunda medição, a 13 de fevereiro (gráfico 5), em pleno afilhamento, no ponto 5 foi onde se registou uma altura média mais elevada, com cerca de 30 cm. De forma semelhante, os pontos 2 e 3 apresentaram uma altura média de 27.7 cm. Os pontos 7 e 8 foram os que tiveram menor altura média, com 20.8 cm e 23 cm, respetivamente. A média de todos os pontos subiu em relação à primeira medição como era expectável, passando para 25.75 cm, embora os valores se tenham mostrado mais dispersos, com cerca de 10.5 cm de variância (quadro 3 – anexos).

A 14 de março fez-se a última medição (gráfico 5), uma vez que a cultura estava a entrar na sua fase reprodutiva, deixando gradualmente de crescer vegetativamente, em altura. Assim, registou-se uma tendência semelhante em relação à segunda medição, com os pontos 2 e 3 a apresentarem melhor altura média, com 56.3 cm e 54.2 cm, respetivamente. Contrariamente, nos pontos 5 e 10, registou-se as menores médias de altura com 45.3 cm e 43.3 cm, respetivamente. A altura média de todos os pontos aumentou para 48.78 cm, com uma variância amostral de 21.7 cm (quadro 3 – anexos).

Relacionando a altura média de plantas a 14 de março (medição 3) e os resultados de produtividade obtidos (tabela 8), verifica-se que há uma relação linear positiva, tanto nos resultados reunidos no monitor de rendimento da ceifeira ($R^2=0.6268$), bem como os resultados obtidos pela recolha de amostras nos pontos de amostragem ($R^2=0.7683$), representado no gráfico 6. Nestes últimos, para efeitos de comparação retiraram-se os resultados no ponto 2 e 9, que se encontravam desajustados em relação aos resultados da ceifeira (gráfico 8). Em suma, plantas que se desenvolvem mais rápido e simultaneamente em altura, são plantas potencialmente mais produtivas, competindo mais efetivamente pela luz (Walker *et al.*, 1988).

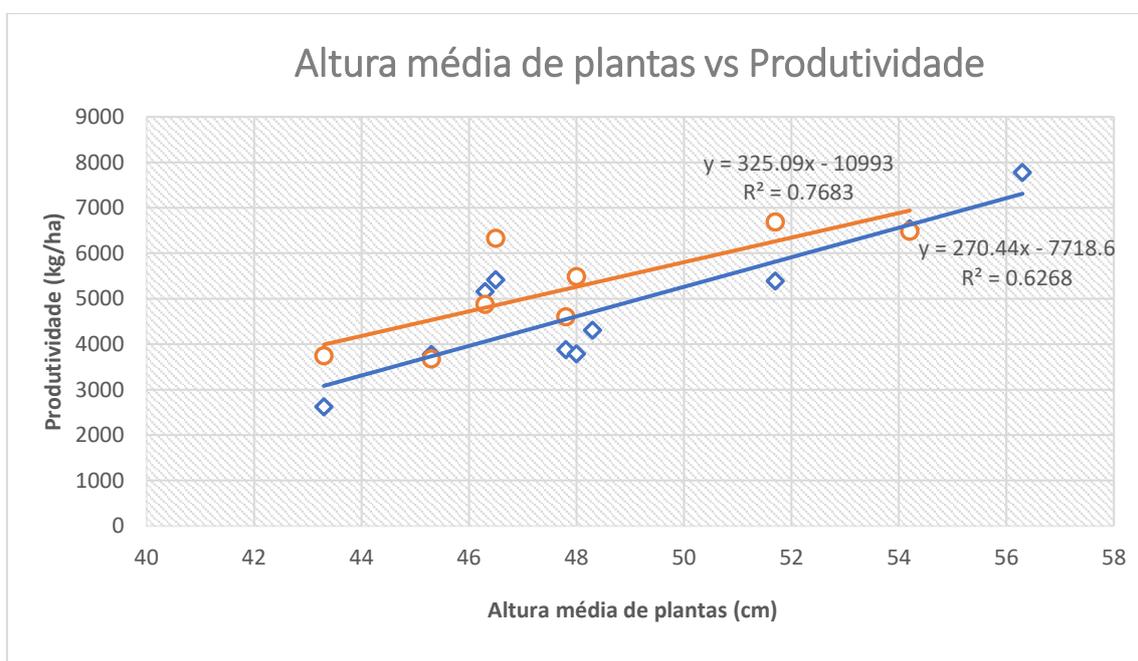


Gráfico 6: Relação entre a altura média de plantas e os valores de produtividade obtidos. A laranja, está representada a variável produtividade obtida por amostras de campo, e a azul está representada a variável produtividade obtida pelo monitor de rendimento da ceifeira.

Com as medições validou-se no campo a hipótese de os pontos localizados em zonas com índice NDVI + (pontos 2,3,4,8 e 9), corresponderem a plantas com maior altura, e pontos com índice NDVI - (pontos 1,5,6,7 e 10), a plantas com menor altura. O facto de o índice ser demasiado próximo entre pontos, dificultou a validação, mas a relação entre o índice NDVI e a altura média nos pontos, na data da última medição de altura (gráfico 7), com um $R^2=0.444$, indica que para um nível de confiança de 95%, a significância é de 0.035, ou seja, é demonstrado que existe uma relação linear entre a variável “NDVI” e a variável “Altura média de plantas” (quadro 4 – anexos).

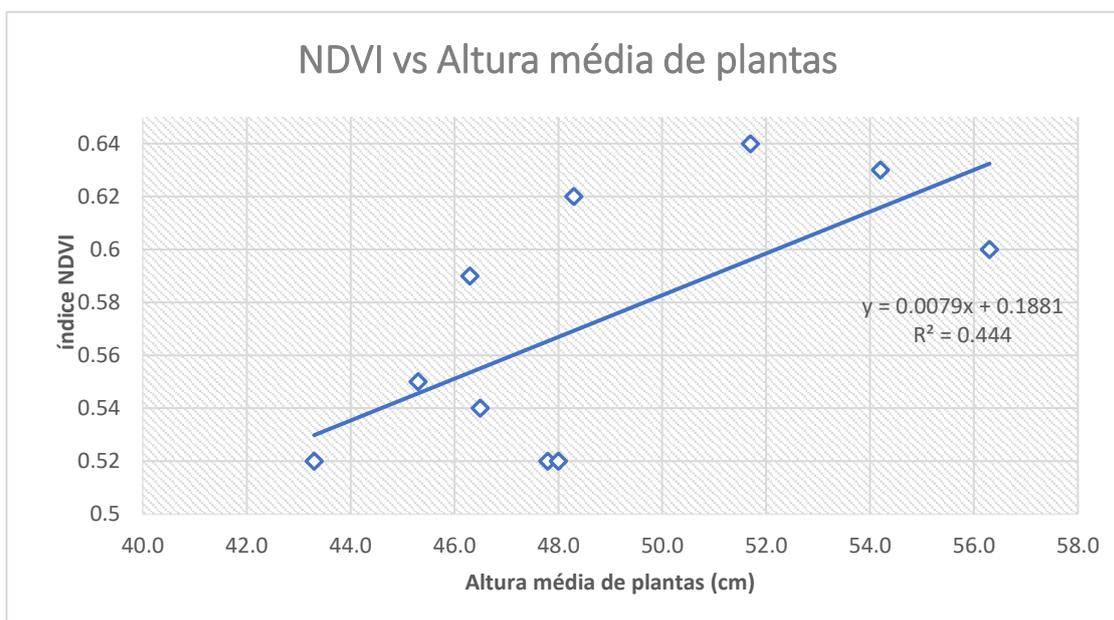


Gráfico 7: Correlação entre o índice NDVI e a altura média de plantas medida em cada ponto.

4.2 Estimativa de produtividade

Posteriormente, realizaram-se mais duas medições nos diversos pontos com o intuito de se estimar a produtividade. A estimativa de produtividade serviu para se criar uma noção do potencial produtivo da parcela, sendo uma ferramenta auxiliar para a realização de fertilizações ou tratamentos fitossanitários que pudessem potenciar ao máximo o valor obtido.

A primeira medição coincidiu com a última medição da altura de plantas, no estágio 41 da escala de Zadoks *et al.* (tabela 1), quando a bainha da folha bandeira se começou a alongar. Nesta fase já havia um pouco por toda a parcela, espigas com 1 a 3 cm. Foi realizada a contagem de todos os colmos numa área de 0.25 m², não rejeitando

qualquer tipo de planta em termos de viabilidade produtiva. Esta contagem forneceu o número de espigas por m², calculado através do método da proporcionalidade. A média de espigas/m² da parcela foi de 686.22, enquanto o número de espiguetas/espiga, cuidadosamente obtidas, foi igual a 21.33. Assumiu-se um número de 2.5 grãos por cada espiguetas, sendo esta uma característica varietal desconhecida. O peso de 1000 grãos, obtido através de ensaios publicados foi de 40 gramas.

Optou-se por fazer uma correção redutora ao valor final em cerca de 25%, para fazer face à heterogeneidade das parcelas, e também devido ao facto de a estimativa ter sido feita no início da fase de emborrachamento, sendo cometidos facilmente erros no registo.

Posto isto, a primeira estimativa de produtividade para toda a parcela foi de:

$$Produtividade \left(\frac{kg}{ha} \right) = \left[\left(\frac{Espiguetas}{Espiga} \right) \times \left(\frac{Grãos}{Espiguetas} \right) \right] \times \frac{Espigas}{m^2} \times PMG =$$

$$21.33 \times 2.5 \times 686.22 \times \frac{40}{100} = 14637 \frac{kg}{ha} \times 0.75$$

10 978 kg/ha

A segunda estimativa de produtividade ocorreu quando a cultura se encontrava na ântese (figura 32), já com as espigas perfeitamente desenvolvidas, facilitando a observação e registo de dados em comparação com a primeira estimativa. Neste período, a precipitação foi mais intensa e regular, podendo ter afetado a componente reprodutiva da cultura. De qualquer modo, a média de espigas por m² foi de 424, na média de todos os pontos observados. O número de espiguetas/espiga foi reduzido para 18.78. Os valores assumidos continuaram os mesmos, em relação ao n^o de grãos por espiguetas e peso de 1000 grãos, alterando-se a correção final em 15%, pelo facto de as espigas já estarem desenvolvidas e os erros de registo dos componentes produtivos serem menores.

$$Produtividade \left(\frac{kg}{ha} \right) = 18.8 \times 2.5 \times 425 \times \frac{40}{100} = 7962 \frac{kg}{ha} \times 0.85$$

6 768 kg/ha

O resultado desta estimativa para cada ponto, individualmente, está expresso no quadro seguinte, e em pormenor no quadro 5 – anexos:

Tabela 7: Estimativa de produtividade (kg/ha) nos pontos de amostragem

Ponto	Espiguetas/espiga	Espigas/m ²	Produção (kg/ha)	Correção área (-15%)
1	20.0	408.0	8 160	6 936
2	18.0	492.0	8 856	7 528
3	17.3	440.0	7 627	6 483
4	19.3	380.0	7 347	6 245
5	18.7	464.0	8 661	7 362
6	18.7	384.0	7 168	6 093
7	19.3	440.0	8 507	7 231
8	19.3	412.0	7 965	6 771
9	19.3	428.0	8 275	7 033
10	18.0	392.0	7 056	5 998

Igualmente ao realizado no ponto 4.1, relacionou-se o número de plantas contado na medição 1 e altura média de plantas na medição 3, bem como o valor de NDVI nessa data (14 de março), com os valores obtidos na estimativa de produtividade para cada ponto. Todas as relações obtiveram valores de R² inferiores a 0.1, portanto apresenta um coeficiente de correlação próximo de zero que indica que não há relação entre as variáveis, além de não apresentarem significância para nível de confiança de 95% (quadro 6, 7, 8 – anexos)



Figura 32: Formação da espiga de trigo na fase final de ântese.

4.3 Análise da produtividade

Os resultados de produtividade foram obtidos através da recolha de plantas nos pontos marcados inicialmente, de modo a tentar compreender e validar todo o trabalho efetuado e confirmar a hipótese que a aplicação diferenciada de adubo azotado à cultura do trigo mole traz vantagens produtivas, económicas e ambientais. Esses resultados foram complementados com um mapa de produtividade.

