

**UTILIZAÇÃO DAS UNIDADES DE ACUMULAÇÃO TÉRMICA COMO  
FERRAMENTA DE GESTÃO DAS CULTURAS E DA REGA**

**António Maria Pereira Gomes de Abreu da Silva**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Agronómica**

**Orientadores:** Professora Paula Cristina Santana Paredes

Doutor Diogo Martins

**Júri:**

Presidente: Gonçalo Pereira Fernandes Caleia Rodrigues, Professor Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia

Vogais: João Rui Rolim Fernandes Machado Lopes, Professor Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia

Paula Cristina Santana Paredes, Professora Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia

**2022**

## **Agradecimentos**

Desde o momento em que comecei a redigir esta dissertação, várias foram as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização da mesma. Não poderia deixar de lhes escrever uma palavra de agradecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família, pela motivação e por tudo o que me disponibilizaram, quer de perto ou de longe, sempre me apoiaram. Ao meu irmão, pela ajuda imprescindível e o apoio dado não só na realização da dissertação como também ao longo de todo este caminho. Em especial aos meus pais, por todo o apoio, paciência e fé que demonstraram desde o início.

Aos meus orientadores, Professora Paula Paredes e Doutor Diogo Martins, muito obrigado por toda a colaboração, acompanhamento e exigência ao longo do desenvolvimento da dissertação e os inestimáveis ensinamentos transmitidos. Agradecer também a imensa paciência e disponibilidade prestada nos tempos em que era necessário. Ao Instituto Superior de Agronomia, pelos amigos que me deu e pelo contacto com pessoas que jamais me esquecerei. A todos os professores, de licenciatura e de mestrado, agradecer pelo conhecimento que me transmitiram.

Aos meus amigos e colegas que me acompanharam e com os quais passei tempos memoráveis e que não queria deixar de agradecer, João Chaveiro, Francisco Ribeiro, Manuel Serrano, João Moreira, José Pedro Pinto Gouveia, Miguel Cecílio, João Vacas de Carvalho, António e João Gonçalves, Gonçalo Boléo Tomé, Henrique Renga, Damião Goes, Manel Vacas, Duarte Netto, António Ramalho, Manel Moura Neves, Filipe Soares Franco, João Toscano, Pedro Calamote, Beatriz Lourenço, Bernardo Pereira, André Bencatel, Rita Aranha.

## **Resumo**

Num contexto de alterações climáticas, prevê-se um aumento da variabilidade climática e dos eventos extremos, nomeadamente a ocorrência de secas, com uma consequente diminuição das disponibilidades de recursos hídricos. Estas mudanças, vão ter um impacto direto no desenvolvimento e na produtividade das culturas assim como nas necessidades de água e de rega.

O principal objetivo desta dissertação consistiu na determinação das fases do ciclo das três culturas mais representativas, em termos de área, em Portugal, *i.e.*, batata, o milho, e o trigo, com base na utilização da acumulação térmica como ferramenta de apoio à decisão. Assim, e numa ótica de mitigação das secas estimou-se o impacto de três datas de sementeira ou plantação nas necessidades líquidas de rega (NLR, mm), na produtividade da água e das culturas selecionadas, em particular em condições de procura climática forte (seca severa). Nesta análise selecionou-se o modelo da FAO AquaCrop, dado que já foi amplamente calibrado e validado para as culturas selecionadas.

Os resultados obtidos foram espacializados e analisados para as diferentes regiões NUTS II. Estes mostraram que antecipar a data de sementeira/plantação do trigo e da batata permite a obtenção de uma maior produtividade com a menor utilização de água. Quanto à data de sementeira para a cultura do milho esta pode ser interpretada de duas formas, caso o produtor decida produzir grão deverá optar pela data precoce uma vez que permite obter uma maior produtividade com menor NLR; caso opte por produzir uma cultura de Outono/Inverno ou seja atrasando a data de sementeira deverá utilizar uma variedade de ciclo mais curto (menos produtiva) ou então produzir o milho para forragem sendo que as NLR serão neste caso mais elevadas. A metodologia proposta deve ser melhorada com a inclusão de uma avaliação do retorno económico assim como do risco associado às diferentes decisões.

**Palavras-chaves:** data de sementeira e plantação, modelo AquaCrop, necessidades líquidas de rega, produtividade da água e das culturas, seca severa.

## **Abstract**

In a climate change context, climate variability and extreme events, including droughts, are expected to increase, with a consequent decrease in the availability of water resources. These changes will have a direct impact on the development and productivity of crops as well as on the water and irrigation requirements.

The main objective of this study was to determine the crop growth stages of the three most representative crops, in terms of area, in Portugal, *i.e.* potato, corn and wheat, based upon the use of the heat accumulation or growing degree days as a decision support tool. Thus, aiming at coping with droughts, the study assessed the impact of three sowing or planting dates on the net irrigation water requirements (NLR, mm), crop production and on the water productivity of the selected crops, particularly under severe drought conditions. For this analysis, the FAO AquaCrop model was selected because it has already been extensively calibrated and validated for the selected crops.

The obtained results were spatialized and analysed for the different NUTS II regions. Results showed that anticipating the sowing/planting date is the most adequate for wheat and potato that allows obtaining the highest yield with the lowest water use. Relative to maize results show that two options may be taken into consideration, if the farmer decides to produce corn then an earlier date should be adopted since it allows obtaining higher yield with lower NLR; contrarily, if the farmer chooses to produce an autumn/winter crop *i.e.* delaying the sowing date then a shorter cycle variety should be used (less productive) or else produce forage maize however, with increased NLR. The proposed methodology should be improved to better support decision making by including a module that allows the assessment of the economic returns as well as the risk associated with the different decisions.

**Keywords:** sowing or planting date, AquaCrop model, net irrigation requirements, crop and water productivity, severe drought.

## Índice

Agradecimentos .....	ii
Resumo .....	iii
Abstract .....	iv
Índice de Figuras .....	vii
Índice de Quadros .....	ix
Lista de símbolos .....	x
Lista de acrónimos e siglas .....	xii
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Revisão bibliográfica .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Principais culturas de regadio em Portugal.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Acumulação térmica e ciclo cultural.....</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Gestão da água e das culturas em condições de escassez .....</b>	<b>13</b>
<b>2.4. Estimativa da evapotranspiração e das necessidades de rega das culturas .....</b>	<b>15</b>
<b>2.5. Modelação de produção .....</b>	<b>16</b>
<b>2.6. Fontes alternativas de dados climáticos .....</b>	<b>19</b>
<b>3. Materiais e métodos.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Dados Climáticos .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Características do solo e dos lençóis freáticos.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3. Estima das fases do ciclo das culturas seleccionadas com base na acumulação térmica .....</b>	<b>25</b>
<b>3.4. Modelação de cenários de gestão da cultura e da água para a mitigação das secas.....</b>	<b>27</b>
<b>3.4.1. Modelação das necessidades de rega e da produção .....</b>	<b>27</b>
<b>3.4.2 - Construção de cenários de gestão das culturas .....</b>	<b>30</b>
<b>3.4.3 – Determinação dos anos de seca severa.....</b>	<b>30</b>
<b>3.4.4 Avaliação dos cenários com base na produtividade da água.....</b>	<b>32</b>
<b>4. Resultados e Discussão .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1. Duração dos ciclos culturais .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2. Necessidades líquidas de rega e produtividade das culturas em contexto de seca severa ..</b>	<b>37</b>
<b>4.3. Produtividade da água .....</b>	<b>54</b>

<b>5. Conclusões.....</b>	<b>57</b>
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>59</b>
<b>7.Anexos .....</b>	<b>i</b>
<b>Anexo I – Unidades de análise NUTS .....</b>	<b>i</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 - Regadio por ocupação cultural (2009-2019) (Fonte: INE, 2021).....	4
Figura 2 - Produção mundial de culturas (Fonte: FAOSTAT, 2020).....	13
Figura 3 - Malha com a localização dos pontos da grelha da reanálise ERA-5.....	21
Figura 4 - Representação das unidades hidrogeológicas de Portugal continental (Adaptado de SNIRH, 2022). .....	24
Figura 5 - Grelha com a localização dos furos de monitorização dos lençóis freáticos (Adaptado de SNIRH, 2022). .....	25
Figura 6 - Exemplo dos dados de saída do modelo AquaCrop para a cultura do milho para a data de sementeira de 15 de Maio.....	31
Figura 7 - Exemplo da determinação do ano correspondente à seca severa e respetivas características para a cultura do milho.....	32
Figura 8 - Diferentes definições de produtividade da água e eficiência do uso da água. (Adaptado de Pereira et al., 2012) .....	32
Figura 9 - Diagrama de extremos e quartis referente aos números de dias do ciclo cultural do trigo de acordo com a data de sementeira utilizada (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo). .....	34
Figura 10 - Diagrama de extremos e quartis referente aos números de dias do ciclo cultural da batata de acordo com a data de plantação utilizada (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo; ○ representam os valores atípicos/outliers).....	35
Figura 11 - Diagrama de extremos e quartis referente aos números de dias do ciclo cultural do milho de acordo com a data de sementeira utilizada (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo). .....	36
Figura 12 - Representação espacial dos resultados obtidos para as diferentes variáveis (precipitação, evapotranspiração de referência, necessidades de rega e produtividade) para a cultura do trigo de acordo com a data de sementeira (precoce, normal e tardia).....	40
Figura 13 - Representação espacial dos resultados obtidos para as diferentes variáveis (precipitação, evapotranspiração de referência, necessidades de rega e produtividade) para a cultura da batata de acordo com a data de plantação (precoce, normal e tardia). .....	43
Figura 14 -Representação espacial dos resultados obtidos para as diferentes variáveis (precipitação, evapotranspiração de referência, necessidades de rega e produtividade) para a cultura do milho de acordo com a data de sementeira (precoce, normal e tardia). .....	46

Figura 15 - Diagrama de extremos e quartis referente à produtividade média da água referente à cultura do trigo para as diferentes datas de sementeira (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo; ○ representam os valores atípicos/outliers).....	55
Figura 16 - Diagrama de extremos e quartis referente à produtividade média da água referente à cultura da batata para as diferentes datas de plantação (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo; ○ representam os valores atípicos/outliers).....	57
Figura 17 - Diagrama de extremos e quartis referente à produtividade média da água referente à cultura do milho para as diferentes datas de sementeira (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo; ○ representam os valores atípicos/outliers).....	58
Figura 18 - Representação espacial dos resultados obtidos para a produtividade da água para as diferentes culturas, trigo, batata e milho de acordo com a data de sementeira (precoce, normal e tardia). .....	55