Efetuuou-se uma aplicação a taxa fixa, de 200 kg/ha de adubo, em duas faixas. Os pontos 3 e 5 ficaram dentro desta repetição. Esta modalidade representa a aplicação convencional de adubo na maior parte das explorações agrícolas, muitas vezes realizada por “receita”, sem se ter conta do potencial produtivo e resposta vegetativa da cultura. Nos pontos 1 e 7, efetuou-se uma aplicação diferenciada, a 150 kg/ha, coincidindo em zona com índice NDVI -. Nos pontos 2 e 4, a aplicação foi na ordem dos 250 kg/ha, em locais de índice NDVI +. (tabela 8)

Embora, estes pontos sejam os únicos presentes na área de ensaio, realizou-se a análise também aos restantes onde se aplicou 150 kg/ha (pontos 6 e 9) e 200 kg/ha (pontos 8 e 10), servindo de complemento ao objetivo do estudo.

Tabela 8: Níveis de fertilização em cada ponto de amostragem, com o índice NDVI à data de escolha dos pontos e realização da carta, e valor de produtividade correspondente ao pixel da cada ponto, na carta de produtividade e no resultado das amostras recolhidas. As cores utilizadas na coluna “Taxa de aplicação” são referentes às mesmas utilizadas na carta de prescrição.

Ponto	CARTA DE PRODUTIVIDADE			AMOSTRAS RECOLHIDAS	
	NDVI (06/12/20)	NDVI (04/02/20)	Taxa de Aplicação (kg/ha)	Produtividade local (kg/ha)	Produtividade local (kg/ha)
1	0.54	0.75	150	5 413	6 324
2	0.60	0.78	250	7 771	5 076
3	0.63	0.78	200	6 538	6 480
4	0.64	0.78	250	5 386	6 684
5	0.55	0.76	200	3 770	3 672
6	0.52	0.78	150	3 874	4 596
7	0.52	0.73	150	3 786	5 484
8	0.59	0.75	200	5 152	4 872
9	0.62	0.78	150	4 307	7 476
10	0.52	0.73	200	2 619	3 744

Os resultados de produtividade apresentados na tabela 8, obtidos através da elaboração de uma carta de produtividade (figura 34) e da recolha de amostras no campo, relacionam-se favoravelmente, apenas havendo uma maior disparidade de valores no ponto 2 e 9, com variações percentuais entre valores de 53% e 74%, respetivamente, como evidencia o gráfico radar seguinte e apresenta a tabela 9.

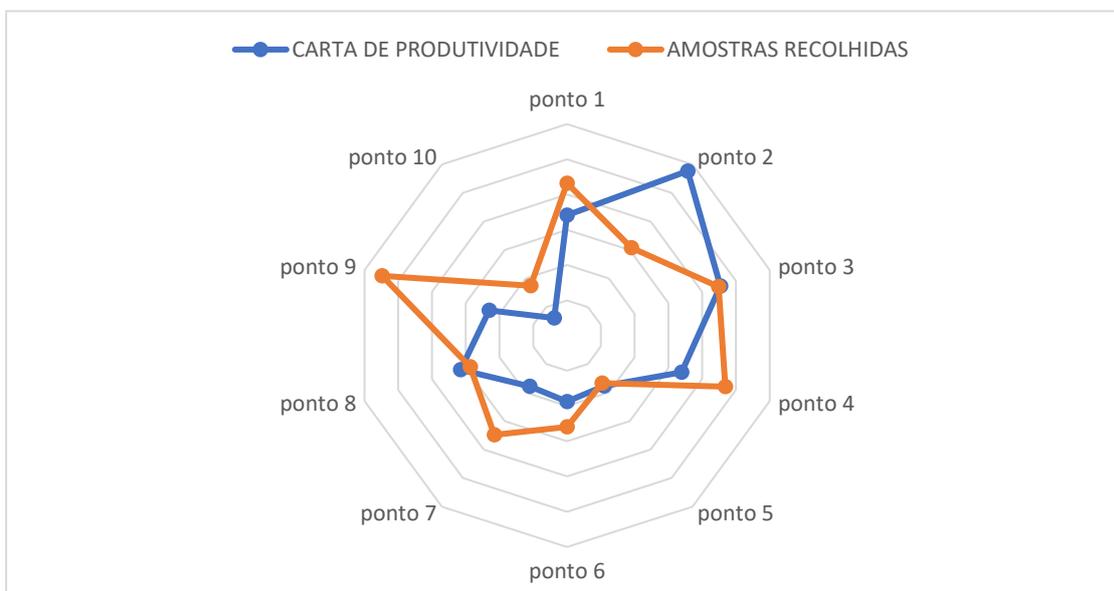


Gráfico 8: Método de comparação do tipo “radar” para evidenciar os outliers ou semelhanças entre os valores obtidos por carta de produtividade e recolha de dados no campo.

Tabela 9: Variação percentual entre as duas formas de obtenção de dados de produtividade. A negrito diferenças superiores a 50%.

Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variação Percentual (%)	17	53	1	24	3	19	45	6	74	43

Com a ajuda da tabela 10, que culminou numa análise de variância aos dados provenientes das amostras recolhidas, foi possível verificar que a zona em redor do ponto 4 apresentou resultados mais favoráveis, a todos os níveis: plantas/m², peso total das plantas e peso total dos grãos. O peso médio das plantas recolhidas/m² foi de 1564.8 g, e a produtividade foi de 6 684 kg/ha, obtido pelo método da proporcionalidade. Em produtividade, apenas o ponto 9 possuiu melhor resultado, com 7 476 kg/ha. Por oposto, o ponto 5 e o ponto 10 foram os que tiveram piores resultados em produtividade, obtendo-se 3 672 kg/ha e 3 744 kg/ha, respetivamente.

Tabela 10: Resultados obtidos através da colheita manual de plantas nos pontos de amostragem.

	Plantas/m ²	Peso total das plantas (g)	Peso total dos grãos (g)	Produtividade (kg/ha)
Ponto 1	532.8	1 350	579.6	5 796
	478.8	1 404	723.6	7 236
	435.6	1 216.8	594	5 940
Ponto 2	568.8	1 296	572.4	5 724
	475.2	1 065.6	493.2	4 932
	388.8	1 029.6	457.2	4 572
Ponto 3	435.6	1 382.4	615.6	6 156
	604.8	1 418.4	630	6 300
	522	1 540.8	698.4	6 984
Ponto 4	511.2	1 544.4	648	6 480
	514.8	1 407.6	547.2	5 472
	648	1 742.4	810	8 100
Ponto 5	392.4	482.4	169.2	1 692
	709.2	1 368	457.2	4 572
	446.4	1 130.4	475.2	4 752
Ponto 6	424.8	1 177.2	482.4	4 824
	475.2	1 152	432	4 320
	424.8	1 105.2	464.4	4 644
Ponto 7	392.4	1 180.8	493.2	4 932
	435.6	1 206	475.2	4 752
	421.2	1 360.8	676.8	6 768
Ponto 8	446.4	1 033.2	435.6	4 356
	522	1 260	518.4	5 184
	637.2	1 159.2	507.6	5 076
Ponto 9	518.4	1 515.6	784.8	7 848
	489.6	1 324.8	615.6	6 156
	558	1 677.6	842.4	8 424
Ponto 10	482.4	795.6	302.4	3 024
	597.6	975.6	342	3 420
	464.4	1 040.4	478.8	4 788

Elaborou-se também um gráfico de evolução temporal do índice NDVI (gráfico 9) de maneira a tentar compreender o comportamento da cultura nos pontos de amostragem ao longo dessas datas. Com a análise do gráfico, confirma-se a evolução positiva ao longo do tempo, desde a fase de afilhamento até ao emborrachamento, onde se verificou o maior crescimento vegetativo, correspondendo a maior capacidade fotossintética e aumento do teor de clorofila nas folhas.

O comportamento geral foi de aumento em todos os pontos, exceto no ponto 5, onde na fase de alongamento do colmo, o índice NDVI diminuiu, e no ponto 10, onde não houve variações. Este facto pode ser explicado devido à posição geográfica dos pontos na parcela, uma vez o ponto 10 que se encontra num local entre a zona de sequeiro e a zona onde o canhão do pivot 7 rega, sendo sempre a zona de bordadura, uma zona com pouca eficiência de rega, devido a eventuais variações na pressão na extremidade da rampa ou entupimentos. O ponto 10, por outro lado, fica na proximidade da estrada de acesso ao centro dos pivots. O intervalo temporal onde está evidente esta diminuição de NDVI (04 fevereiro a 10 março) também coincidiu num período mais quente e seco em relação aos valores normais. Pelo referido, estes pontos tomam-se como “outliers” e não serão tidos em conta para a análise final dos resultados de produtividade e resultados económicos.

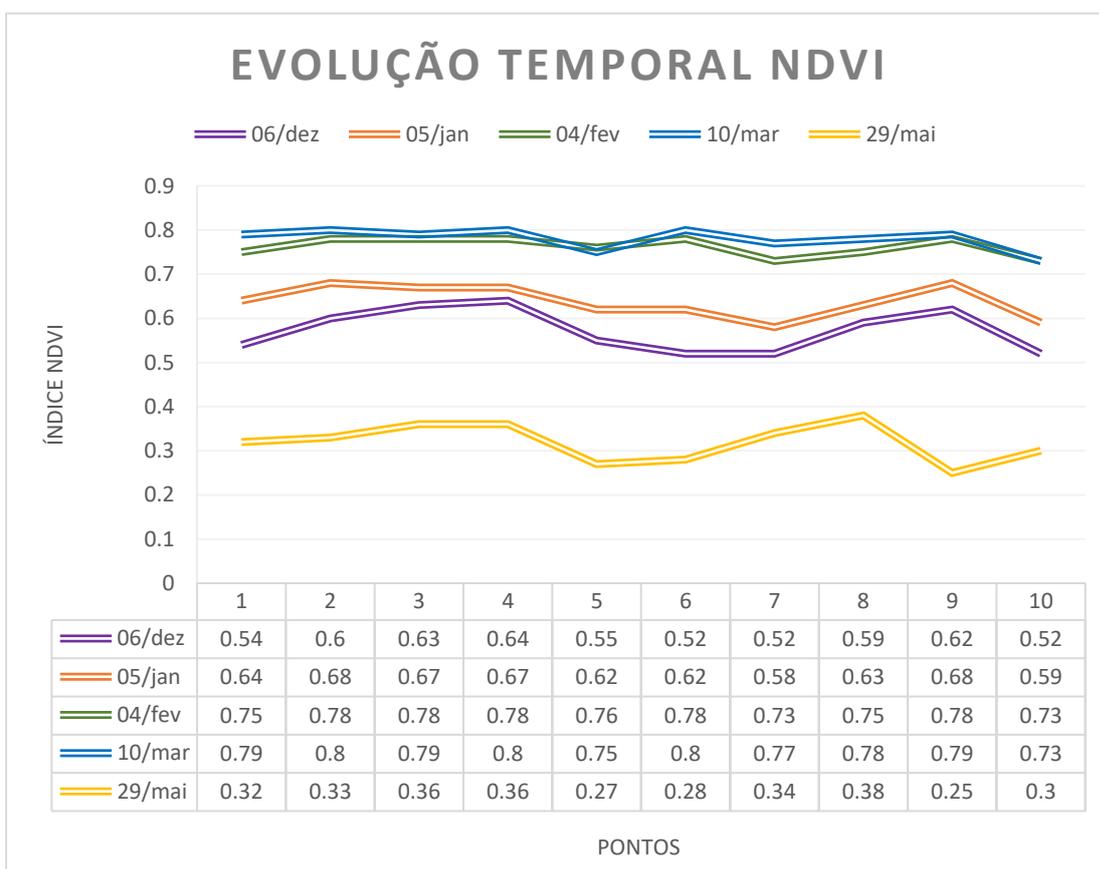


Gráfico 9: Gráfico de evolução temporal do índice NDVI nos pontos de amostragem.

Os pontos 2, 4 e 6 foram os que alcançaram o valor NDVI mais elevado (0.80), sendo que no ponto 6, foi onde se registou o maior aumento, de 0.52 para 0.80, até 10 de março, data da imagem onde os índices NDVI foram superiores. Inversamente, o ponto 4, apesar de na fase de afilhamento se apresentar com um valor NDVI alto em relação aos outros pontos, foi o que registou o menor aumento, de 0.64 para 0.80.

Na data de 29 de maio, é clara a diminuição generalizada do NDVI. No ponto 6, que registou o maior aumento até 10 de março, diminui muito o seu índice NDVI, de 0.80 para 0.28. A maior “queda” registou-se no ponto 9, de 0.79 para 0.25. Uma vez que os solos argilosos suportam o NDVI por mais tempo, e estando estes dois pontos localizados em zonas mais argilosas (figura 11), o fator solo não foi a causa deste maior decréscimo de NDVI, mas sim nutrição ou excesso de água devido à precipitação elevada de abril e maio. No início do desenvolvimento da cultura, este facto acontece de forma contrária, ou seja, os pontos localizados em solo mais argiloso revelam menor NDVI, possivelmente pela temperatura do solo ser mais baixa, condicionando as primeiras fases da cultura.

Inicialmente um dos pressupostos assentava na utilização do índice NDVI como base para identificar os níveis de azoto nas plantas, de forma a aumentar a produção. O gráfico seguinte (gráfico 10), faz uma relação entre o NDVI ao longo da evolução cultural e a produtividade final obtida com recurso a dados de produtividade fornecidos pela ceifeira.

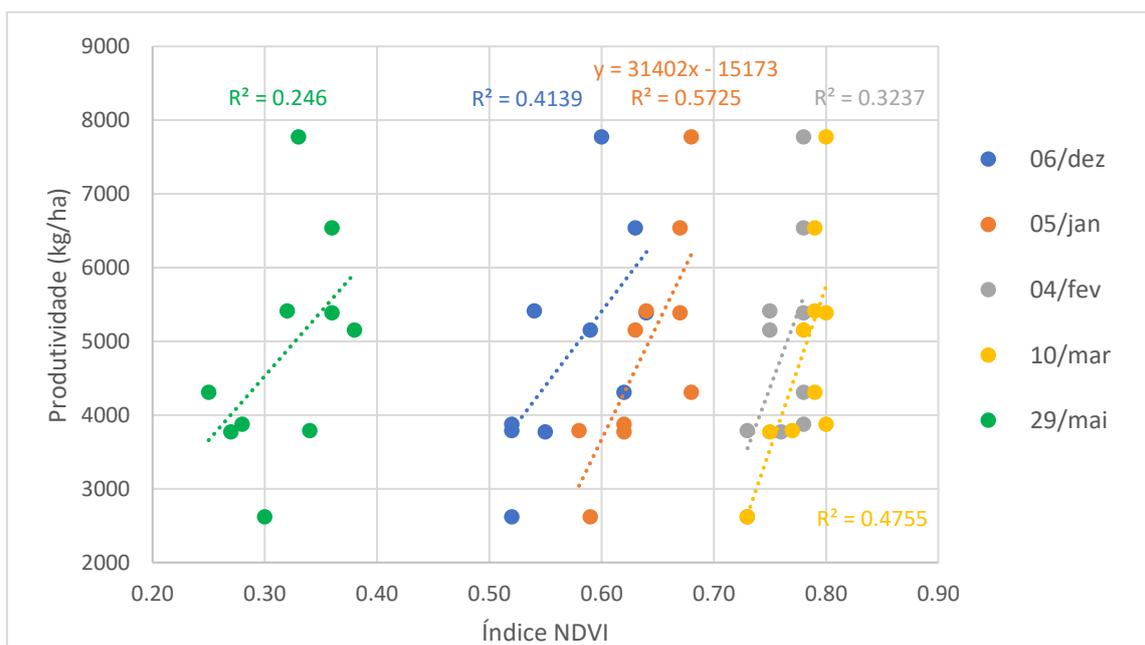


Gráfico 10: Relação NDVI x Produtividade (carta) ao longo do desenvolvimento vegetativo da cultura.

O gráfico evidencia que existe uma relação entre o NDVI e a produtividade final. A 5 de janeiro essa relação foi superior, ou seja, os pontos de amostragem tiveram uma produtividade final relacionada de forma linear com a variável NDVI ($R^2=0.5725$). Este modelo é estatisticamente significativo, com um valor de 0.011 de significância com uma confiança de 95% (quadro 9 – anexos). Concluiu-se assim que a fase de afilhamento, pela boa relação demonstrada, foi o melhor estágio fenológico para relacionar o NDVI com a

produtividade obtida pelo tratamento dos dados fornecidos pelo monitor de rendimento da ceifeira, que culminou numa carta de produtividade.

Da mesma forma, efetuou-se uma relação entre o NDVI ao longo da evolução cultural e a produtividade obtida através das amostras recolhidas manualmente.

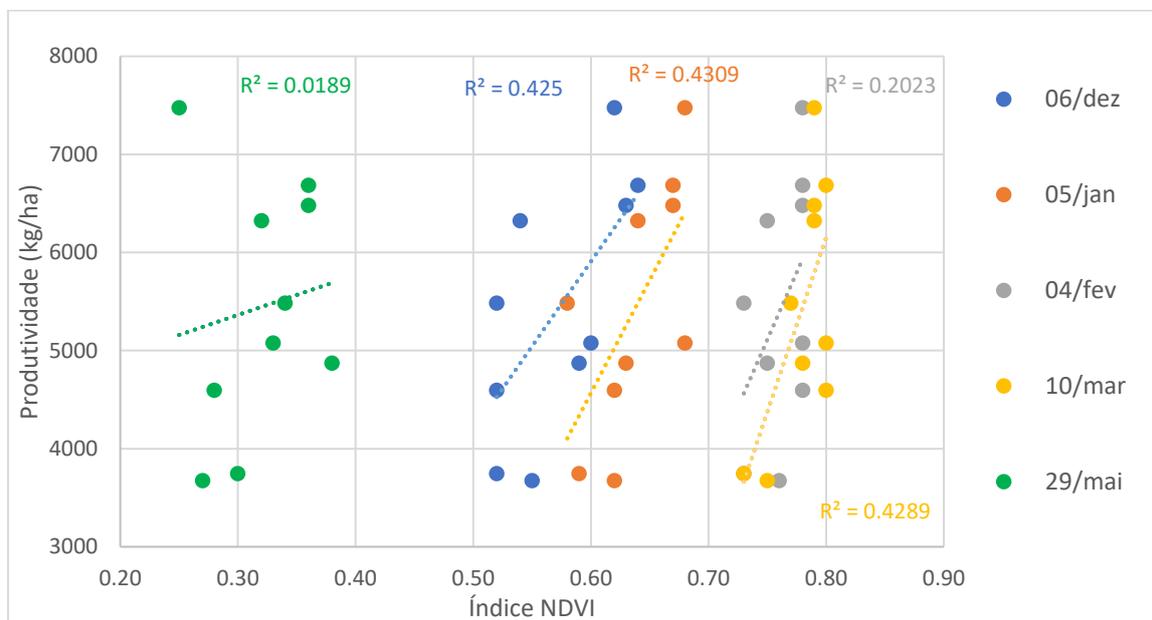


Gráfico 11: Relação NDVI x Produtividade (amostras) ao longo do desenvolvimento vegetativo da cultura.

Através do gráfico 11, é possível verificar que a relação do índice NDVI com a produtividade final obtida com recurso às amostras recolhidas, é semelhante nas datas de 6 de dezembro, 5 de janeiro e 10 de março. Os valores R^2 apesar de não serem elevados, representam um R^2 estatisticamente significativo, com um F de significância de 0.039 para a data de 5 de janeiro, com um nível de confiança de 95% (quadro 10 – anexos). Sendo assim apresenta fiabilidade utilizar o índice NDVI como ferramenta para estimar a produtividade final da cultura, ou pelo menos, estimar zonas melhores ou piores em termos de produção. Conclui-se igualmente que a fase de afilhamento é o melhor estágio fenológico para relacionar o NDVI com a produtividade.

A data de 4 de Fevereiro, tal como no gráfico 10, revela um R^2 inferior às restantes datas, excetuando “29/mai”, reforçado pelo valor de significância de 0.1921, representando um R^2 não significativo do ponto de vista estatístico, para uma confiança de 95%. Nesta fase a cultura encontrava-se no final do afilhamento, e contava já com uma fertilização de cobertura, podendo ter havido respostas espacialmente diferentes ou apenas tenha sido a saturação dos valores de índice NDVI que tenha provocado estas diferenças.

Em suma, o índice NDVI e o resultado de produtividade final, obtido pelos dados de produtividade georreferenciados fornecidos pelo monitor Ceres 8000i da ceifeira-debulhadora e pelas amostras recolhidas manualmente no campo, praticam uma relação estatisticamente significativa, na fase de afilhamento, evidenciada na data de 5/jan, ou seja, o índice NDVI pode ser utilizado para controlo e gestão do desenvolvimento da cultura proporcionando melhores resultados produtivos.

4.3.1 Análise à taxa de aplicação

Outra questão importante era tentar perceber se a fertilização variável obteve melhores resultados produtivos em relação à taxa fixa. O gráfico 12 apresenta uma comparação dos resultados com a produtividade obtida através do monitor de rendimento da ceifeira.

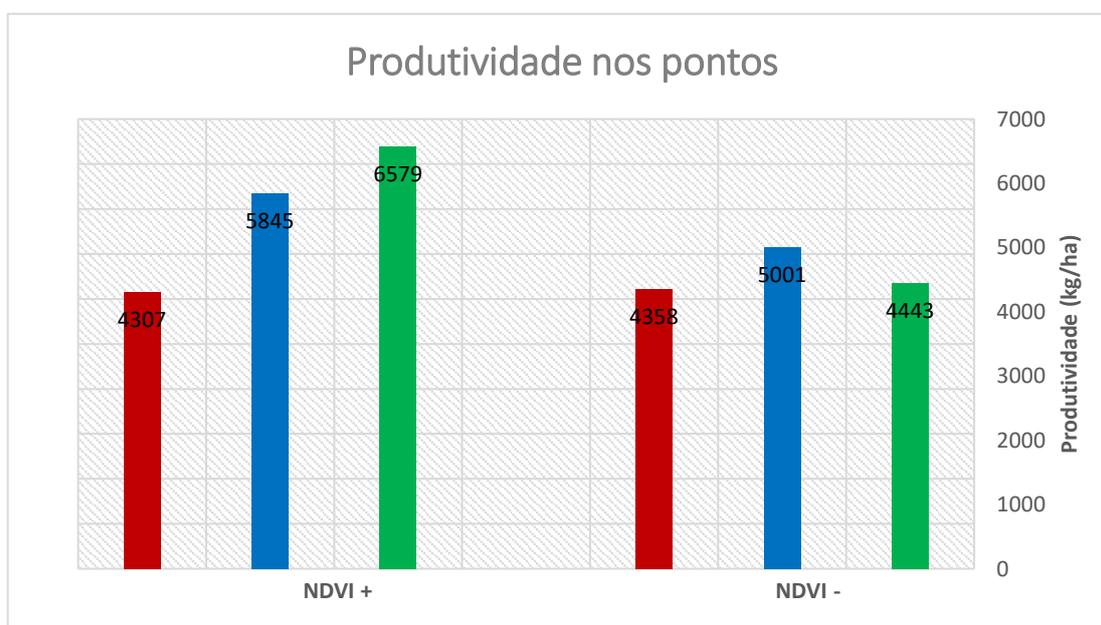


Gráfico 12: Relação entre a taxa de aplicação e a produtividade nos diferentes pontos de amostragem. A barra vermelha representa a aplicação a 150 kg/ha; a azul, a aplicação a 200 kg/ha; a verde, a aplicação a 250 kg/ha.

O gráfico apresenta a produtividade obtida nos **pontos** de amostragem expostos às diferentes taxas de aplicação, bem como às duas modalidades de teste, NDVI superior e NDVI inferior, à data de escolha dos pontos. Verifica-se assim o maior valor de produtividade médio na classe de “NDVI +”, com 6 579 kg/ha nos pontos afetados pela aplicação de 250 kg/ha de adubo azotado (pontos 2 e 4).

A aplicação a 200 kg/ha, registou na classe de “NDVI +”, uma produtividade média de 5 845 kg/ha (pontos 3 e 8), e a fertilização com 150 kg/ha, uma produtividade média de 4 307 kg/ha.

Relativamente à fertilização com 150 kg/ha, na classe de “NDVI -”, a produtividade média situou-se em 4 358 kg/ha (pontos 1 e 7). Na aplicação a 200 kg/ha, os pontos de amostragem afetados por essa taxa foram considerados *outliers* anteriormente, e posto isso, foram considerados dois pontos aleatórios que coincidiram em zonas de aplicação a 200 kg/ha, e que inicialmente tinham o seu índice NDVI inferior. Com recurso a esses pontos, obteve-se um valor de produtividade média de 5 001 kg/ha. Nas faixas de aplicação a 250 kg/ha não se encontrava nenhum ponto de amostragem, dado ao facto de estes terem sido definidos antes da elaboração da carta de prescrição. No mesmo sentido foram definidos também dois pontos aleatórios sob as condições estabelecidas (250 kg/ha – NDVI -). O resultado de produtividade foi de 4 443 kg/ha.