## Índice de Quadros

Quadro 1 - Produção das principais culturas por NUTS II (Fonte: INE, 2021).....	5
Quadro 2 - Classificação das cultivares híbridas de milho para grão pelo sistema FAO, segundo a precocidade e necessidades térmicas para a maturação fisiológica (Adaptado de Bellido, 1990). .....	6
Quadro 3 - Épocas de plantação e de colheita da batata de acordo com as regiões produtoras (Fonte: ProBatata).....	7
Quadro 4 - Valores de temperatura de base (Tb) e da temperatura superior (Tmax) para o cálculo da acumulação térmica e definição dos estágios do ciclo para alguns cereais, forragens, hortícolas, leguminosas e oleaginosas. ....	9
Quadro 5 - Valores de temperatura de base (Tb) e da temperatura superior (Tmax) para o cálculo da acumulação térmica para o corte com maior acumulação de biomassa. ....	12
Quadro 6 - Produção das culturas escolhidas por NUTS II (Fonte: INE, 2021).....	26
Quadro 7 - Valores médios da acumulação térmica necessária a completar as diferentes fases do ciclo das culturas selecionadas e temperatura de base e superior considerada no cálculo (Desvio padrão apresentado entre parêntesis).....	26
Quadro 8 - Valores adotados para os diferentes parâmetros do modelo AquaCrop. ....	29
Quadro 9 - Necessidade de rega e produtividade média da cultura do trigo de acordo com as diferentes datas de sementeira para as diferentes regiões de Portugal continental (NUTSII). .....	42
Quadro 10 - Necessidade de rega e produtividade média da cultura da batata de acordo com as diferentes datas de plantação para as diferentes regiões de Portugal continental (NUTSII). .....	45
Quadro 11 - Necessidade de rega e produtividade média da cultura do milho de acordo com as diferentes datas de sementeira para as diferentes regiões de Portugal continental (NUTS II).....	53
Quadro 12 - Produtividades médias das três culturas de acordo com os dados do INE (Fonte: INE, 2021).....	54

## Lista de símbolos

B – Produção de Biomassa ( $t h^{-1}$ )

CN – Número de curva (adimensional)

$ET_c$  – Evapotranspiração cultural ( $mm dia^{-1}$ )

$ET_o$  – Evapotranspiração da cultura de referência ( $mm dia^{-1}$ )

$e_a$  – Pressão parcial de vapor real (kPa)

$e_s$  – Pressão parcial de vapor saturante diária (kPa)

$F_{HI}$  – Fator de ajustamento do índice de colheita (adimensional)

G – Densidade do fluxo de calor do solo ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ )

GDD – Acumulação térmica ( $^{\circ}C$ )

$HI_0$  – Índice de colheita de referência (adimensional)

$K_c$  – Coeficiente cultural médio (adimensional)

$K_{cb}$  – Coeficiente cultural de base (adimensional)

$K_e$  – Coeficiente de evaporação do solo (adimensional)

$K_s$  – Condutividade hidráulica saturada ( $cm d^{-1}$ )

$K_{sb}$  – Coeficiente de stress relativo à temperatura (adimensional)

NLR – Necessidades líquidas de rega (mm)

P – Precipitação (mm)

$P_H$  – Frequência empírica de Horton (%)

REW – Água facilmente evaporável (mm)

$R_i$  – Posição do valor na série de valores ordenados por ordem crescente

$R_s$  – Radiação solar ( $MJ m^{-2}$ )

$R_s$  – Radiação líquida à superfície da cultura de referência ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ )

$T_b$  – Temperatura de base ( $^{\circ}C$ )

$T_{cut}$  – Limiar de temperatura superior ( $^{\circ}C$ )

$T_{\text{dew}}$  – Temperatura no ponto de orvalho ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{max}}$  – Temperatura máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{mean}}$  – Temperatura média do ar a 2 metros de altura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{min}}$  – Temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{ri}}$  – Quantidade de água transpirada no dia  $i$  ( $\text{mm d}^{-1}$ )

$\text{TWU}$  – Total de água utilizada ( $\text{mm}$ )

$u_2$  – Velocidade do vento medida a 2 metros de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )

$u_{10}$  – Componente horizontal do vento ( $\text{m s}^{-1}$ )

$v_{10}$  – Componente vertical do vento ( $\text{m s}^{-1}$ )

$\text{WP}$  – Produtividade física da água ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\text{WP}_{\text{ETc}}$  – Produtividade da água relativa à evapotranspiração da cultura ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\text{WP}_{\text{Irrig}}$  – Produtividade da água de rega ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\text{WP}_{\text{TWU}}$  – Produtividade da água total utilizada ao nível da parcela ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\text{WP}_{\text{WU}}$  – Produtividade da água tendo em conta a quantidade de água consumida ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\text{WP}_{\text{T}}$  – Produtividade da água relativa à transpiração ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$W_r$  – Quantidade de água retida na zona radicular ( $\text{mm}$ )

$w_z$  – Velocidade do vento a  $z$  metros de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )

$Y$  – Produtividade das culturas ( $\text{t ha}^{-1}$ )

$Y_a$  – Produção final real ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

$z$  – Altura a que foi realizada a medição da velocidade do vento ( $\text{m}$ )

$Z_r$  – Profundidade radicular ( $\text{m}$ )

$\Delta$  - Declive da curva de pressão de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\gamma$  – Constante psicrométrica ( $\text{kPa}$ )

$\theta$  – Teor de água no solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )

$\theta_{CC}$  – Teor de água do solo à capacidade de campo ( $m^3 m^{-3}$ )

$\theta_{CE}$  – Teor de água do solo ao coeficiente de emurchecimento permanente ( $m^3 m^{-3}$ )

$\theta_{sat}$  – Teor de água à saturação ( $m^3 m^{-3}$ )

### **Lista de acrónimos e siglas**

INE – Instituto Nacional de Estatística

NUTS – Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins estatísticos

SAU – Superfície Agrícola Utilizada

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

## 1. Introdução

A agricultura tem um lugar muito importante na história do Homem, estando ligada tanto ao desenvolvimento do Homem como ao melhoramento do modo de vida do mesmo. Durante anos a agricultura era praticada ao nível familiar e de acordo com as suas necessidades (Yamaguchi *et al.*, 2020), com o passar do tempo esta intensificou-se para conseguir dar resposta às necessidades de alimento da crescente população (Pereira, 2017). A atividade agrícola está extremamente dependente das condições meteorológicas associadas a cada local, as quais são cada vez mais incertas e irregulares (Aznar-Sánchez *et al.*, 2019)

As alterações climáticas são identificadas “*como uma das maiores ameaças ambientais, sociais e económicas que o planeta e a humanidade enfrentam*” (Martins, 2019; Wilhite, 2019). É um dos problemas com maior importância no que diz respeito à agricultura atual, pois tem-se vindo a verificar um aumento da variabilidade climática e dos eventos extremos e com uma tendência para que estes venham a ter proporções e consequências cada vez mais graves (Yang *et al.*, 2020; Fraga *et al.*, 2020; Fonseca *et al.*, 2022;). O aumento da variabilidade dos eventos de precipitação e a redução da quantidade anual de precipitação, o aumento das temperaturas ou até mesmo a ocorrência de eventos extremos de precipitação (cheias e secas) são uma realidade cada vez mais frequente (Santos *et al.*, 2010; Paulo *et al.*, 2012, 2017).

As alterações climáticas apresentam um impacto na taxa fotossintética, na duração do ciclo das culturas, no período sem geadas, na erosividade por parte da precipitação, no número de horas de frio, no stress hídrico, na incidência de pragas e doenças, na vulnerabilidade de eventos extremos, entre outros (Arora, 2019; Raza *et al.*, 2019). Existem várias medidas de adaptação às alterações climáticas no que diz respeito à gestão das culturas, podendo ser destacadas as seguintes: (1) substituir cultivares/variedades por outras com necessidades térmicas mais adequadas e com melhor resistência ao stress hídrico, (2) práticas agrícolas como rotação de culturas e utilização de sementeira direta, (3) uso de tecnologia no que diz respeito à rega de modo a aumentar a eficiência do uso da água (Fragoso & Noéme, 2014; Anderson *et al.*, 2020).

Todos estes constrangimentos tornam mais complexa a atividade agrícola, em particular a agricultura regada, assim como a tomada de decisão pelos agricultores, no início e ao longo de cada campanha de rega. Assim, é necessária maior informação e ferramentas que permitam ao agricultor e outros atores (e.g., gestores de perímetros de rega) adaptarem-se a esta realidade.

Na região do Mediterrâneo as culturas de Outono-Inverno são cultivadas em regime de sequeiro, o que implica a necessidade de uma adequada quantidade e distribuição da

precipitação que permita satisfazer as necessidades hídricas das culturas. No entanto, recorre-se à rega de complemento para fazer face à grande variabilidade e incerteza da precipitação para satisfazer as necessidades de água das culturas. A rega é praticada nas fases críticas, de maior défice hídrico, com o objetivo de obter elevada produtividade dessas culturas (Paredes *et al.*, 2015a; Paredes & Torres, 2017)

O conceito de unidades de calor ou acumulação térmica (GDD, °C) é utilizado em vários estudos fenológicos como a previsão das datas de sementeira e colheita, a duração dos ciclos culturais, o estado de maturação, e o rendimento das culturas. A utilização das unidades de calor, pode ser uma boa ferramenta de gestão das culturas e da rega, nomeadamente, por poderem ser utilizadas com dados de previsão climáticas (Steduto *et al.*, 2012; Paredes *et al.*, 2015a; Linker & Sylaios, 2016; Linker *et al.*, 2018) ou ainda com cenários de projeções climáticas (Fraga *et al.*, 2018; Pathak & Stoddard, 2018; Yang *et al.*, 2020) Pathak & Stoddard, 2018).

A data de sementeira ou de plantação exerce um papel importante no crescimento e desenvolvimento da cultura, o que tem impacto na produtividade da cultura e nas necessidades de água. Na região do Mediterrâneo a escolha deve ser feita de modo a conseguir aproveitar as condições meteorológicas mais favoráveis para o desenvolvimento da cultura. Por norma, datas tardias de sementeira apresentam um decréscimo na produtividade devido à exposição a altas temperaturas e a um maior défice hídrico durante fases críticas do ciclo vegetativo (Haddad *et al.*, 2016; Fraga & Santos, 2021).

Tendo em consideração o exposto os objetivos desta dissertação consistem na determinação das fases do ciclo de culturas selecionadas com base na utilização da acumulação térmica (GDD) como ferramenta de apoio à decisão em particular para o desenho de práticas de gestão numa ótica de mitigação das secas. Assim, a GDD será usada como ferramenta em termos de gestão das culturas (diferentes datas de sementeira ou plantação), no cálculo das necessidades de rega das culturas e da produtividade da água, em particular em condições de seca severa. O objetivo final é a utilização desta informação para o apoio à tomada de decisão a várias escalas, como ao nível da parcela como dos perímetros de rega. Os objetivos específicos incluem:

1. Determinação das necessidades de rega das culturas e sua produtividade tendo em consideração a variabilidade climática existente de um ano para o outro;

2. Estima do impacto de diferentes cenários de gestão das culturas (datas de sementeira ou plantação) e da rega na produção e no uso da água, tendo em conta a mitigação do efeito das secas;
3. Espacialização das necessidades de rega e a da produtividade da água em Portugal continental tendo por base os cenários delineados.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. Principais culturas de regadio em Portugal

Nas condições climáticas de Portugal, a agricultura de regadio tem uma importância indiscutível na estrutura da produção final agrária, já que permite ter culturas com maior valor acrescentado que as tradicionais culturas de sequeiro (Canatário Duarte, 2018). A oportunidade atual está certamente numa agricultura que consiga produzir em quantidade, com qualidade, de forma sustentável, de uma forma eficiente e tendo em conta as necessidades do consumidor. No ano de 2019, como se pode observar na Figura 1, foram recenseadas 134 mil explorações com sistema de rega (46% do total), com aptidão para regar 626 mil hectares (16% da SAU), sendo que 47% da superfície irrigável são terras agrícolas, 43% culturas permanentes e 10% pastagens permanentes. A superfície regada foi de 561 mil hectares, cerca de 90% da superfície irrigável, beneficiando 32% das culturas temporárias, 30% das culturas permanentes e somente 3% das pastagens permanentes (INE, 2021).