O valor de produtividade médio dos pontos de amostragem foi de 5 089 kg/ha, valor superior à produtividade média da parcela, que registou 4 780 kg/ha. O desvio padrão da variável de produtividade foi de 934 kg/ha, ou seja, representa que os dados de produtividade não foram uniformes, o que revela que houve um fator que influenciou a homogeneidade dos dados, neste caso os vários níveis de fertilização, embora o facto da existência de variabilidade de solo e condições climáticas, sejam um contributo de interferência nos resultados (quadro 11 – anexos).

Nota: O ponto 10, considerado *outlier*, estava localizado muito próximo da estrada de acesso ao centro dos pivots, onde o escoamento da água era mais difícil, acabando por se originar uma zona de encharcamento, o que explica o baixo resultado de produtividade no ponto, evidenciado pela figura 33.



Figura 33: Zona de encharcamento prolongado em redor do ponto 10.

Com a análise do gráfico 12 concluiu-se que o aumento da dose de fertilização aumentou a produtividade em zonas da parcela que registaram maior índice NDVI nas primeiras fases de desenvolvimento. Sendo assim, onde a cultura apresente melhor índice NDVI, refletindo maior potencial produtivo (Grohs *et al.*, 2009), a aplicação de uma maior dose de fertilizante conduzirá a melhores resultados produtivos.

A análise à carta de margem bruta das parcelas (figura 37) poderá ser uma ferramenta complementar para se conseguir uma analogia mais esclarecedora.

4.3.2 Análise da carta de produtividade

A carta de produtividade foi elaborada recorrendo ao software QuantumGis 3.4.5 através do método de interpolação IDW. Esta ferramenta cria uma noção mais alargada da produtividade em cada ponto do terreno, servindo também para comparar e servir de complemento de validação para os parâmetros produtivos obtidos através das diversas amostragens de plantas nos pontos (figura 34).

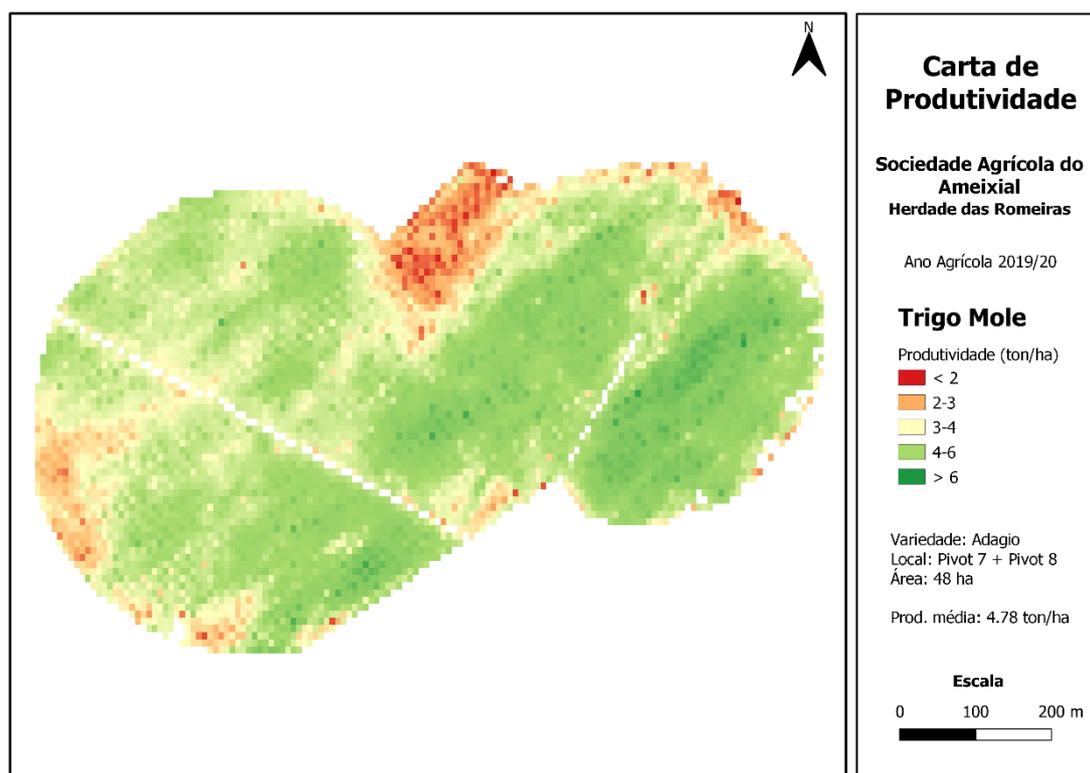


Figura 34: Carta de produtividade elaborada com os dados georeferenciados produzidos pelo monitor de rendimento da ceifeira-debulhadora.

Uma vez que o gráfico 10 evidenciou a existência de relação linear entre o índice NDVI e a produtividade final, com uma relação superior à data de 5 de janeiro, utilizou-se a equação dessa regressão ($y = 31402x - 15173$) para elaborar uma carta de

produtividade estimada (figura 35), com base no NDVI, e comparar com a carta de produtividade obtida através do monitor de rendimento da ceifeira. A variável y corresponde ao valor de produtividade e a variável x corresponde ao índice NDVI em cada ponto da parcela.

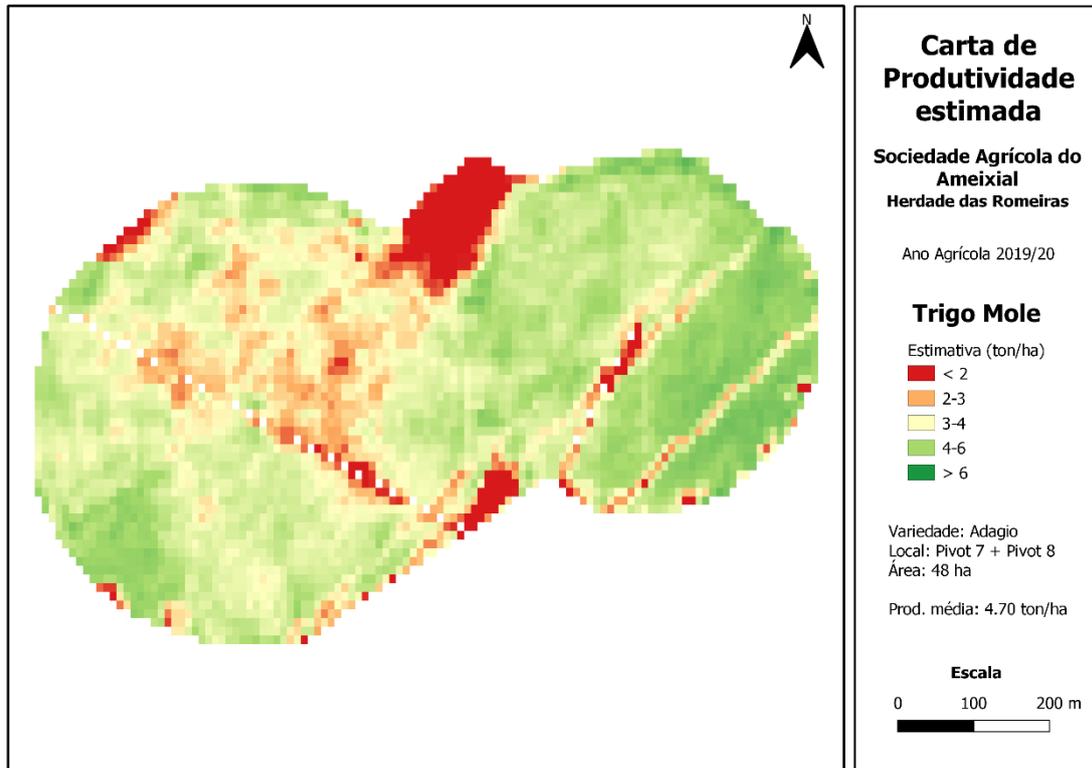


Figura 35: Carta de produtividade estimada, elaborada através da equação de regressão obtida pela relação entre o NDVI e a produtividade, na data de 05 de janeiro.

As semelhanças entre as cartas produzidas são evidentes, embora haja algumas zonas da parcela que à data de 05 de janeiro se encontravam por semear, bem como desenvolvimento menos vigoroso, que deturpou negativamente a produtividade estimada. As superfícies em sequeiro, bem visíveis a vermelho, por possuírem pontos com índice NDVI inferior, resultaram em produtividades com valor negativo. A figura 36, resulta da subtração entres os valores de produtividade de cada pixel entre a carta de produtividade e a carta de produtividade estimada, sendo uma forma de evidenciar as diferenças por excesso ou defeito entre as cartas.

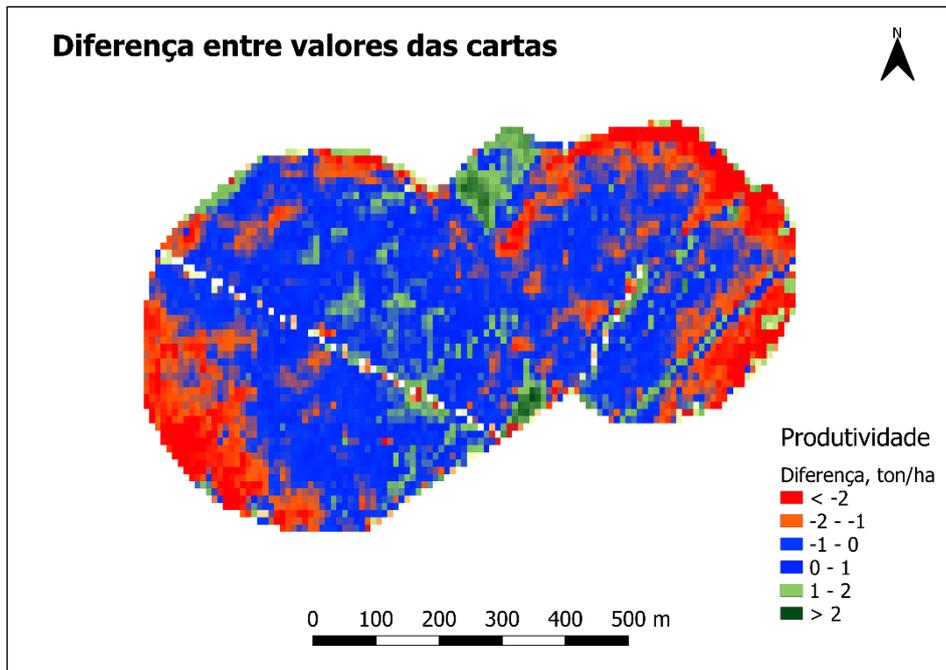


Figura 36: Subtração dos valores dos pixels entre a carta de produtividade e a carta de produtividade estimada.

As diferenças, em maior parte situam-se entre 1 tonelada ha^{-1} , seja por defeito ou excesso, o que indica que a carta de produtividade estimada não se afastou muito dos valores obtidos. As maiores discrepâncias situam-se nas superfícies em sequeiro e na bordadura das parcelas, influenciada por valores de índice NDVI mais altos, mascarados pela existência de sobreiros, e também pelo registo climático dos meses de primavera, que influenciaram o potencial produtivo da cultura.

De qualquer forma, apresenta-se como uma excelente ferramenta para estimar, numa fase precoce, a produtividade final, isto se for garantida uma fertilização que preencha as necessidades da cultura para um certo objetivo de rendimento.

▪ **Análise geral**

Após a colheita, a elaboração e análise da carta de produtividade das parcelas em estudo, mostrou que a produção foi heterogénea, sendo que o pivot 7 apresentou melhores resultados em relação ao pivot 8. A superfície em sequeiro, como era esperado, apresentou produtividades mais baixas, num intervalo entre 1 e 3 ton/ha. No pivot 8, da zona sul a oeste, são evidentes manchas pouco produtivas, explicadas pela presença de infestantes, com grande domínio de *Lolium spp.*, bem como o efeito que a estrada de acesso ao centro dos pivots possui na drenagem externa da água.

A primavera quente e chuvosa, principalmente no mês de abril, contribuiu em muito para a quebra na produção final da cultura, afetando a fase reprodutiva do trigo, e comprometendo a fase de enchimento do grão, especialmente no pivot 8, uma parcela com predomínio de solo com textura argilosa, horizonte B argílico, com a presença de valores de condutividade elétrica altos, na ordem dos 30 a 50 mS/m, havendo mesmo registro de valores superiores a 90 mS/m (figura 11). O solo desta parcela, apesar de possuir um armazenamento de água superior, favorável em anos onde a precipitação é mais escassa, acaba por ter uma capacidade de infiltração mais reduzida, levando a fenômenos de encharcamento. A primavera levou a isso, havendo precipitação regular e intensa, superando a capacidade diária de infiltração do solo.

A superfície do pivot 7, dominada por solo do tipo Pag (figura 10), caracterizado por textura arenosa a franco-arenosa nas primeiras camadas, e correlacionando com baixa condutividade elétrica aparente do solo (figura 11), apresentou uma produtividade mais uniforme, com valores médios de 6 ton/ha. Esta parcela, registou uma emergência mais heterogênea em relação ao pivot 8, e sofreu menos com as condições climáticas da campanha, uma vez que a drenagem interna do solo é superior, garantindo às plantas maior disponibilidade de oxigênio, e conseqüente capacidade fotossintética com vista à produção de fotoassimilados para o grão. A produtividade dos pontos presentes no pivot 8 pode ter sido assim, afetada negativamente pelo excesso de água no solo, uma vez que antes da precipitação ocorrida na primavera o solo já apresentava uma boa reserva hídrica derivado às regas efetuadas.

Uma vez que o índice NDVI foi utilizado ao longo de todo o trabalho como base para as decisões de fertilização, retiraram-se 20 pontos aleatórios nas zonas menos produtivas e outros 20 pontos nas zonas mais produtivas e relacionou-se o valor de produtividade nesses pontos com o índice NDVI a 5 de janeiro, data onde se obtiveram melhores correlações nos gráficos 10 e 11. Essa relação é expressa no gráfico seguinte:

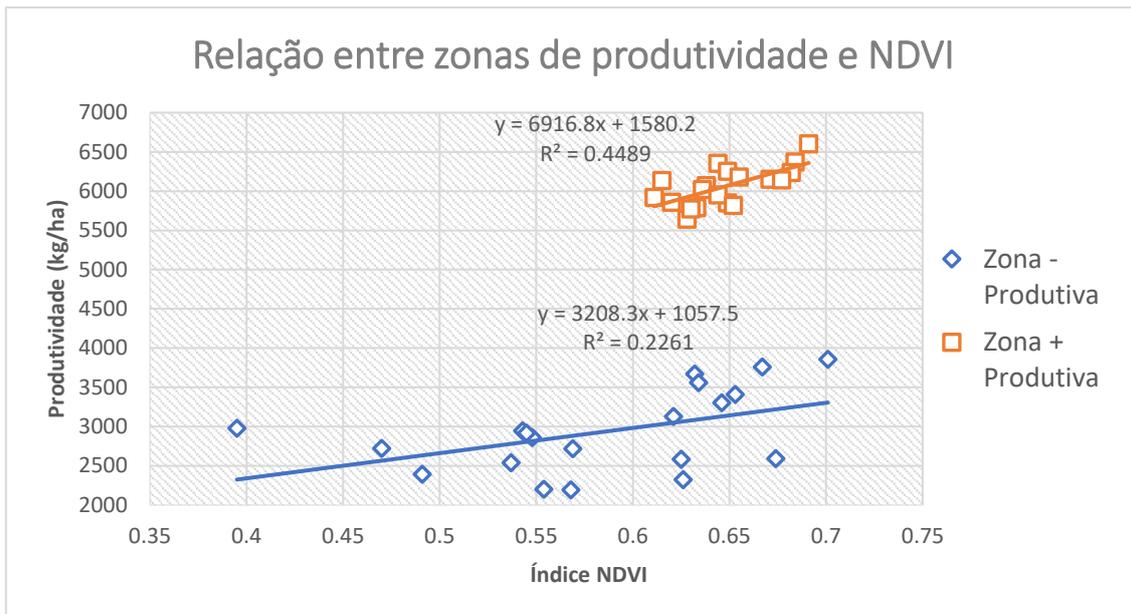


Gráfico 13: Relação linear entre os valores de produção em zonas mais e menos produtivas com o valor de NDVI a 5 de janeiro.

Com a análise do gráfico sai reforçada tendência de existência de uma relação linear entre o índice NDVI e a produtividade final. Nos pontos retirados em zonas de fraca produção, registou-se um $R^2=0.2261$, que indica uma relação estatisticamente significativa, com uma significância de 0.034 para um nível de confiança de 95%. Nas zonas de maior produção, o R^2 foi superior, de 0.04489, apresentando um valor elevado de significância, de 0.0017, com uma confiança de 95% (quadro 12 e 13 – anexos).

Conclui-se assim que produtividade final está intimamente relacionada com o índice NDVI. Melhores valores produtivos revelaram uma melhor correlação com o índice de vegetação em comparação com pontos de fraca produtividade. Para efeitos práticos, isto quer dizer que o índice NDVI apresenta mais fiabilidade para estimar melhores resultados produtivos do que o contrário. Nas zonas menos produtivas, a existência de pontos com índice NDVI mais alto pode ser explicado com a presença de infestantes como os *Lolium spp.* ou plantas de girassol, que resistiram à ação dos herbicidas aplicados.

Fazendo uma análise mais específica à carta de produtividade, nomeadamente às **zonas** com diferentes taxas de aplicação, elaborou-se o gráfico 14. Verifica-se assim que as zonas de aplicação com 250 kg/ha são as que originam melhor produtividade média, com 4.95 ton/ha nas zonas com “NDVI +” e 4.72 ton/ha nas zonas onde a cultura se encontrava com menor vigor, “NDVI -”.

As zonas de aplicação com 150 kg/ha produziram melhores resultados nas zonas com “NDVI +”, com 4.74 ton/ha, sendo uma diferença muito pouco significativa face às zonas com “NDVI –” onde se registou 4.56 ton/ha. Relativamente à aplicação com taxa a 200 kg/ha, os resultados também se mostraram muito semelhantes, sendo que nas zonas piores “NDVI –” obteve-se 4.71 ton/ha, e nas zonas melhores “NDVI +”, 4.58 ton/ha.

Ou seja, é verificada uma tendência de aumento da produção face ao aumento da quantidade de adubo aplicada por hectare, tal como se verificou no gráfico 12, onde na classe “NDVI+”, é evidente o aumento proporcional da produtividade obtida com o aumento da dose de aplicação, mas analisando por zona, a aplicação com 200 kg/ha não seguiu esse aumento.

As áreas de menor índice NDVI, resultaram em piores resultados produtivos nas zonas de aplicação a taxa variável, face às áreas de maior NDVI, embora a aplicação a 200 kg/ha em zonas “NDVI –” obtiveram melhores resultados face a zonas com “NDVI+”. De realçar que esta zona de aplicação foi a que ocupou maior área do ensaio.

A relação da produtividade com o aumento da dose de aplicação é muito ténue, podendo ter sido afetada pelo ano húmido em questão, tendo influenciado a disponibilidade de N para as plantas, acontecido fenómenos de lixiviação ou perdas de N, por desnitrificação, devido ao excesso prolongado de água no solo.

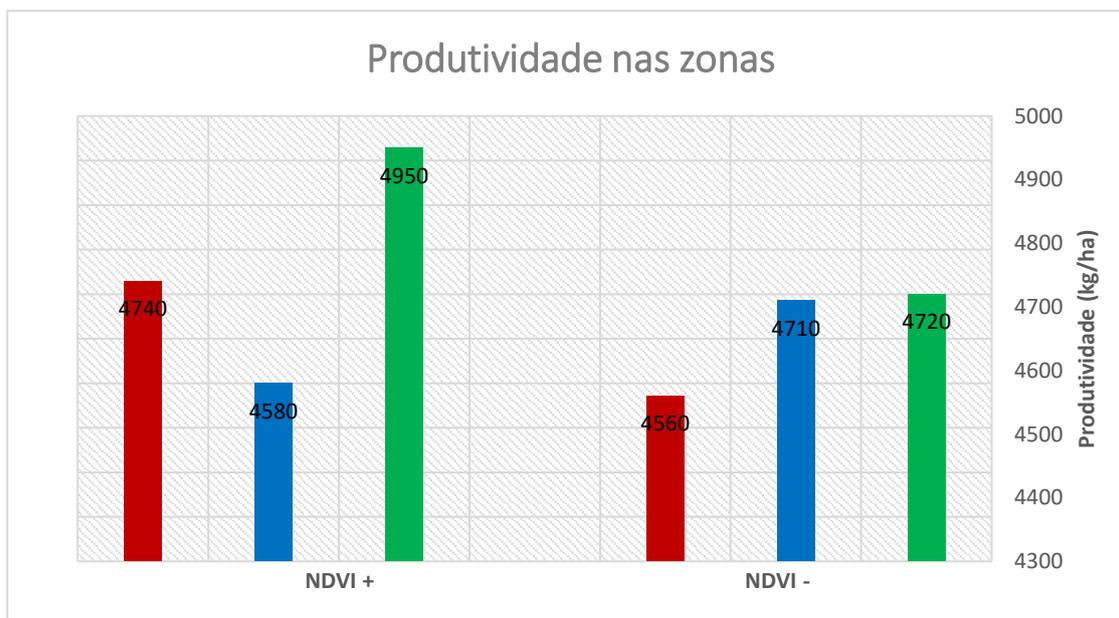


Gráfico 14: Relação entre a taxa de aplicação e a produtividade nas diferentes zonas de aplicação. A barra vermelha representa a aplicação a 150 kg/ha; a azul, a aplicação a 200 kg/ha; a verde, a aplicação a 250 kg/ha.

4.4 Análise económica

No aspeto económico, elaborou-se uma carta de margem bruta da zona do ensaio (figura 37), que consiste na diferença entre as receitas e os custos de produção das diversas intervenções e operações nas parcelas, sendo uma forma de medir a rentabilidade da cultura, não contabilizando os apoios à produção (quadro 14 – anexos). Como complemento aos gráficos 12 e 14, este mapa relaciona a quantidade de adubo aplicado, de forma variável, com a produtividade final.

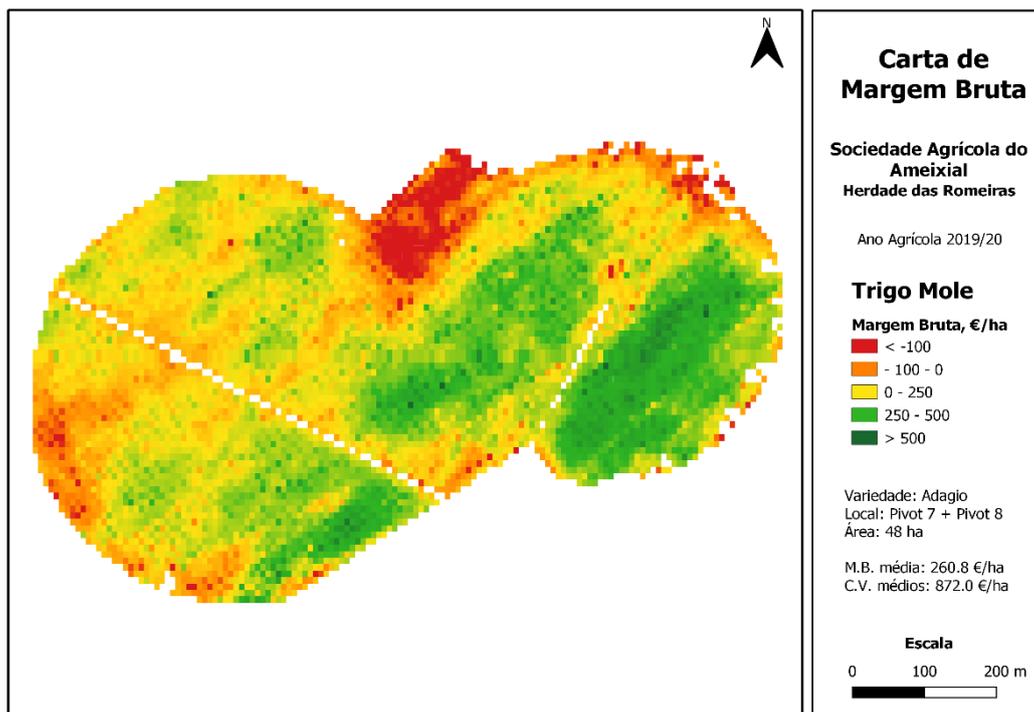


Figura 37: Carta de margem bruta (€/ha) da zona de estudo.