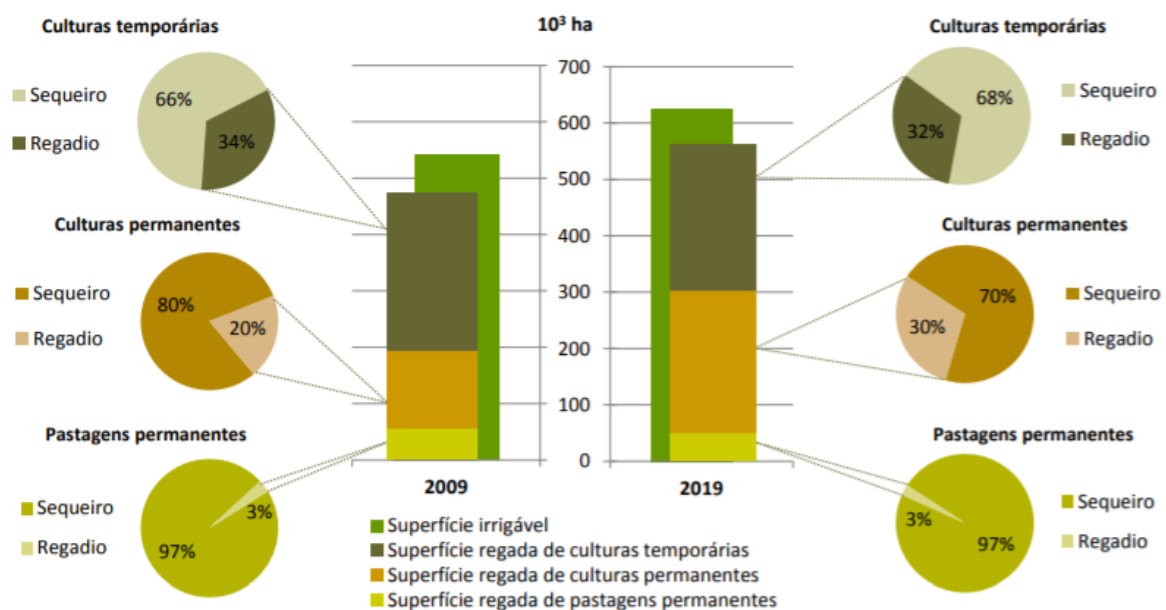


Figura 1 - Regadio por ocupação cultural (2009-2019) (Fonte: INE, 2021).

Em Portugal continental, os dados relativos às culturas anuais (INE, 2021), as que têm maior expressão quer a nível de área de produção, produção e ocupação territorial (NUTS II) são o trigo, o milho, a batata e a aveia para forragem como mostra a Quadro 1. Verifica-se que em termos de superfície ocupada as culturas menos representativas, representando menos de 1% da área cultivada total, são o grão-de-bico e o feijão. Em oposição as mais culturas mais representativas, representando aproximadamente 15%, são a aveia de forragem e o milho para grão. Em termos de produção o padrão é semelhante.

Quadro 1 - Produção das principais culturas por NUTS II (Fonte: INE, 2021).

Culturas	Trigo		Trigo mole		Milho p/grão		Milho p/grão de regadio	
	Superfície	Produção	Superfície	Produção	Superfície	Produção	Superfície	Produção
NUTS II	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t
<b>Continente</b>	30123	80649	26504	70376	72935	681939	65088	660996
Norte	3215	5326	3215	5326	21268	103279	16932	95879
Centro	2610	6075	2401	5551	24383	234825	20909	221340
Área Metropolitana de Lisboa	470	1979	428	1854	1858	20582	1858	20582
Alentejo	23073	66203	19856	56805	25317	322209	25317	322209
Algarve	754	1066	605	840	109	1045	72	986
Culturas	Centeio		Arroz		Aveia		Cevada	
	Superfície	Produção	Superfície	Produção	Superfície	Produção	Superfície	Produção
NUTS II	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t
<b>Continente</b>	14351	17155	25939	132792	37274	46991	19021	59866
Norte	8823	13239	0	0	2602	2564	128	116
Centro	5331	3735	6461	34754	3992	3295	1186	3956
Área Metropolitana de Lisboa	0	0	5452	25488	80	120	390	1458
Alentejo	190	175	13826	71395	29686	40049	16766	53665
Algarve	8	6	199	1155	914	964	550	671
Culturas	Feijão		Grão-de-bico		Batata		Batata de regadio	
	Superfície	Produção	Superfície	Produção	Superfície	Produção	Superfície	Produção
NUTS II	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t
<b>Continente</b>	3589	2509	2931	2890	16198	368691	13232	337973
Norte	873	658	126	95	6092	110639	4948	98136
Centro	1707	934	158	107	5772	111497	3959	93423
Área Metropolitana de Lisboa	0	0	11	12	1470	53627	1470	53627
Alentejo	996	909	2625	2668	2547	84727	2547	84727
Algarve	13	8	11	7	317	8200	308	8059
Culturas	Tomate (indústria)		Girassol		Milho forrageiro		Aveia forrageira	
	Superfície	Produção	Superfície	Produção	Superfície	Produção	Superfície	Produção
NUTS II	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t
<b>Continente</b>	13321	1255298	6362	10126	58169	2542530	72166	1288679
Norte	0	0	0	0	34378	1754941	13325	206567
Centro	118	10673	161	464	17509	481061	26011	321347
Área Metropolitana de Lisboa	3009	312846	28	108	1514	71523	1656	31123
Alentejo	10194	931779	6173	9554	4083	206280	29603	705698
Algarve	0	0	0	0	685	28725	1571	23944

ha -hectares, t - toneladas

O milho, é de um modo geral, semeado nos meses de Abril e Maio, dependendo do tipo de solo e da duração do ciclo das variedades utilizadas, as quais poderão ter um ciclo que vai desde ultra precoce (<85 dias) até ultra tardio (>150 dias), como se pode observar no Quadro 2. A data de colheita vai depender também da utilização a que se destina o produto final, ou seja se é forragem ou se é para grão. No caso de forragem a colheita é feita quando o grão se encontra no estado pastoso (R3 na escala de Ritchie *et al.*, 1993), e de um modo geral é feita na segunda quinzena de Agosto ou na primeira quinzena de Setembro. Caso seja o milho seja produzido para grão, este é colhido quando o grão está seco (<35% de humidade) (R6 na escala de Ritchie

*et al.*, 1993), o que ocorre em meados de Setembro até Outubro, dependendo sempre da variedade utilizada e da data de sementeira (Tandzi & Mutengwa, 2019).

*Quadro 2 - Classificação das cultivares híbridas de milho para grão pelo sistema FAO, segundo a precocidade e necessidades térmicas para a maturação fisiológica (Adaptado de Bellido, 1990).*

<b>Classe FAO</b>	<b>Precocidade</b>	<b>Ciclo médio (dias)</b>
100	Ultra precoce	76-85
200	Muito precoce	86-95
300	Precoce	96-105
400	Semi-precoce	106-115
500	Médio	116-120
600	Semi-tardio	121-130
700	Tardio	131-140
800	Muito tardio	141-150
900	Ultra Tardio	>150

A data de sementeira no caso da cultura do trigo está dependente de vários fatores que condicionam a tomada de decisão pelo agricultor, nomeadamente o ciclo de crescimento da variedade a utilizar, com o propósito de alcançar melhores produções. Em Portugal continental a data de sementeira mais frequentemente utilizada é desde meados de Outubro até princípio de Janeiro (Melo-Abreu, 1994; Costa *et al.*, 2013; Bagulho *et al.*, 2015;), a colheita ocorre desde o final de Maio e pode durar o Verão todo, pois o grão deve ser colhido com um teor de humidade da ordem dos 13 a 14% (ANPOC, 2015).

O cultivo da batata em Portugal continental tem como utilização final o consumo em fresco ou na indústria alimentar. A data de plantação e de colheita varia consoante as regiões produtoras (Quadro 3). Em Portugal Continental as datas de plantação podem ser divididas por regiões, Minho, Trás-os-Montes e Alto Douro, Beira Baixa, Beira Alta e Beira Litoral as datas mais usuais são: 15 de Março, 1 de Abril e 15 de Abril (Sousa & Pereira, 1999), por outro lado no Ribatejo, Oeste, Alentejo e Algarve as datas mais usuais são: 10 de Janeiro, 31 de Janeiro e 20 de Dezembro. A plantação decorre normalmente no período de Fevereiro a meados de Abril, sendo o mês de Março o mais favorável.

A duração do ciclo cultural das variedades utilizadas, podendo ser precoces (70-80 dias), semi-precoces (90-100 dias), semi-tardias (100-120 dias) ou então tardias (120-150 dias) (Almeida, 2014). No entanto, como já discutido anteriormente a duração do ciclo está dependente da

acumulação térmica. A colheita é realizada de acordo com a maturação fisiológica da cultura. O período de colheita ocorre, dependendo da região e da duração do ciclo cultural, vai desde meados de Abril até Setembro, podendo prolongar-se por Outubro (Almeida, 2014).

Quadro 3 - Épocas de plantação e de colheita da batata de acordo com as regiões produtoras (Fonte: ProBatata).

Região	Operação	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Trás-os-Montes e Alto-Douro	Plantação												
	Colheita												
Minho	Plantação												
	Colheita												
Beira Litoral	Plantação												
	Colheita												
Beira Interior	Plantação												
	Colheita												
Ribatejo	Plantação												
	Colheita												
Oeste	Plantação												
	Colheita												
Alentejo	Plantação												
	Colheita												
Algarve	Plantação												
	Colheita												

## 2.2. Acumulação térmica e ciclo cultural

O ciclo de desenvolvimento de uma dada cultura depende da acumulação de unidades de calor ou acumulação térmica (GDD), uma vez que, na ausência de outros fatores limitantes como a escassez de água, o crescimento e a fenologia das plantas depende essencialmente da acumulação de temperatura. Este índice é um indicador agroclimático que assume que o crescimento da planta ocorre apenas acima de um limiar de temperatura, o qual se denomina de temperatura de base ( $T_b$ ); abaixo desta temperatura a taxa de crescimento é considerada insignificante (Raes *et al.*, 2012; Spinoni *et al.*, 2015).