Na amostragem, obteve-se o maior valor de margem bruta média na classe de “NDVI +”, com 518 €/ha nos pontos afetados pela aplicação de 250 kg/ha de adubo azotado (pontos 2 e 4). A aplicação a 200 kg/ha, registou na classe de “NDVI +”, uma margem bruta média de 379 kg/ha (pontos 3 e 8), e a fertilização com 150 kg/ha, uma produtividade média de 283 kg/ha (ponto 9).

Relativamente à fertilização com 150 kg/ha, na classe de “NDVI -”, a margem bruta média foi de 382 €/ha (pontos 1 e 7). Na aplicação a 200 e 250 kg/ha, os pontos de amostragem afetados por essa taxa foram considerados *outliers* anteriormente, sendo utilizados os mesmos pontos do gráfico 12. Através desses pontos, obteve-se um valor de margem bruta média de 190 €/ha para os 200 kg/ha e nas faixas de aplicação a 250 kg/ha o resultado foi de 328 €/ha (gráfico 15).

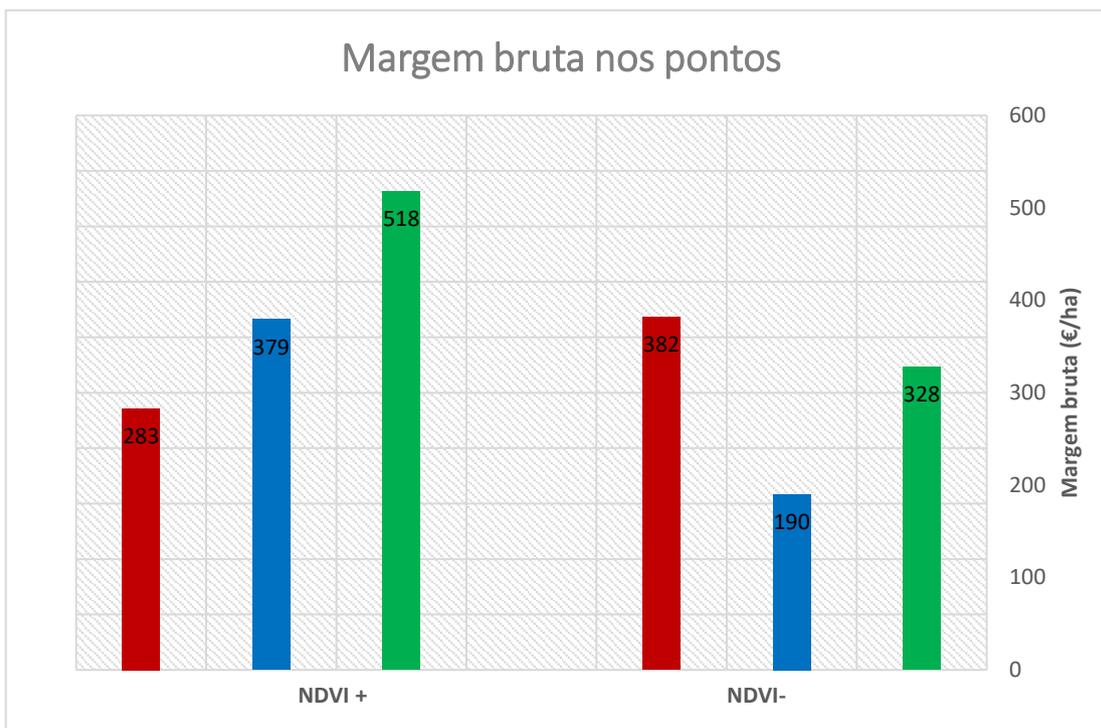


Gráfico 15: Relação entre a taxa de aplicação e a margem bruta média nos diferentes pontos de amostragem. A barra vermelha representa a aplicação a 150 kg/ha; a azul, a aplicação a 200 kg/ha; a verde, a aplicação a 250 kg/ha

Apesar dos resultados serem positivos, houve zonas com margem bruta negativa, na zona em sequeiro, bordadura da parcela, zonas em redor das estradas de acesso ao centro dos pivots e destruição de plantas devido a javalis. De salientar que na zona de aplicação a 200 kg/ha, com “NDVI –”, a margem bruta é significativamente menor, estando intimamente ligado ao facto da maior parte desta faixa de aplicação possuir uma zona não regada, o que influencia a produtividade, e consequentemente a margem bruta, mas também por ser a maior área de aplicação.

O valor de margem bruta média dos pontos de amostragem foi de 346.7 €/ha, valor superior à margem bruta média da parcela, que registou 260.8 €/ha. O desvio padrão da variável de margem bruta foi de 110 €/ha, ou seja, representa que os dados não foram uniformes, tal como aconteceu na análise à produtividade (quadro 15 – anexos)

Conclui-se que produtividade está diretamente ligada ao retorno monetário, embora não seja uma relação totalmente linear, como se comprovou pela aplicação a 200 kg/ha. Para tal, o esforço da investigação deverá procurar não só produtividades elevadas como também bons retornos económicos como consequência de uma maior eficácia e equilíbrio do sistema produtivo, tendo em conta as suas limitações.

Se a avaliação for feita por zonas de aplicação, a interpretação dos resultados é outra. O valor de desvio padrão entre a margem bruta média das zonas de aplicação é de 35 €/ha, ou seja, os dados são mais homogêneos face à utilização de toda a área afetada por cada nível de fertilização diferente. Os melhores resultados são conseguidos com a aplicação a 250 kg/ha, tal como nos pontos de amostragem, mas as diferenças são muito pequenas para utilizar essa interpretação como modelo. Com a classe de “NDVI +” e aplicação a 200 kg/ha regista-se a maior diferença entre valores, muito devido à presença de uma superfície não regada, como já foi referido anteriormente.

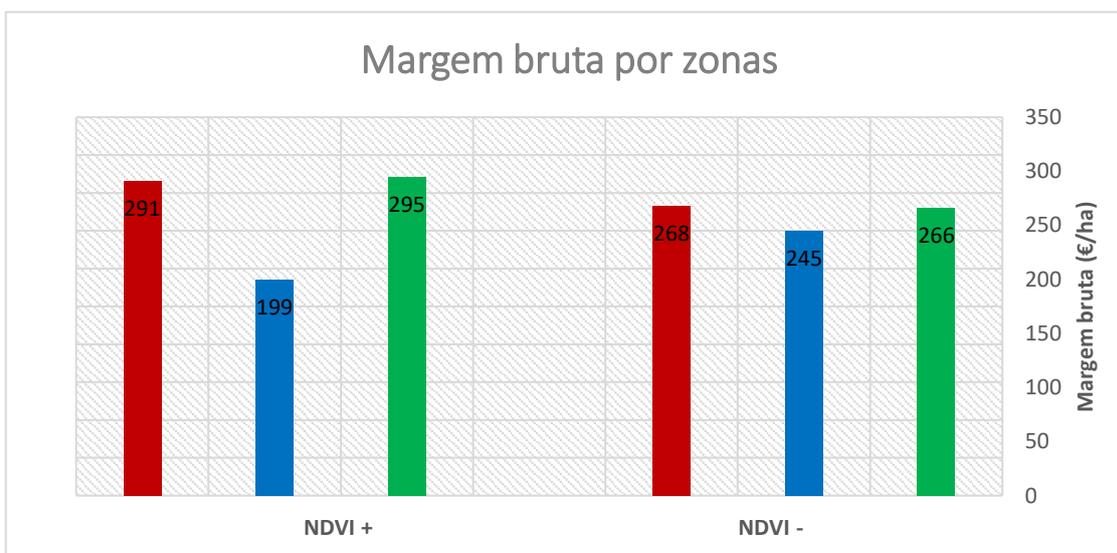


Gráfico 16: Relação entre a taxa de aplicação e a margem bruta média nos diferentes pontos de amostragem. A barra vermelha representa a aplicação a 150 kg/ha; a azul, 200 kg/ha; a verde, 250 kg/ha.

Com os resultados por zonas (gráfico 16), verifica-se que em “manchas” idênticas, onde o comportamento vegetativo é semelhante, a variação na dose de fertilizante, acaba por não surtir um grande resultado na margem bruta, uma vez que as três doses de aplicação testadas não apresentaram diferenças significativas. Sendo assim, talvez se torne mais vantajoso aplicar uma quantidade menor, reduzindo custos com a quantidade de fatores de produção. Neste caso seria melhor fertilizar com 150 kg/ha pois o impacto ambiental é menor.

Uma das hipóteses que a gestão diferenciada segue: aplicar mais em zonas melhores (NDVI +) e menos em zonas piores (NDVI -), apostando no potencial produtivo da cultura, gastando menos recursos onde não se espera tirar grande retorno, neste trabalho é comprovada com a aplicação a taxa variável, em termos de produtividade e margem bruta, embora este indicador económico revele que utilizando uma menor dose, consegue-se obter resultados económicos muito semelhantes a uma aplicação com maior dose de fertilizante.

5. Conclusões

Com a elaboração deste trabalho pretendeu-se avaliar o comportamento e resposta da cultura de trigo mole, sujeita à utilização da tecnologia VRT em situação de fertilização de cobertura.

Atualmente o paradigma da agricultura apresenta um novo conjunto de ferramentas que antigamente não estavam disponíveis: sensores de diferentes tipos, imagens de satélites que dão uma ideia das performances das culturas em cada zona da parcela de terreno, e a possibilidade de ajustar a gestão de cada uma delas. O grande desafio para os agricultores é a utilização destes sistemas na integração da tomada de decisão. O novo salto tecnológico é a digitalização, mas que para muitos agricultores portugueses significará uma transição difícil, uma vez que é um grupo de idade avançada e apresenta muita relutância na confiança a sistemas informáticos aquilo a que o olhar e a experiência sempre controlaram.

Este trabalho despertou-me esse obstáculo, pois nem todos integram este novo “mundo” da agricultura, onde se iniciam já algumas das principais explorações portuguesas, nos cereais, vinha e olival. Mas o caminho a seguir é este, agricultura de precisão, onde o digital deixa de ser algo apenas dos urbanos e de quem trabalha num escritório, mas também de quem está no campo, contribuindo para produções mais rentáveis e sustentáveis.

A parcela que serviu de ensaio para esta dissertação está inserida numa exploração agrícola, situada no centro alentejano, região onde se verifica o pouco uso da consciencialização da agricultura de precisão bem como a de fertilização a taxa variável. O ensaio enquadrado nesta dissertação permitiu retirar algumas conclusões da utilidade do índice de vegetação NDVI para a gestão e controlo do desenvolvimento da cultura, bem como a resposta espacial da cultura à fertilização diferenciada.

Foi possível concluir através do tratamento dos dados das várias medições no campo que o número de plantas não seguiu o índice NDVI à emergência e início de afilamento, sendo uma ferramenta dispensável para a análise cultural nestas fases. Por outro lado, pode-se relacionar a altura média de plantas com o índice NDVI, o que evidencia que a interpretação das imagens de satélite tem de ser direcionada ao vigor vegetativo das plantas e não à densidade.

No que diz respeito aos valores de produtividade obtidos, tanto pelo tratamento dos dados georreferenciados fornecidos pelo monitor da ceifeira – debulhadora como dos valores conseguidos pela debulha manual de amostras recolhidas nos diversos pontos de amostragem, verificou-se uma relação razoável, o que indica que as amostras foram úteis na validação de campo da produtividade.

A relação do índice NDVI com a produtividade verificou-se, o que indica que podemos utilizá-lo como ferramenta de apoio para a tomada de decisão de regas, fertilizações, tratamentos fitossanitários, entre outros, uma vez que estão intimamente relacionados.

Na matéria da fertilização, foi possível apurar que o aumento da dose de fertilizante aumentou a produtividade em zonas da parcela que registaram maior índice NDVI nas primeiras fases de desenvolvimento. Assim, as zonas com maior potencial, à data das primeiras fertilizações de cobertura, resultaram em zonas mais produtivas.

Em termos de margem bruta, verificou-se que em zonas de comportamento vegetativo semelhante (NDVI+ ou NDVI-), a variação na dose de fertilizante, acaba por tomar valores muito idênticos, o que leva a concluir que a aplicação de quantidades menores de adubo ha⁻¹, reduzindo custos, acaba por ser a situação mais rentável, neste caso.