Existe ainda um limiar de temperatura superior ( $T_{cut}$ , *cut-off temperature*), acima da qual as atividades metabólicas nas plantas cessam, afetando ainda o desenvolvimento das plantas e, deste modo, é considerado importante para algumas culturas (Spinoni *et al.*, 2015).

A acumulação térmica necessária para que uma dada fase do ciclo ocorra é calculada a partir do número de graus-dia calculado como (Raes *et al.*, 2012).

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_b \quad \text{se} \quad T_b < \frac{T_{max} + T_{min}}{2} < T_{cut} \quad (1a)$$

$$GDD = T_{cut} - T_b \quad \text{se} \quad \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \geq T_{cut} \quad (1b)$$

$$GDD = 0 \quad \text{se} \quad \frac{T_{max}+T_{min}}{2} \leq T_b \quad (1c)$$

No Quadro 4 são apresentados os valores da acumulação térmica para as distintas fases do ciclo de diversas culturas hortícolas e arvenses enquanto no Quadro 5 apresentam-se os valores dos GDDs para o corte com maior acumulação de biomassa. As diferentes fases do ciclo das culturas são as definidas de acordo com a metodologia da FAO descrita em Allen *et al.*, (1998); assim: a fase inicial corresponde ao período entre a sementeira/plantação até que se atinga um cobertura de 10% do solo, o período de desenvolvimento corresponde desde a cultura cobrir 10% do solo até à máxima cobertura do solo ou ao início da floração, o período intermédio coincide com o final do período de desenvolvimento até ao início da senescência ou em outros casos ao início da maturação, por último o período final vai desde a conclusão do período intermédio até à colheita no caso de se tratar de culturas anuais. O período intermédio é dividido em várias fases (floração/fração de cobertura máxima, formação do fruto/grão e desenvolvimento fruto/enchimento grão), que são importantes no caso de algumas culturas para aspetos de gestão da rega nomeadamente no caso da rega deficitária (Paredes *et al.*, 2017; Paredes *et al.*, 2018;).

O método da acumulação térmica tem um papel importante na predição das etapas de desenvolvimento das culturas, contribuindo para a tomada de decisão nomeadamente em termos de gestão das datas de sementeira e na calendarização da rega. Assim, em condições de seca e em cenários de alterações climáticas, a determinação antecipada das fases do ciclo da cultura, possibilita uma melhor gestão quer da cultura (Renato *et al.*, 2013; Anandhi, 2016; Akyuz *et al.*, 2017) como da água de rega quer ao nível da parcela como ao nível do perímetro de rega. A utilização de dados de previsão meteorológica de médio e longo prazo (Paredes *et al.*, 2015a) permitem antecipadamente o cálculo dos GDD e deste modo contribuem para a tomada de decisão. Os GDD são também essenciais em estudos que analisam os impactos das alterações climáticas quer nas necessidades de rega como na produção (e.g. Teixeira & Rolim, 2014; Fraga *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2020).

Quadro 4 - Valores de temperatura de base ( $T_b$ ) e da temperatura superior ( $T_{max}$ ) para o cálculo da acumulação térmica e definição dos estágios do ciclo para alguns cereais, forragens, hortícolas, leguminosas e oleaginosas.

Cultura	$T_b$ (°C)	$T_{max}$ (°C)	Acumulação térmica para diferentes fases do ciclo cultural*				Referência
			Início do desenvolvimento vegetativo	Período intermédio**	Início da senescência/Maturação	Colheita	
<b>Cereais</b>							
Arroz	10	-	572	1446	1755	1918	Islam & Sikder (2011)
			488	882	1342	s/i	Nv <i>et al.</i> (2019)
			490	835	1875	s/i	Mote <i>et al.</i> (2015)
	11	42	515	998	1500	s/i	Confalonieri & Bocchi (2005)
Cevada	0	30	256	940	1597	2323	Paredes <i>et al.</i> (2017)
			151	1477	1803	2549	Abi Saab <i>et al.</i> (2015)
	0	40	100	1800	2050	s/i	Soltani & Sinclair (2012)
			2	28	185	917	1199
Milho	8	28	700	1432	1872	s/i	Karandish <i>et al.</i> , (2016)
			788	1243	1609	s/i	Ran <i>et al.</i> (2018)
	8	30	885	1603	1750	s/i	Sandhu & Irmak (2019)
			876	1260	1560	s/i	Yang <i>et al.</i> (2017)
			1208	1219	1267	s/i	Žydelis <i>et al.</i> (2018)
			683	1453	1863	s/i	Paredes <i>et al.</i> (2015a)
			295	985	1248	1642	Corbari <i>et al.</i> (2021)
	8	45	1125	2180	2250	s/i	Soltani & Sinclair (2012)
	9	33	628	1381	1803	s/i	Domínguez <i>et al.</i> (2012)
	9	-	674	1924	2713	s/i	Parthasarathi & Jeyakumar, (2013)
	10	30	700	1435	2835	s/i	Pandži <i>et al.</i> (2020)
			603	1078	1408	1502	Trout & DeJonge, (2018)
			891	1075	1508	s/i	(Martins <i>et al.</i> , 2019)
10	-	703	1441	2346	s/i	Ahmed <i>et al.</i> (2020)	

\* Fases correspondente ao período intermédio definido em Allen *et al.* (1998);\*\* inclui floração, formação do fruto ou grão e seu desenvolvimento; s/i – sem informação (continua)

Quadro 4 - (continuação)

Cultura	T <sub>b</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	Acumulação térmica para diferentes fases do ciclo cultural*				Referência
			Início do desenvolvimento vegetativo	Período intermédio**	Início da senescência/Maturação	Colheita	
<b>Cereais</b>							
Trigo	0	26	224	1201	2399	s/i	Trombetta <i>et al.</i> (2016)
			284	993	1372	2040	Andarzian <i>et al.</i> (2011)
			150	1100	1422	2451	Abi Saab <i>et al.</i> , (2021)
	0	35	100	495	770	s/i	Pala <i>et al.</i> (1996)
			140	1898	2183	s/i	Soltani & Sinclair (2012)
	0	40	50	1800	2130	2390	Richter <i>et al.</i> (2010)
			400	1250	1900	2150	Saadi <i>et al.</i> (2015)
	5	33	417	629	983	1076	Saiyed <i>et al.</i> (2009)
			114	983	1453	s/i	Toumi <i>et al.</i> (2016)
	5	35	61	969	1098	s/i	Mkhabela & Bullock (2012)
			279	819	1372	s/i	Rajanna & Dhindwal (2019)
	5	-	482	871	1015	1365	Basu <i>et al.</i> (2012)
			37.4	359	1051	1146	Roy <i>et al.</i> (2018)
10	-	87	868	1737	s/i	Premdeep <i>et al.</i> (2019)	
<b>Hortícolas</b>							
Alho	0	45	468.5	1318	2044	s/i	Domínguez <i>et al.</i> (2013)
Batata	2	26	332	760	1468	2324	Montoya <i>et al.</i> (2016)
			405	814	1324	1958	Martínez-Romero <i>et al.</i> (2019)
			276	463	900	1423	Seijo-Rodríguez <i>et al.</i> (2018)
			390	862	1300	1643	DEWEDAR <i>et al.</i> (2021)
	2	35	260	793	1295	1742	Paredes <i>et al.</i> (2018)
	5.5	-	437	585	1127	s/i	Ahmadi <i>et al.</i> (2019)
	6	-	151	500	988	2216	Schulz <i>et al.</i> (2019)
Cebola	6	45	459	1367	2283	s/i	Domínguez <i>et al.</i> (2012)

\* Fases correspondente ao período intermédio definido em Allen *et al.* (1998);\*\* inclui floração, formação do fruto ou grão e seu desenvolvimento; s/i – sem informação (continua)

Quadro 4 - (continuação)

Cultura	T <sub>b</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	Acumulação térmica para diferentes fases do ciclo cultural*				Referência
			Início do desenvolvimento vegetativo	Período intermédio**	Início da senescência/Maturação	Colheita	
<b>Hortícolas</b>							
Cenoura	6	30	322	785	1286	1574	Léllis <i>et al.</i> (2017)
			322	785	1286	1574	Carvalho <i>et al.</i> (2014)
Tomate	8	33	-	887	1278	1590	Corbari <i>et al.</i> , (2021)
	10	30	-	450	900		Hartz & Bottoms (2009)
	10	32	100	500	900	1100	Saadi <i>et al.</i> (2015)
	10	35	315	600	1300		Andrea <i>et al.</i> (2009)
<b>Leguminosas</b>							
Ervilha	5	27	144	581	876	942	Paredes & Torres (2017)
	5	-	98	465	921		Devi <i>et al.</i> (2019)
Grão-de-bico	0	40	100	2240	2340		Soltani & Sinclair (2012)
	1	-	215	1051	2087		Fotiadis <i>et al.</i> (2017)
	5	-	116	1433	2041		Ray <i>et al.</i> (2020)
			132	1429	1947		Kumar & Sinha (2010)
Soja	5	30	350	707	1955	2438	Giménez <i>et al.</i> (2017)
			166	841	2044	2433	Adeboye <i>et al.</i> (2019)
	6	-	206	1158	1700	1861	El-Batal <i>et al.</i> (2009)
	8	45	70	1910	2150		Soltani & Sinclair (2012)
<b>Oleaginosas</b>							
Girassol	6	30	94	896	1055	1677	Todorovic <i>et al.</i> (2009)
	6.7	-	206	903	2310		NDAWN (2012)
	7.2	-	174	1095	2264		Canavar <i>et al.</i> (2010)
	8	45	100	1600	2000		Soltani & Sinclair (2012)
<b>Forragens (corte único)</b>							
Aveia	0	34	425	832	862		Zhang <i>et al.</i> (2019)
	4	25	50	950	2000		Abraha & Savage (2008)
Consociação	5.5	-	214.9	615.5	1173.15	1369.5	Faria de Sousa Maldonado (2018)
Luzerna	5	40	160	715	-		Li <i>et al.</i> (2019)
Triticale	4	-	294	1062	2647		Bijanzadeh <i>et al.</i> (2019)

\* Fases correspondente ao período intermédio definido em Allen *et al.* (1998);\*\* inclui floração, formação do fruto ou grão e seu desenvolvimento; s/i – sem informação

Quadro 5 - Valores de temperatura de base ( $T_b$ ) e da temperatura superior ( $T_{max}$ ) para o cálculo da acumulação térmica para o corte com maior acumulação de biomassa.