Com base neste ensaio há evidências das vantagens na utilização da tecnologia VRT, na aplicação de fertilizantes ao longo do ciclo da cultura de trigo mole face a uma taxa fixa. O índice NDVI também se revelou com grande utilidade agronómica para a compreensão e auxílio das decisões a tomar durante os vários estados da cultura. Os resultados não foram os mais ambicionados, talvez muito pelo registo climático do ano em questão, mas com este trabalho sai reforçada a ideia de uma agricultura mais tecnológica, bem mais exigente do ponto de vista técnico, com a disposição de variadas ferramentas, alterando os planos agronómicos.

Perante este cenário, a agricultura de precisão, surge não só como um importante fator competitivo, mas também como um fator de sustentabilidade, tornando-se mais eficiente, poupando recursos e maximizando resultados, um fator determinante para o aumento de produtividade e de capacidade competitiva em termos de produção agrícola.

Referências bibliográficas.

- Alpendre, P. (2018). Comunicação pessoal, aula de Fertilidade do Solo e Fertilização.
- Basso, B., Fiorentino, Costanza, Cammarano, D. e Schulthess, Urs. (2015). Variable rate nitrogen fertilizer response in wheat using remote sensing. *Precision Agriculture*, 17: p.168-182.
- Bellido, L. L. (2010). Guía Práctica de la Fertilización Racional de los Cultivos en España. *Parte II – Abonado de los principales cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, p.123-133.
- Berntsen, J.; Thomsen, A.; Schelde, K.; Hansen, O.M.; Knudsen, K.; Broge, N.; Hougaard, H. & Horfarter, R. (2006). Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. *Prec. Agric.*, 7: p.65-83.
- Boletins Climatológicos Mensais – IPMA, retirado de <http://www.ipma.pt/pt/publicacoes/boletins.jsp?cmbDep=cli&cmbTema=pcl&idDep=cli&idTema=pcl&curAno=-1>, em 21-09-2020.
- Braga, R. (2018). Detecção remota para a monitorização das culturas. *Agrobótica*, retirado de <http://www.agrotec.pt/noticias/detecao-remota-para-a-monitorizacao-das-culturas/>, em 05-03-2020.
- Braz, A. M.; Águas, T. A.; Garcia, P. H. M. Análise de índices de vegetação NDVI e SAVI e Índice de Área Folear (IAF) para a comparação da cobertura vegetal na bacia hidrográfica do córrego Ribeirãozinho, município de Selvíria – MS. *Revista Percurso – Nemo*, v. 7, n.2, p. 05- 22, Maringá, 2015.
- Cardoso, J.V.J. de Carvalho. (1965). Os solos de Portugal – Sua Classificação e Génese (I- a Sul do Tejo). Direção Geral dos Serviços Agrícolas de Lisboa.
- Chai, X., Zhang, T., Shao, Y., Gong, H., Liu, L. e Xie, K. (2015). Modeling and mapping soil moisture of plateau pasture using RADARSAT-2 imagery. *Remote Sensing*, vol. 7, n. 2, p.1279–1299.

- Coelho, J. P. e Silva, J.R. (2009). *Inovação e Tecnologia na Formação Agrícola – Agricultura de Precisão*. Lisboa: AJAP.
- Diniz, E. (2016). Equilíbrio da balança alimentar – fator sustentabilidade da economia nacional. O caso dos cereais. Apresentação em Power Point, GPP.
- Divito, Guillermo, Correndo, Adrián & García, Fernando. (2017). *Manual del Cultivo de Trigo*. Argentina: Instituto Internacional de Nutrición de Plantas.
- FAO. (2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Obtido a 20 de Agosto de 2018, de Food and Agriculture Organization of the United Nations Agriculture and Consumer Protection Department Conservation Agriculture. Disponível em: <http://www.fao.org>.
- 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.
- Grohs, D.S. *et al.* (2009). Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. Engenharia Agrícola, vol.29, n.1, p.101-112.
- *Índices de vegetação – Horus Aeronaves* [ebook]. Florianópolis: 2016. [Consultado 17 de setembro 2020]. Disponível em <https://horusaeronaves.com/ebook/ebook-indices-de-vegeta%C3%A7%C3%A3o.pdf>
- INIAP. (2006), Manual de Fertilização das Culturas, INIAP – Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva, Lisboa.
- Lira, V. M.; Silva, B. B.; Neto, J. D.; Azevedo, C. A. V.; Euler Soares Franco, e. S. Variação Sazonal da Cobertura Vegetal em áreas do submédio São Francisco a partir de dados NDVI e imagens TM-Landsat 5. Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer, v. 33, n.12, p.1-9, 2011.
- Liu, L.; Wang, J.; Bao, Y.; Huang, W.; Ma, Z.; Zhao, C. (2006). Predicting winter wheat condition, grain yield and protein content using multi-temporal EnviSat-ASAR and Landsat TM satellite images. Int. J. Remote Sens, 27, p.737–753

- Sousa, A. M. O. e Silva, J. R. M. (2017). Fundamentos Teóricos de Detecção Remota, Dep. Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, 57p.
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, v.17, n.7, p.1425-1432.
- Normal Climatológica de Évora – 1981/2010, retirado de <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1981-2010/>, em 17-04-2020.
- Palha, J. (2019). A produção de cereais em Portugal, que futuro?, retirado de <https://www.agroportal.pt/a-producao-de-cereais-em-portugal-que-futuro-jose-palha/>, em 08-03-2020.
- Patanita, M. e Bellido L. L. (2007). Efeito da fertilização azotada na produção e na qualidade do grão de cevada para malte em condições mediterrânicas de regadio. *Revista de Ciências Agrárias*, v.30, n.1, p.122-134.
- Pettorelli N, Vik JO, Mysterud A, Gaillard J-M, Tucker CJ, Stenseth NC (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends Ecol Evol* 20:p.503–510
- Pinheiro, N. (2014). 4ª Formação Técnica para a Produção de Cereais de Outono-Inverno – 2019/2020. ANPOC, INIAV, IP-BEJA.
- Pires, J. L. F.; Corassa, G. M.; Rambo, A. C.; Kerber, L.; Pasinato, A.; Dalmago, G. A.; Silva Junior, J. P. da; Santi, A.; Santi, A. L.; Guarenti, E. M.; Cunha, G. R. da; Strieder, M. L.; Fochesatto, E. (2014). Aplicação de nitrogênio a taxa variável em cultura de trigo: estudo de caso na Unidade Piloto de Agricultura de Precisão de Não-Me-Toque, RS. Embrapa.
- Raun,W.R.; Solie, J.B.; Johnson, G.V.; Stone, M.L.; Mullen, R.W.; Freeman, K.W.; Thomason,W.E.; Lukina, E.V. (2002). Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron. J.*, 94, p.815–820.

- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation (Greenwave effect) of Natural Vegetation; Type III, Final Report.
- Sultana, S. R., Ahmad, A., Wajid, A., e Akhtar, J., (2013). Estimating growth and yield related traits of wheat genotypes under variable nitrogen application in semi-arid conditions,” *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, vol. 11, no. 2, p.118–125.
- Scheeren, P. L., Castro, R. L. e Caierão, E. (2015). *Trigo: do plantio à colheita. Botânica, Morfologia e Descrição Fenotípica*. Brasil: Embrapa.
- Shahrokhnia, Hossein, Ahmadi, S.H. (2019). Remotely Sensed Spatial and Temporal Variations of Vegetation Indices Subjected to Rainfall Amount and Distribution Properties. Irão.
- Slafer, G.A. e Rawson, H.M. (1994). Sensitivity of wheat phasic development to Major environmental factors: A re-examination of some assumptions made by physiologists and modelers. *Aust. J. of Plant Physio.*, 21: p.393-426.
- Verbyla, D. (1995). *Satellite Remote Sensing of Natural Resources*. Nova Iorque, Londres: CRC Press Inc.
- Vizzari, M. *et al.* 2019. Sentinel 2-Based Nitrogen VRT Fertilization in Wheat: Comparison between Traditional and Simple Precision Practices. *Agronomy-Basel*, 9(6): p.278.
- Walker. G.K., Blacksaw, R.E., Dekker, J. (1988). Leafarea and competition for light between plant species using direct sunlight transmission. *Weed Technology*. Champaign, vol. 2, n. 2, p. 159-165.
- Zadoks, J. C., Chang, T. T. e Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the Growth stages of cereals. *Weed Res.*, 14: p.415-421.

Anexos

Identificação da amostra: T20 - P7/8/9			
Proprietário da amostra: Soc. Agrícola do Ameixial, S.A.			
Morada: Estremoz			
Data de análise: 11/12/2018			
Análise	Resultados		Interpretação
Textura de Campo	Média		
pH (H ₂ O)	7,0		Neutro
pH (KCl)	6,1		
Condutividade	0,17	mS.cm ⁻¹	Não salino
Matéria Orgânica	4,4	%	Médio
Fósforo extraível	147	P ₂ O ₅ mg.kg ⁻¹	Alto
Potássio extraível	185	K ₂ O mg.kg ⁻¹	Alto
Cálcio extraível	3342	mg.kg ⁻¹	
Magnésio extraível	601	mg.kg ⁻¹	Muito alto
Azoto total	-	%	
Azoto mineral		mg.kg ⁻¹	
Sódio extraível		mg.kg ⁻¹	
Boro	-	mg.kg ⁻¹	-
Carbonatos	-	%	
Cloretos		mg.kg ⁻¹	
Cobre	-	mg.kg ⁻¹	-
Ferro	-	mg.kg ⁻¹	-
Manganês	-	mg.kg ⁻¹	-
Chumbo	-	mg.kg ⁻¹	-
Níquel	-	mg.kg ⁻¹	-
Zinco	-	mg.kg ⁻¹	-
Terra Fina	-	%	
Cálcio de troca	-	cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹	-
Magnésio de troca	-	cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹	-
Sódio de troca	-	cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹	-
Potássio de troca	-	cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹	-
SBT	-	cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹	-
CTC	-	cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹	-
Acidez de troca	-	cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹	-
GSB	-	%	-

Figura 38: Amostragem de solo das parcelas em estudo referente ao ano de 2018.

Quadro 1: Análise estatística ANOVA aos dados de produtividade obtidos pelas amostras.

SUMÁRIO	Plantas/m	Peso total	Peso total	Produtiv	Total	
<i>Ponto 1</i>						
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	1447.2	3970.8	1897.2	1897.2	26287.2	
Média	482.4	1323.6	632.4	632.4	2190.6	
Variância	2371.68	9283.68	6289.92	6289.92	6440157	
<i>Ponto 2</i>						
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	1432.8	3391.2	1522.8	1522.8	21574.8	
Média	477.6	1130.4	507.6	507.6	1797.9	
Variância	8104.32	20891.52	3473.28	3473.28	4050753	
<i>Ponto 3</i>						
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	1562.4	4341.6	1944	1944	27288	
Média	520.8	1447.2	648	648	2274	
Variância	7158.24	6894.72	1956.96	1956.96	6608934	
<i>Ponto 4</i>						
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	1674	4694.4	2005.2	2005.2	28425.6	
Média	558	1564.8	668.4	668.4	2368.8	
Variância	6078.24	28334.88	17578.08	17578.08	7266615	
<i>Ponto 5</i>						
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	1548	2980.8	1101.6	1101.6	16646.4	
Média	516	993.6	367.2	367.2	1387.2	
Variância	28723.68	210107.5	29484	29484	2541572	
<i>Ponto 6</i>						
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	1324.8	3434.4	1378.8	1378.8	19926	
Média	441.6	1144.8	459.6	459.6	1660.5	
Variância	846.72	1334.88	652.32	652.32	3233553	
<i>Ponto 7</i>						
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	1249.2	3747.6	1645.2	1645.2	23094	
Média	416.4	1249.2	548.4	548.4	1924.5	
Variância	483.84	9499.68	12445.92	12445.92	4946937	
<i>Ponto 8</i>						
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	1605.6	3452.4	1461.6	1461.6	21135.6	
Média	535.2	1150.8	487.2	487.2	1761.3	
Variância	9231.84	12912.48	2026.08	2026.08	3634637	
<i>Ponto 9</i>						
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	1566	4518	2242.8	2242.8	30754.8	
Média	522	1506	747.6	747.6	2562.9	
Variância	1179.36	31186.08	13897.44	13897.44	9183686	
<i>Ponto 10</i>						
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	1544.4	2811.6	1123.2	1123.2	16711.2	
Média	514.8	937.2	374.4	374.4	1392.6	
Variância	5222.88	16087.68	8566.56	8566.56	2218570	
<i>Total</i>						
Contagem	30	30	30	30		
Soma	14954.4	37342.8	16322.4	16322.4		
Média	498.48	1244.76	544.08	544.08		
Variância	6563.778	66050.13	21881.6	21881.6		
ANOVA						
<i>te de varia</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	17775794	9	1975088	7.78409	3.83E-08	1.999115
Colunas	5.03E+08	3	1.68E+08	660.7422	2.51E-56	2.718785
Interaçõe	28122507	27	1041574	4.104985	4.73E-07	1.625513
Dentro	20298721	80	253734			
Total	5.69E+08	119				

Quadro 2: Estatística de regressão entre o nº de plantas e NDVI.