Cultura	$T_b$ (°C)	$T_{max}$ (°C)	Acumulação térmica do corte com maior acumulação de biomassa	Referência
Bermuda grass	10	-	744	Rodrigues (2013)
Luzerna	5	-	489	Hakl <i>et al.</i> (2010)
Sorgo	10	-	1112	Wannasek <i>et al.</i> (2017)
Triticale	0	-	600	Lyu <i>et al.</i> (2018)

Para várias culturas a quantidade de informação disponibilizada na literatura por vezes não é a adequada, como se pode observar nos Quadros 4 e 5. Para as culturas com maior relevância, ou seja, aquelas que apresentam um maior interesse a nível económico e grandes áreas de cultivo a nível mundial (Figura 2) são as que possuem mais estudos com adequada informação, o que permite definir convenientemente as suas fases do ciclo cultural. Todavia tal não quer dizer que a acumulação térmica necessária para que determinada fase do ciclo se complete, descrita nesses estudos possa ser comparável uma vez que existem divergências no que diz respeito às temperaturas base ( $T_b$ ) bem como às temperaturas máximas ( $T_{max}$ ) usadas na Eq. 1. Tal pode ser observado no Quadro 4 por exemplo para a cultura do milho, que é uma das culturas com maior número de estudos, são apontadas  $T_b$  a variar entre os 8 °C e os 10 °C e que a  $T_{max}$  varia entre os 28 °C e os 45 °C. Para aquelas culturas que não possuem a mesma quantidade de informação disponível, como é o caso da cultura da aveia e do grão-de-bico, pode proporcionar uma maior discordância no que diz respeito à temperatura base ( $T_b$ ), à temperatura máxima ( $T_{max}$ ), bem como da própria acumulação térmica no sentido de estabelecer as fases de desenvolvimento das culturas. Adicionalmente, verifica-se para a mesma cultura os GDDs, quando se utiliza a mesma  $T_b$ , necessários para completar uma determinada fase do ciclo apresenta uma grande variabilidade. Tal poderá ser explicado pela existência de diferentes variedades/cultivares.

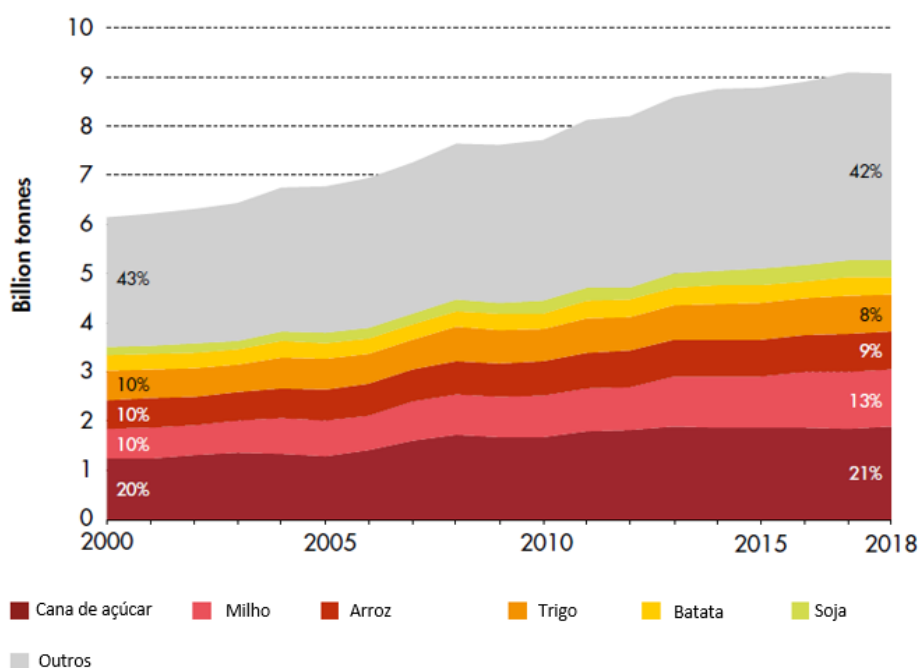


Figura 2 - Produção mundial de culturas (Fonte: FAOSTAT, 2020).

### 2.3. Gestão da água e das culturas em condições de escassez

Na região do Mediterrâneo, onde o clima no Verão é quente e seco e com Invernos amenos e chuvosos, as datas de sementeira estão fortemente dependentes da data de colheita da cultura anterior e pelas condições climáticas do local. Assim, a escolha da data de sementeira vai ter um papel importante no crescimento e desenvolvimento da cultura, influenciando a produtividade final (Abrha *et al.*, 2012; Saab *et al.*, 2014; Giménez *et al.*, 2017; Paredes *et al.*, 2017) assim como as necessidades de água e de rega (Paredes *et al.*, 2014, 2017; Tafes Desta *et al.*, 2020). Assim, torna-se importante o apoio do agricultor na tomada de decisão.

Estudos que visam a análise da variabilidade climática e das alterações climáticas indicam que os eventos extremos, nomeadamente os eventos de seca, continuam e continuarão a representar uma ameaça para a agricultura (Saadi *et al.*, 2015, Fraga *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2020 Funes *et al.*, 2021). É esperado que a frequência bem como a severidade de acontecimentos climáticos, como por exemplo eventos extremos de precipitação, venham a aumentar no futuro (Royer *et al.*, 2021). Em Portugal Continental, 40% da precipitação total anual acontece durante o Inverno (Dezembro-Março) e meramente 7% da precipitação total anual ocorre durante o Verão (Junho-Setembro). Por outro lado, as estações de transição, nomeadamente a Primavera (Março-Junho) e o Outono (Setembro-Dezembro), evidenciam uma distribuição interanual muito versátil com sensivelmente 24% a 28%, respetivamente (Martins *et al.*, 2012; Paulo *et al.*, 2012).

A tomada de decisão, no que diz respeito à agricultura de regadio, tem de ser planeada antecipadamente. Esta tomada de decisão tem de considerar a grande variabilidade climática existente nas condições climáticas mediterrâneas assim como o impacto da gestão da rega na produção e no rendimento do agricultor (Paredes *et al.*, 2015a). Nestas condições, os agricultores necessitam de maior apoio à tomada de decisão em termos de calendarização da rega, de modo que os impactos dos défices de água, impostos ao longo do ciclo da cultura não tenham elevado impacto na produção e, conseqüentemente, no rendimento (Rodrigues & Pereira, 2009; Paredes *et al.*, 2014; 2017; Darouich *et al.*, 2017). Assim, na condução da rega, vários fatores devem ser considerados: precipitação e evapotranspiração, fase do ciclo da cultura, método de rega e limitações do sistema, quantidade de água disponível para a rega e quantidade de água no solo (Pereira, 2004).

Uma estratégia de gestão, para melhorar a eficiência da utilização da água no regadio é a utilização da rega deficitária que tenta otimizar quer o rendimento quer a eficiência do uso da água (Pereira, 2004; Fereres & Soriano, 2007; Al-Ghobari & Dewidar, 2018). Em algumas culturas, a rega deficitária tem sido proposta como estratégia para manter/aumentar a qualidade da produção ao mesmo tempo que reduz o consumo de água, e.g. vinha para vinho (Chaves *et al.*, 2007) ou no caso da pera (Vélez-Sánchez *et al.*, 2021), contudo no caso das culturas arvenses não tem sido amplamente adotada devido ao risco de redução do rendimento do agricultor (Rodrigues *et al.*, 2013; Paredes *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2019).

Na condução da rega, e se esta se faz de forma a impor défice hídrico este deverá ocorrer nas fases menos suscetíveis, ou seja, naquelas em que o impacto negativo na produção seja minorado (rega deficitária controlada). Assim, devem ser analisadas estas fases para cada uma das culturas selecionadas (batata, milho e trigo).

A cultura da batata pode ser produzida em sequeiro na região da bacia do mediterrâneo, uma vez que é considerada moderadamente tolerante ao défice hídrico, no entanto de modo a obter elevadas produções deve ser usada rega de complemento (Sousa & Pereira, 1999; Onder *et al.*, 2005; Quiroz *et al.*, 2012). Existem três fatores que se conjugam para que seja uma cultura com elevadas necessidades hídricas: (i) enraizamento superficial; (ii) fecho dos estomas mesmo com potencial hídricos do solo elevados; (iii) difícil recuperação do potencial hídrico das folhas, em parte devida à regulação do fluxo de água na planta exercida pelos tubérculos. Nesta cultura as maiores exigências de água ocorrem durante a fase de crescimento dos tubérculos (Quiroz *et al.*, 2012; Monneveux *et al.*, 2014). As fases do ciclo mais suscetíveis ao défice hídrico vão

desde a tuberização até ao início da maturação fisiológica (Doorenbos & Kassam, 1979; Paredes *et al.*, 2018).

O milho é uma cultura com elevada exigência de água, mas é também uma das mais eficientes na produção de matéria seca e no uso da água. Em condições ótimas, a produção de milho está estreitamente relacionada com a água disponível. No entanto, a qualidade e a quantidade de grão produzida é afetada quando ocorre stress hídrico, sendo esperados maiores impactos quando este ocorre nas fases críticas que são a floração, frutificação e no enchimento do grão (Stewart *et al.*, 1977; Doorenbos & Kassam, 1979; Hsiao & Fereres, 2012; Paredes *et al.*, 2014).

O consumo de água pelo trigo depende da variedade, do estado fenológico, da disponibilidade de água, das condições climáticas, do solo e das práticas agronómicas. Uma conveniente disponibilidade de água durante as fases consideradas críticas no ciclo cultural, como o alongamento do colmo, o emborrachamento, a ântese e o enchimento do grão, proporciona melhores condições para a síntese e translocação de hidratos de carbono, favorecendo o número e o tamanho dos grãos e, desse modo o rendimento (Doorenbos & Kassam, 1979; Asseng *et al.*, 2012; Boteta, 2013; Alghory & Yazar, 2018; Tomaz *et al.*, 2018).

#### **2.4. Estimativa da evapotranspiração e das necessidades de rega das culturas**

A evapotranspiração das culturas ( $ET_c$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ ) pode ser diretamente medida utilizando várias metodologias (e.g. método das flutuações instantâneas, razão de Bowen, balanço hídrico do solo) (Allen *et al.*, 2011) ou determinada indiretamente utilizando por exemplo a aproximação  $K_c-ET_o$  proposta pela FAO (Allen *et al.*, 1998). Assim a  $ET_c$  baseia-se na estimativa da evapotranspiração de uma cultura de referência ( $ET_o$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ) a qual é ajustada para cada cultura utilizando um coeficiente cultural ( $K_c$ , adimensional) o qual integra as características da cultura em estudo e que a distinguem da cultura de referência (Allen *et al.*, 1998; Rosa *et al.*, 2012).

O cálculo da  $ET_c$  em condições potenciais, ou seja, na ausência de qualquer tipo de stress e de pragas e doenças como segue:

$$ET_c = K_c ET_o \quad (2a)$$

Existem duas aproximações para o cálculo: uma em que se utiliza um  $K_c$  médio, o qual combina ambas as componentes de transpiração e evaporação do solo enquanto na aproximação dual existem dois coeficientes que descrevem separadamente estas componentes, respetivamente o

coeficiente cultural de base ( $K_{cb}$ ) e o coeficiente de evaporação do solo ( $K_e$ ). Assim, nesta última aproximação a  $ET_c$  é calculada como:

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o \quad (2b)$$

O  $K_{cb}$  representa o limite inferior ou valor base do  $K_c$  quando se lhe subtraem os efeitos do humedecimento causado pela rega ou pela precipitação ao nível da camada superficial do solo. O coeficiente de evaporação do solo ( $K_e$ ) representa a evaporação do solo húmido, a qual é limitada pela quantidade de energia disponível à superfície do solo (Rosa *et al.*, 2012).

Existem modelos que permitem o cálculo da  $ET_c$  e das necessidades de rega usando quer a aproximação dos coeficientes culturais simples como o modelo ISAREG (Pereira *et al.*, 2003) ou o MOPECO (Domínguez *et al.*, 2012), enquanto outros usam a aproximação dual como por exemplo os modelos de balanço hídrico IrrigRotation (Rolim & Teixeira, 2008), e SIMDualKc (Rosa, *et al.*, 2012), ou o modelo de produção AquaCrop (Raes *et al.*, 2012; Salman *et al.*, 2021). Este último apesar de ser predominantemente utilizado para a estima da produção efetua o balanço hídrico do solo e a determinação das necessidades de rega das culturas.

## 2.5. Modelação de produção

A previsão das produtividades das culturas é uma abordagem moderna no que diz respeito à gestão de uma exploração agrícola. A atual tendência focada na sustentabilidade da agricultura, implica a utilização de tecnologias modernas para a otimização do lucro, mas visando a proteção do ambiente. O acesso a ferramentas que simulam o crescimento e desenvolvimento das culturas diariamente, bem como a produtividade final, ajuda os produtores na tomada de decisões no dia a dia da exploração agrícola (Steduto *et al.*, 2012; Zhai *et al.*, 2020).

Atualmente existem inúmeros modelos mecanísticos, os quais consistem na descrição quantitativa dos diversos processos que dão origem às respostas da interação das plantas com o ambiente. Estes modelos simulam o crescimento das culturas e a produção, todos eles têm o seu propósito e mérito, mas antes de serem selecionados e utilizados aconselha-se que seja feita uma avaliação dos modelos existentes com base na finalidade do estudo a ser realizado (Bennett *et al.*, 2013). Por exemplo, alguns modelos de produção podem ser adequados para a determinação de estimativas sazonais de produtividade e pouco exigentes em termos de necessidades de calibração, enquanto outros conseguem facultar dados diários e até mesmo horários e que são adequados a estudos detalhados (Vanuytrecht *et al.*, 2014).

Os modelos de produção demonstraram ser ferramentas adequadas à investigação dos impactos da variabilidade climática e estratégias de gestão da produtividade das culturas, eficiência na utilização dos recursos e impactos ambientais originados pelos sistemas de produção (Andarzian *et al.*, 2011, 2015; Matthews *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2014). A evolução deste tipo de modelos, que teve início há mais de trinta anos, e sua ampla utilização é prova que estes estão a ser cada vez mais utilizados para estudar sistemas dinâmicos complexos (Rauff & Bello, 2015; Di Paola *et al.*, 2016; Siad *et al.*, 2019; Salman *et al.*, 2021). Uma das grandes vantagens da utilização destes modelos de produção é a possibilidade de estes serem utilizados sob diversas condições edafoclimáticas, em diferentes regiões do mundo (Šťastná *et al.*, 2010). De entre os modelos de crescimento e produção mais utilizados encontra-se o modelo “Agricultural Production Simulator” (APSIM) (Holzworth *et al.*, 2014), o qual foi inicialmente desenvolvido para estimar o impacto na produtividade das culturas da disponibilidade de água e azoto no solo (Cichota *et al.*, 2018; Laurenson *et al.*, 2018; Rodríguez *et al.*, 2018). Tem sido muito utilizado em estudos sobre o impacto na produção de diferentes condições climáticas, da gestão das culturas e da rega assim como para a avaliação do balanço de azoto e outros nutrientes e consequentes impactos ambientais (Vogeler & Cichota, 2016; Shepherd *et al.*, 2018; Briak & Kebede, 2021). Exemplo de aplicação a sistemas agrícolas de pequena dimensão em África é o estudo de Briak & Kebede (2021).

O modelo CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003) é uma ferramenta analítica para estudar o efeito do clima, solos na produtividade do sistema. Para simular o desenvolvimento das culturas, este modelo utiliza a acumulação térmica necessária para que seja atingida cada fase do ciclo cultural (Todorovic *et al.*, 2009). Por exemplo o estudo de Ouda *et al.* (2021) descreve a aplicação deste modelo para simular os efeitos de diferentes estratégias de rega deficitárias na produção e no uso da água da cultura do trigo no Egipto.

O modelo World Food Studies (WOFOST) (Diepen *et al.*, 1989), foi originalmente desenvolvido para estimar a produção potencial e o impacto da variabilidade climática e do ciclo hidrológico no que diz respeito às culturas anuais em climas tropicais. No entanto este é um modelo versátil e, portanto, pode ser facilmente aplicado em culturas anuais na Europa. Neste modelo o crescimento das culturas é simulado com um passo de tempo diário com base em processos de crescimento e desenvolvimento fenológico. O modelo permite estimar impactos na produção de várias variáveis climáticas como a radiação, temperatura, concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico, assim como o stress hídrico e de nutrientes, entre outros a ocorrência de pragas e doenças (Wit *et al.*, 2019).

Existe adicionalmente um sistema de apoio à decisão DSAAT (Jones *et al.*, 2003) que engloba aproximadamente 30 modelos de crescimento e produção que são específicos para culturas diferentes (Dias *et al.*, 2016); entre os quais encontram-se os modelos CERES-Maize e CERES-Wheat (Crop Environment Resource Synthesis) desenvolvidos respetivamente para milho e trigo (Si *et al.*, 2021). Estes modelos simulam o crescimento e desenvolvimento das culturas num espaço de tempo diário. Para esta mesma simulação são necessários componentes da fenologia, crescimento, água no solo e quantidades de azoto disponíveis, para que seja feita a simulação das produtividades das culturas. A utilização dos componentes da água no solo e quantidades de azoto disponíveis são necessárias para que o próprio modelo consiga fazer a limitação do rendimento (Ritchie *et al.*, 1998). Para a cultura da batata o DSAAT inclui o modelo SUBSTOR-Potato o qual simula a produção no tempo e no espaço (Montoya *et al.*, 2019), utilizando os efeitos das características do solo e clima, genótipo, cultivar e práticas agrícolas (preparação do solo, rega e fertilização) no crescimento e desenvolvimento da cultura no dia-a-dia (Griffin *et al.*, 1993). Este DSS inclui ainda o modelo de balanço de nutrientes RZWQM (Root Zone Water Quality Model) para simular o efeito das práticas agrícolas no que diz respeito à rega e à fertilização (Anar *et al.*, 2019).

Exemplos de outros modelos que foram desenvolvidos especificamente para uma dada cultura são o LINTUL-Potato (Light INTerception and Utilization for Potato) (Kooman & Haverkort, 1995) sendo atualmente disponibilizado na sua versão de sistema de apoio à decisão (Haverkort *et al.*, 2015). Na revisão de modelos aplicados à cultura da batata Piekutowska *et al.* (2018) refere que este é atualmente o modelo mais utilizado a nível mundial. O modelo foi baseado em aproximações que traduzem a influencia da temperatura e do fotoperíodo no crescimento e desenvolvimento da cultura da batata. Outro destes modelos é o SIMPOTATO que é a versão atualizada do modelo IBSNAT (International Benchmarks Sites Network for Agrotechnology Transfer) (Hodges *et al.*, 1992). O SIMPOTATO é um simulador das principais fases de crescimento para a cultura da batata, tendo inicialmente o objetivo de obter calendários de rega e de aplicação de azoto, atualmente tem a finalidade de auxílio do agricultor na gestão da cultura (Hodges *et al.*, 1992). Este modelo foi posteriormente integrado no modelo CropSyst (Stockle *et al.*, 1994). Raymundo *et al.* (2014) faz uma revisão dos modelos de disponíveis para a simulação da produção de batata.

O modelo mais recente é o AquaCrop o qual simula o crescimento e produção das culturas desenvolvido pela FAO (Food and Agriculture Organization) com o objetivo de avaliar a produtividade em função da água fornecida (Raes *et al.*, 2012). Este modelo já foi calibrado e

validado para inúmeras culturas incluindo arvenses como o milho (Paredes *et al.*, 2014), a cevada (Pereira *et al.*, 2015), trigo (Mkhabela & Bullock, 2012), soja (Giménez *et al.*, 2017), ou hortícolas como o tomate (Katerji *et al.*, 2013), a batata (Montoya *et al.*, 2016) e a ervilha (Paredes & Torres, 2017). Adicionalmente, tem vindo a ser utilizado em vários estudos sobre impacto da gestão da rega, das culturas e do solo na produção (Espadafor *et al.*, 2017). Tem sido também utilizado em estudos que utilizam dados de previsão para a definição de calendários de rega (Paredes *et al.*, 2015a; Linker & Sylaios, 2016). O modelo foi usado em Portugal para a avaliação dos impactos de diferentes cenários de alterações na produtividade do milho produzido na região do Ribatejo (Yang *et al.*, 2017). Este estudo permitiu mostrar a mais-valia do modelo AquaCrop como ferramenta de apoio à tomada de decisão em condições de alterações climáticas.

Em oposição aos modelos mecanísticos acima referidos, existem variadas aproximações simplificadas que permitem avaliar o impacto do stress hídrico na produção, são os denominados modelos simplificados de “água-produção”. São exemplo destas aproximações os modelos multiplicativos de Jensen (1968) e de Hanks (1974) ou o modelo de Stewart (Stewart *et al.*, 1977), o qual foi objeto de uma publicação da FAO (Doorenbos & Kassam, 1979). Este último, assume uma relação linear entre o défice relativo de evapotranspiração da cultura e as perdas relativas de produção, sendo usado para tal um fator de resposta da cultura à água (Ky) cujo valor depende da cultura e do momento em que o stress hídrico é imposto (Paredes *et al.*, 2014, 2015a). O modelo de Stewart tem vindo a ser utilizado em conjugação com modelos de balanço hídrico como é o caso dos modelos SIMDualKc (e.g. Paredes *et al.*, 2014) e do MOPECO (Domínguez *et al.*, 2012).

## **2.6. Fontes alternativas de dados climáticos**

Existem diferentes fontes de dados climáticos em grelha como dados de satélite e dados de reanálise. Os dados de reanálise, são obtidos a partir de modelos complexos de assimilação de dados, disponibilizam séries de dados climáticos homogéneos, com elevada resolução espacial e temporal o que os torna úteis para a análise das alterações climáticas, ou trabalho que exijam um conjunto de dados extenso no tempo, várias décadas, e cobrindo, regularmente uma região ou país, como é o caso do presente trabalho (Trenberth *et al.*, 2008). Quando não existe uma rede de estações meteorológicas adequada a utilização da reanálise está entre os conjuntos de dados mais utilizados para o estudo do clima e do tempo. Estes fornecem informação em intervalos de tempo regulares, com elevada resolução temporal, i.e., a maior parte dos produtos de reanálise são compostos por conjuntos de dados, diários, ou horários, começando, de um modo

geral, em 1979 até ao presente. (Parker, 2016). Os conjuntos de dados provenientes da reanálise são interessantes pois não só fornecem séries longas de dados em contínuo (sem falhas), como também contêm informação sobre várias variáveis, de diferentes locais em diferentes períodos de tempo não registados em dados históricos, apresentando uma boa qualidade (Rose & Apt, 2015).. As observações das diferentes variáveis meteorológicas anteriores a 1979 apresentam lacunas consideráveis nos dados. Nas últimas décadas foram realizados estudos, não só, para preencher essas lacunas de dados como também criar novos registos climáticos para períodos de tempo antecedentes a 1979 (Bengtsson *et al.*, 2004). Para tal, os dados são obtidos através do método que se denomina de assimilação de dados. Trata-se de um processo que se baseia quer nas observações, de diferentes fontes, como em modelos de previsão. No fundo a assimilação de dados pode ser caracterizada como um processo em que toda a informação disponível é manipulada com o intuito de se obter dados com a maior precisão e qualidade, de um dado período de tempo (Talagrand, 1997; Parker, 2016).