Estatística de regressão								
R múltiplo	0.0553263							
Quadrado de R	0.003061							
Quadrado de R ajustado	-0.121556							
Erro-padrão	12.061325							
Observações	10							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>			
Regressão	1	3.573346	3.57335	0.0246	0.879343445			
Residual	8	1163.8044	145.476					
Total	9	1167.3778						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interceptar	91.893939	47.83235	1.92117	0.091	-18.40765764	202.195536	-18.40765764	202.1955364
Variável X 1	13.041409	83.211238	0.15673	0.8793	-178.8440502	204.926868	-178.8440502	204.9268679

Quadro 3: Análise estatística ANOVA aos dados recolhidos nas medições de campo.

SUMÁRIO	1. Medição	2. Medição	3. Medição	Total
PONTO 1				
Contagem	6.0	6.0	6.0	18.0
Soma	125.0	151.0	279.0	555.0
Média	20.8	25.2	46.5	30.8
Variância	3.4	3.0	7.5	137.3
PONTO 2				
Contagem	6.0	6.0	6.0	18.0
Soma	142.0	166.0	338.0	646.0
Média	23.7	27.7	56.3	35.9
Variância	2.3	5.1	11.9	229.8
PONTO 3				
Contagem	6.0	6.0	6.0	18.0
Soma	130.0	166.0	325.0	621.0
Média	21.7	27.7	54.2	34.5
Variância	3.1	2.3	10.6	215.8
PONTO 4				
Contagem	6.0	6.0	6.0	18.0
Soma	136.0	165.0	310.0	611.0
Média	22.7	27.5	51.7	33.9
Variância	0.7	6.7	3.1	173.5
PONTO 5				
Contagem	6.0	6.0	6.0	18.0
Soma	114.0	180.0	272.0	566.0
Média	19.0	30.0	45.3	31.4
Variância	0.4	5.2	8.7	127.7
PONTO 6				
Contagem	6.0	6.0	6.0	18.0
Soma	127.0	149.0	287.0	563.0
Média	21.2	24.8	47.8	31.3
Variância	0.2	3.8	4.6	150.0

PONTO 7						
Contagem	6.0	6.0	6.0	18.0		
Soma	97.0	125.0	288.0	510.0		
Média	16.2	20.8	48.0	28.3		
Variância	1.0	3.8	12.8	213.8		
PONTO 8						
Contagem	6.0	6.0	6.0	18.0		
Soma	105.0	138.0	278.0	521.0		
Média	17.5	23.0	46.3	28.9		
Variância	1.1	3.6	1.1	167.1		
PONTO 9						
Contagem	6.0	6.0	6.0	18.0		
Soma	117.0	160.0	290.0	567.0		
Média	19.5	26.7	48.3	31.5		
Variância	1.1	7.9	5.1	163.2		
PONTO 10						
Contagem	6.0	6.0	6.0	18.0		
Soma	92.0	145.0	260.0	497.0		
Média	15.3	24.2	43.3	27.6		
Variância	2.7	4.6	12.3	150.4		
Total						
Contagem	60	60	60			
Soma	1185	1545	2927			
Média	19.75	25.75	48.78333			
Variância	8.33	10.46	21.70			
ANOVA						
Fonte de variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	1194.5611	9	132.729	28.65342	1.88E-28	1.942796
Colunas	28189.378	2	14094.69	3042.749	3.9E-122	3.056366
Interações	499.28889	18	27.73827	5.988113	9.91E-11	1.673014
Dentro	694.83333	150	4.632222			
Total	30578.061	179				

Quadro 4: Estatística de regressão entre a altura média de plantas e o NDVI.

Estatística de regressão							
R múltipl	0.6663422						
Quadrad	0.444012						
Quadrad	0.3745135						
Erro-padr	0.0382121						
Observaç	10						
ANOVA							
	gl	SQ	MQ	F	F de significância		
Regressã	1	0.0093287	0.00933	6.38879913	0.035387035		
Residual	8	0.0116813	0.00146				
Total	9	0.02101					
Coeficientes							
	Erro-padrão	Stat t	valor P	95% inferior	95% superior	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercept	0.1880603	0.1527728	1.23098	0.25329075	-0.164234364	0.54035487	-0.164234364 0.540354866
Variável	0.007893	0.0031227	2.52761	0.03538703	0.000692001	0.01509392	0.000692001 0.015093923

Quadro 5: Folha de registo para estimativa de produtividade.

Herdade das Romeiras - Limpa Amoreira														
Cultura: Trigo Mole														
Local coordenadas	Data	Estadio Z	A		B	D		E	F	G	H	Correcção área		
			Contage m	Média parcela		Grãos/espiguetas	Grãos/espiguetas						Contage m	Média parcela
1	25/04/2020	65	20	18.80	2.5	50.00	47	102	408.00	425	20400	40	8 160	6 936
2	25/04/2020	65	18		2.5	45.00		123	492.00		22140	40	8 856	7 528
3	25/04/2020	65	17.3		2.5	43.33		110	440.00		19067	40	7 627	6 483
4	25/04/2020	65	19.3		2.5	48.33		95	380.00		18367	40	7 347	6 245
5	25/04/2020	65	18.7		2.5	46.67		116	464.00		21653	40	8 661	7 362
6	25/04/2020	65	18.7		2.5	46.67		96	384.00		17920	40	7 168	6 093
7	25/04/2020	65	19.3		2.5	48.33		110	440.00		21267	40	8 507	7 231
8	25/04/2020	65	19.3		2.5	48.33		103	412.00		19913	40	7 965	6 771
9	25/04/2020	65	19.333		2.5	48.33		107	428.00		20687	40	8 275	7 033
10	25/04/2020	65	18		2.5	45.00		98	392.00		17640	40	7 056	5 998
											6 768			

Quadro 6: Estatística de regressão entre a altura média de plantas e a estimativa de produtividade.

Estatística de regressão								
R múltiplo	0.229992386							
Quadrado	0.052896498							
Quadrado	-0.06549144							
Erro-padrão	559.748738							
Observação	10							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>			
Regressão	1	139992.8026	139992.8	0.446806479	0.522670332			
Residual	8	2506549.197	313318.6					
Total	9	2646542						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepto	5276.802232	2237.88773	2.357939	0.046106333	116.2238734	10437.38059	116.2238734	10437.38059
Variável X	30.57612811	45.74280142	0.668436	0.522670332	-74.90696112	136.0592173	-74.90696112	136.0592173

Quadro 7: Estatística de regressão entre o índice NDVI e a estimativa de produtividade.

Estatística de regressão								
R múltiplo	0.061830834							
Quadrado	0.003823052							
Quadrado	-0.120699067							
Erro-padrão	574.0670837							
Observação	10							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>			
Regressão	1	10117.86768	10117.87	0.030701791	0.865260953			
Residual	8	2636424.132	329553					
Total	9	2646542						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepto	6370.363636	2276.613751	2.798175	0.023263201	1120.482913	11620.24436	1120.482913	11620.24436
Variável X	693.9552594	3960.496369	0.175219	0.865260953	-8438.965744	9826.876263	-8438.965744	9826.876263

Quadro 8: Estatística de regressão entre o nº de plantas e a estimativa de produtividade.

Estatística de regressão								
R múltiplo	0.075609578							
Quadrado	0.005716808							
Quadrado	-0.118568591							
Erro-padrão	573.5211664							
Observação	10							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>			
Regressão	1	15129.77311	15129.77	0.045997424	0.835546347			
Residual	8	2631412.227	328926.5					
Total	9	2646542						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepto	6414.224548	1659.473075	3.865218	0.004773535	2587.472775	10240.97632	2587.472775	10240.97632
Variável X	3.559109176	16.5948967	0.21447	0.835546347	-34.70879123	41.82700959	-34.70879123	41.82700959

Quadro 9: Estatística de regressão entre o índice NDVI e a produtividade obtida através do monitor de rendimento da ceifeira-debulhadora.

Estatística de regressão								
R múltiplo	0.756646601							
Quadrado de R	0.572514079							
Quadrado de R aj	0.519078339							
Erro-padrão	1049.153133							
Observações	10							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>			
Regressão	1	11793212.03	11793212	10.71407	0.011301447			
Residual	8	8805778.373	1100722					
Total	9	20598990.4						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interceptar	-15172.5602	6129.58497	-2.4753	0.038392	-29307.40849	-1037.71191	-29307.40849	-1037.711913
Variável X1	31401.50502	9593.416328	3.273235	0.011301	9279.047294	53523.9627	9279.047294	53523.96274

Quadro 10: Estatística de regressão entre o índice NDVI e a produtividade obtida através das amostras recolhidas manualmente nos pontos de amostragem.

Estatística de regressão								
R múltiplo	0.656424817							
Quadrado de R	0.43089354							
Quadrado de R aj	0.359755232							
Erro-padrão	1023.567483							
Observações	10							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>			
Regressão	1	6345990.47	6345990	6.057124	0.03925			
Residual	8	8381523.13	1047690					
Total	9	14727513.6						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interceptar	-9255.3913	5980.103055	-1.5477	0.160284	-23045.53368	4534.751071	-23045.53368	4534.751071
Variável X1	23034.78261	9359.462113	2.461122	0.03925	1451.824273	44617.74094	1451.824273	44617.74094

Quadro 11: Estatística descritiva da produtividade sujeita às diferentes taxas de aplicação.

Média	5088.528
Erro-padrão	381.3271
Mediana	4721.5
Moda	#N/D
Desvio-padrão	934.0569
Variância da amostra	872462.4
Curtose	-0.65087
Assimetria	0.958099
Intervalo	2271.5
Mínimo	4307
Máximo	6578.5
Soma	30531.17
Contagem	6

Quadro 12: Estatística de regressão entre a zona menos produtiva e o seu índice NDVI correspondente.

<i>Estatística de regressão</i>								
R múltiplo	0.475539544							
Quadrado de R	0.226137858							
Quadrado de R aj	0.183145516							
Erro-padrão	468.86024							
Observações	20							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>			
Regressão	1	1156295.91	1156296	5.259957	0.034076026			
Residual	18	3956938.64	219829.9					
Total	19	5113234.55						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interceptar	1057.462656	824.966826	1.281824	0.21617	-675.7283298	2790.653642	-675.72833	2790.653642
Variável X 1	3208.286766	1398.88525	2.29346	0.034076	269.3379098	6147.235622	269.3379098	6147.235622

Quadro 13: Estatística de regressão entre a zona mais produtiva e o seu índice NDVI correspondente.

<i>Estatística de regressão</i>								
R múltiplo	0.669972547							
Quadrado de R	0.448863214							
Quadrado de R aj	0.416443403							
Erro-padrão	187.7801376							
Observações	19							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>			
Regressão	1	488205.697	488205.7	13.84534	0.001698836			
Residual	17	599443.461	35261.38					
Total	18	1087649.16						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interceptar	1580.218541	1205.03622	1.311345	0.207177	-962.1856414	4122.622723	-962.185641	4122.622723
Variável X 1	6916.796468	1858.88802	3.720932	0.001699	2994.885572	10838.70736	2994.885572	10838.70736

Quadro 15: Estatística descritiva dos valores de margem bruta nos diferentes pontos de amostragem.

Média	346.7283
Erro-padrão	44.91652
Mediana	353.7
Moda	#N/D
Desvio-padrão	110.0226
Variância da amostra	12104.96
Curtose	0.811456
Assimetria	0.223451
Intervalo	327.7
Mínimo	190.2
Máximo	517.9
Soma	2080.37
Contagem	6