Nas últimas décadas, diferentes centros apresentaram diversos produtos de reanálise, sendo eles: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), o National Centers for Environmental Prediction (NCEP), a Japan Meteorological Agency (JMA), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). O ECMWF, em 2019, apresentou o seu mais recente e avançado conjunto de dados de reanálise, a ERA5 e a ERA5-Land (Soukissian *et al.*, 2021). Trata-se da quinta geração de reanálise a uma escala global, tendo sido criado com base em métodos que lhe conferem inúmeras vantagens de utilização quando comparado com o seu antecessor, a ERA-Interim (ERA-I) (Hersback *et al* 2018). Das melhorias feitas, da ERA-I para a ERA5, as mais consideráveis são: a resolução espacial e temporal (79 km vs 31 km para a dimensão horizontal, 60 camadas vs 137 camadas para a dimensão vertical e 6 horas vs 1 hora para a resolução temporal, respetivamente), a atualização do sistema de assimilação, maior cobertura a nível temporal (dados desde 1979) e melhor representação de acontecimentos físicos (por exemplo: ciclones tropicais) (Soukissian *et al.*, 2021).

De modo a colmatar a falta de uma rede de estações meteorológicas adequada a cobrir adequadamente o território nacional, no espaço e no tempo, na presente dissertação foram selecionados os dados da ERA5.

### 3. Materiais e métodos

#### 3.1. Dados Climáticos

A série longa de dados de reanálise ERA-5 utilizados no presente estudo foi obtida a partir do Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF). Como foi referido no capítulo 2.6, a ERA-5 é a quinta geração de reanálise atmosférica. Os dados de reanálise foram disponibilizados em formato Network Common Data Form (NetCDF), que é um tipo de formato de ficheiro para armazenamento de dados científicos multidimensionais (variáveis), nomeadamente para a temperatura (°C), temperatura do ponto do orvalho (°C), pressão atmosférica (kPa), radiação solar ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), velocidade ( $\text{m s}^{-1}$ ) e direção do vento. Posteriormente os dados foram exportados para os 148 pontos de Portugal Continental (Figura 3) usando linguagem .R e o *package* raster (Hijmans, 2021).

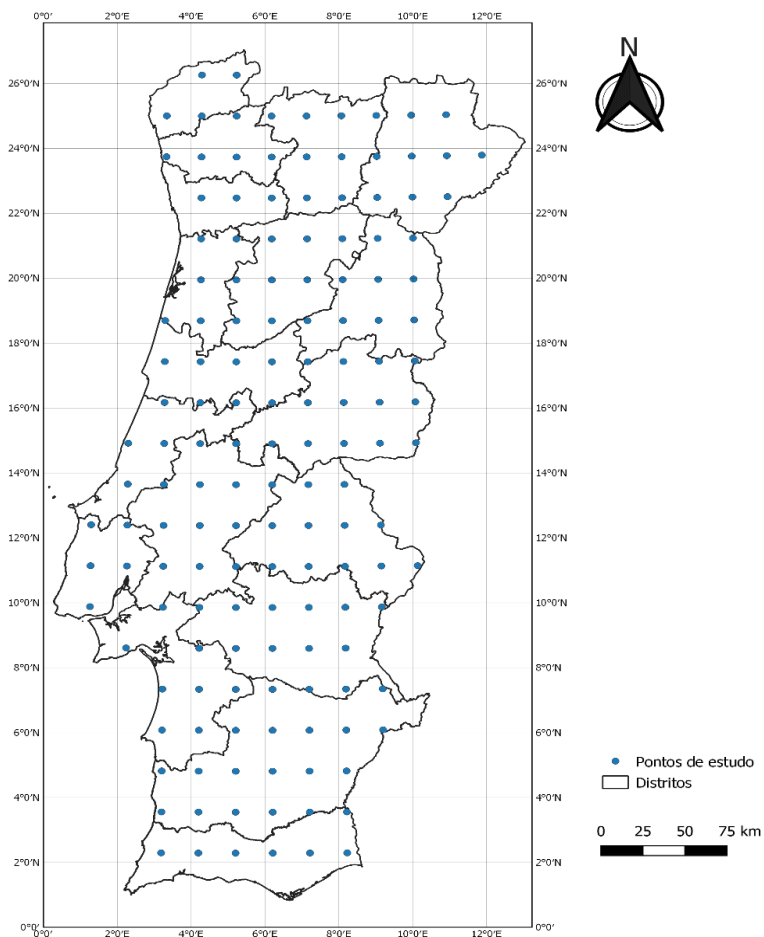


Figura 3 - Malha com a localização dos pontos da grelha da reanálise ERA-5.

Para a elaboração do estudo como foi referido anteriormente, utilizaram-se os dados relativos ao período de 1 de Janeiro de 1979 até 31 de Dezembro de 2019. Foram retirados os dados horários relativos à temperatura máxima do ar ( $T_{\text{max}}$ , °C), temperatura mínima do ar ( $T_{\text{min}}$ , °C),

temperatura do ponto de orvalho ( $T_{dew}$ , °C), precipitação ( $P$ , mm), radiação solar ( $R_s$ , MJ m<sup>-2</sup>) e as duas componentes da velocidade do vento, horizontal e vertical, medidas a 10 metros de altura ( $u_{10}$  e  $v_{10}$ , respetivamente). Posteriormente os dados horários foram convertidos em dados diários, escolhendo a temperatura máxima e mínima de cada dia ( $T_{max}$  e  $T_{min}$ ), no caso da precipitação e da radiação estas foram obtidas tendo em conta o seu valor acumulado diariamente. A velocidade do vento, medida a 10 metros de altura foi convertida para 2 metro de altura utilizando a seguinte equação proposta no (Allen *et al.*, 1998):

$$u_2 = w_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (3a)$$

Onde  $u_2$  é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>);  $w_z$  é a velocidade do vento a z metro de altura (m s<sup>-1</sup>); e z é a altura original da medição dos dados, neste caso de 10 metros.

A pressão parcial de vapor real ( $e_a$ ) foi calculada a partir dos dados diários da temperatura no ponto de orvalho ( $T_{dew}$ ):

$$e_a = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{dew}}{T_{dew} + 237.3}\right) \quad (3b)$$

Por um outro lado, a pressão parcial de vapor saturante diária ( $e_s$ ) foi calculada a partir da média aritmética entre a  $e_a(T_{max})$  e a  $e_a(T_{min})$  (Allen *et al.*, 1998).

Todos estes passos tiveram o propósito de calcular a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ; mm d<sup>-1</sup>) utilizando a metodologia da FAO Penman-Monteith (FAO-PM) (Allen *et al.*, 1998). Nesta metodologia a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética com os seguintes parâmetros fixos (Allen *et al.*, 1998): altura de 12 centímetros, resistência superficial diária de 70 s/m e um albedo de 0.23. Estes parâmetros foram escolhidos por se assemelharem à taxa de evapotranspiração de uma extensa superfície de relva com altura uniforme, com crescimento ativo, cobrindo todo o solo e com um fornecimento adequado de água e de nutrientes (Allen *et al.*, 1998). O cálculo diário da  $ET_o$  a partir da seguinte equação:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_s - G) + \gamma_c \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma_c (1 + 0.34u_2)} \quad (3c)$$

onde 0,408 é o valor inverso do calor latente de vaporização ( $\lambda = 2,45$  MJ kg<sup>-1</sup>);  $\Delta$  é o declive da curva de pressão de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>),  $R_s$  é a radiação líquida à superfície da cultura de referência (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),  $G$  é a densidade do fluxo de calor do solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), o qual é considerado nulo à escala diária;  $\gamma$  é a constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>), 900 é o coeficiente para a cultura de referência [kJ<sup>-1</sup> kg K] resultante da conversão de segundos para dias e de

coeficientes devidos à substituição das variáveis relativas às características do ar húmido que condicionam o transporte de vapor;  $T_{\text{mean}}$  é a temperatura média do ar a 2 m de altura (°C),  $u_2$  velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s - e_a$  é o défice de pressão de vapor (kPa) resultante da diferença entre a pressão de vapor de saturação ( $e_s$ ) e a pressão de vapor atual ( $e_a$ ) relativos à temperatura T e 0,34 é um coeficiente resultante da razão entre a resistência de superfície e a resistência aerodinâmica.

Procedeu-se à validação de todos os dados climáticos tendo-se verificado, como discutido por Paredes *et al.* (2018), que os dados de  $T_{\text{max}}$  e  $T_{\text{min}}$  da reanálise do ECMWF são bastante adequados apresentando erros aceitáveis relativamente aos valores observados. Semelhante comportamento foi obtido por Paredes *et al.* (2021) relativamente aos dados da  $R_s$  da ERA5. Diferente, foi o resultado da análise dos dados da temperatura do ponto de orvalho ( $T_{\text{dew}}$ ), isto porque em várias localizações, em particular do Norte do país, e em pelo menos 5% dos dias das séries de dados se ia obter uma pressão parcial de vapor real ( $e_a$ ) superior à pressão parcial de vapor saturante ( $e_s$ ), o que é impossível. Assim, os dados de  $T_{\text{dew}}$  foram descartados e para o cálculo da  $e_a$  foi utilizada em alternativa a temperatura mínima (Allen *et al.*, 1998) ou a temperatura média, de acordo com o índice de aridez (Middleton & Thomas, 1997) de cada local (Paredes *et al.*, 2021).

Em relação aos dados de precipitação verificou-se que os erros são aceitáveis como referido em vários estudos (Belo-Pereira *et al.*, 2011; Soares *et al.*, 2012; Martins *et al.*, 2017; Hénin *et al.*, 2018) pelo que se optou por não efetuar nenhuma correção.

### **3.2. Características do solo e dos lençóis freáticos**

Para fazer a caracterização dos diferentes solos existentes em Portugal e para obter os dados imprescindíveis para a utilização do modelo AquaCrop foi necessário recorrer a uma base de dados que cobrisse os 148 pontos selecionados. Assim, a base de dados selecionada foi a “Multilayered European Soil Hydraulic Database (EUsoilHydroGrids ver1.0), a qual engloba também a “European pedotransfer functions” (EU-PTFs) (Tóth *et al.*, 2015), baseada na informação de solo correspondente a grelhas de solo com 250 m e um grupo de dados agregados de 1 km (Hengl *et al.*, 2017). Grelhas essas que geram informação detalhada sobre as propriedades texturais e de retenção de água do solo sob todo o continente europeu (Tóth *et al.*, 2015).

As características dos solos que foram recolhidas desta base de dados incluem: teor de água à saturação ( $\theta_{\text{sat}}$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), teor de água do solo à capacidade de campo ( $\theta_{\text{cc}}$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), teor de água

do solo ao coeficiente de emurchecimento permanente ( $\theta_{CE}$ ,  $m^3 m^{-3}$ ), condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ,  $cm d^{-1}$ ), água facilmente evaporável (REW, mm) e número de curva (CN). No que diz respeito ao número de horizontes assumiu-se um único horizonte, quanto à espessura do solo tomou-se em consideração a literatura (e.g. Raes *et al.*, 2012; Pereira *et al.*, 2021a, b), e por último, considerou-se que não existia nenhuma camada que impeça o bom desenvolvimento radicular. Outra informação necessária à modelação das necessidades de água das culturas é a que respeita à profundidade dos lençóis freáticos. Recorreu-se deste modo à informação disponível no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH).

Com base na informação disponibilizada pelo SNIRH dividiu-se Portugal Continental em duas partes, partes essas que diferem na profundidade dos lençóis freáticos. Uma das partes que é a de maior área o Maciço Antigo, em que se considerou a profundidade de dez metros mesmo quando a profundidade observada fosse superior a este valor para todos os pontos que se encontravam nessa unidade hidrogeológica (Figura 4). Ao Maciço Antigo pertencem um total de 110 pontos da grelha que foi considerada e que coincide com a grelha dos dados meteorológicos da ERA5. A profundidade de 10 m foi tomada por defeito para os referidos locais uma vez que em termos de simulação para valores de profundidade da toalha freática superior a 10 m a ascensão capilar é nula, ou seja, a contribuição da toalha freática é nula.



Figura 4 - Representação das unidades hidrogeológicas de Portugal continental (Adaptado de SNIRH, 2022).

Para os restantes pontos, que não se encontram no Maciço Antigo (Figura 4), recorreu-se aos dados do SNIRH para retirar a localização dos furos de monitorização dos lençóis freáticos e

de onde se coletaram os dados médios das profundidades (Figura 5). Uma vez que as séries de dados observados das profundidades dos lençóis freáticos é muito variada (3 a 42 anos de dados) e com furos com muitos dados em falta e outros furos desativados optou-se por simplificar a aproximação utilizando-se a média das profundidades observadas no poço mais próximo de cada ponto da grelha que foi considerada.

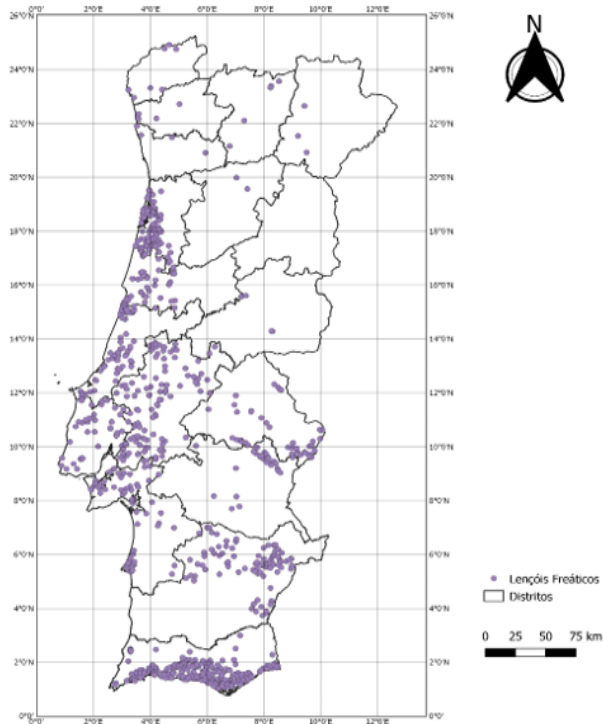


Figura 5 - Grelha com a localização dos furos de monitorização dos lençóis freáticos (Adaptado de SNIRH, 2022).

### 3.3. Estima das fases do ciclo das culturas selecionadas com base na acumulação térmica

Como anteriormente referido, foram selecionadas três culturas para o presente estudo. Os critérios utilizados foram: (1) bibliografia disponível que permitisse a caracterização da acumulação térmica ao longo do ciclo; (2) culturas que segundo os dados do INE (2020) manifestassem maior expressão em termos de área cultivada, e que fossem cultivadas em todo o território nacional; (3) preferencialmente um cereal que se desenvolvesse no período de Outono-Inverno, um cereal de Primavera-Verão e uma hortícola (batata) As estatísticas são referentes às unidades de análise NUTS II (Anexo I).

Como referido no capítulo 2.1, a nível de Portugal Continental destacam-se três culturas: trigo, batata e milho (Quadro 1). A informação relativa à produção foi posteriormente utilizada para comparação com os resultados dos diferentes cenários de modo a dar uma visão da adequação do modelo (validação indireta). Este tipo de validação é comum nomeadamente em estudos sobre o impacto das alterações climáticas (e.g. Yang *et al.*, 2017).

Quadro 6 - Produção das culturas escolhidas por NUTS II (Fonte: INE, 2021).

Culturas NUTS II	Trigo		Batata regadio		Milho p/grão regadio	
	Superfície	Produção	Superfície	Produção	Superfície	Produção
	ha	t	ha	t	ha	t
Continente	30123	80649	13232	337973	65088	660996
Norte	3215	5326	4948	98136	16932	95879
Centro	2610	6075	3959	93423	20909	221340
Área Metropolitana de Lisboa	470	1979	1470	53627	1858	20582
Alentejo	23073	66203	2547	84727	25317	322209
Algarve	754	1066	308	8059	72	986

Nesta dissertação, para se estimar as diferentes fases dos ciclos culturais utilizou-se a acumulação térmica, como está descrito no estudo de Nishad *et al.* (2018), cada fase do desenvolvimento cultural apresenta a sua quantidade de calor necessária para que se consigam desenvolver de uma fase do ciclo para outra. As diferentes fases do ciclo cultural foram estimadas através da acumulação térmica obtida entre os valores definidos por temperatura de base ( $T_b$ ) e temperatura superior ( $T_{cut}$ , *cut-off temperature*).

No Quadro 7 apresentam-se as unidades de acumulação térmica (Eq. 1 (a); (b); (c)) consideradas para cada cultura assim como as  $T_b$  e  $T_{cut}$  utilizadas para o seu cálculo. Para cada fase do ciclo foi considerado o valor da acumulação térmica dos estudos listados no Quadro 4. Estes valores de GDD foram posteriormente considerados na modelação das necessidades de rega e da produtividade (Secção 3.4).

Quadro 7 - Valores médios da acumulação térmica necessária a completar as diferentes fases do ciclo das culturas selecionadas e temperatura de base e superior considerada no cálculo (Desvio padrão apresentado entre parêntesis).

	Unidades	Trigo	Milho	Batata
Temperatura de base	°C	0 <sup>a</sup>	8 <sup>c</sup>	2 <sup>d</sup>
Temperatura superior (“Cut-off”)	°C	26 <sup>b</sup>	30 <sup>c</sup>	26 <sup>d</sup>
<b>Fases do ciclo cultural</b>				
Máxima cobertura do solo = máxima profundidade radicular	GDD	1650 (±285)	695 (±13)	807 (±37)
Início da senescência	GDD	2070 (±123)	1450 (±25)	1345 (±71)
Maturação/colheita	GDD	2270 (±120)	1865 (±62)	1917 (±261)

Fonte de dados: a. Raes *et al.*, 2012; b. Jalil *et al.*, 2020; c. Paredes *et al.*, 2014; Cobari *et al.*, 2021; d. Dewedar *et al.*, 2021;

### 3.4. Modelação de cenários de gestão da cultura e da água para a mitigação das secas

#### 3.4.1. Modelação das necessidades de rega e da produção

O modelo AquaCrop da FAO, desenvolvido em 2009, baseia-se na aproximação da estimativa da “produtividade das culturas em função da água fornecida” (Doorenbos & Kassam, 1979; Raes *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). Este modelo calcula o balanço hídrico diário na zona radicular (Wang *et al.*, 2018). O balanço hídrico também pode ser expresso na quantidade de água retida na zona radicular ( $W_r$ ) sendo esta uma profundidade de água no solo (Raes *et al.*, 2016).

$$W_r = 1000 * \theta * Z_r \quad (4a)$$

onde  $W_r$  é a quantidade de água retida na zona radicular (mm),  $\theta$  é o teor de água no solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e  $Z_r$  é a profundidade radicular (m).

O modelo calcula a evapotranspiração da cultura separando-a nas suas componentes em evaporação do solo e transpiração da cultura. A evaporação da água do solo está associada à superfície deste que simultaneamente se encontra humedecida e exposta à radiação solar. A transpiração está relacionada com a cultura, nomeadamente com a sua área foliar e consequente a fração de cobertura do solo (Raes *et al.*, 2016). A produção diária de biomassa é calculada pelo modelo com base na produtividade da água ( $WP^*$ ) normalizada para a concentração de  $\text{CO}_2$  atmosférico e para a  $ET_o$ , expressa como a produtividade da cultura por unidade de volume de água consumida (Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009), sendo considerada constante para um dado clima e cultura (Mibulo & Kiggundu, 2018). Assim, a produção de biomassa ( $B$ ,  $\text{t ha}^{-1}$ ) é calculada como (Raes, 2017b).

$$B = K_{sb} WP^* \sum \frac{Tr_i}{ET_{o,i}} \quad (4b)$$

Onde  $K_{sb}$  é o coeficiente de stress relativo à temperatura (adimensional),  $WP^*$  ( $\text{g m}^{-2}$ ) é a produtividade da água para a biomassa ajustada à  $ET_o$  e à concentração atmosférica de  $\text{CO}_2$  ( $\text{g m}^{-3}$ ),  $Tr_i$  é a quantidade de água transpirada no dia  $i$  ( $\text{mm d}^{-1}$ ) e  $ET_{o,i}$  é a evapotranspiração de referência para o dia  $i$  (mm).

A produtividade das culturas ( $Y$ ,  $\text{t ha}^{-1}$ ) é calculada a partir da biomassa usando uma equação semi-empírica multiplicando o valor da biomassa pelo índice de colheita (HI, adimensional) (9) (Mibulo & Kiggundu, 2018).

$$Y = F_{HI} BHI_o \quad (4c)$$

Onde  $F_{HI}$  é o fator de ajustamento do índice de colheita o qual integra vários fatores de stress nomeadamente o hídrico, e  $HI_o$  é o Índice de colheita de referência (adimensional).

No caso da cultura da batata como o modelo AquaCrop calcula e expressa a produtividade em matéria seca, foi necessário converter para o seu peso fresco. Essa conversão é feita dividindo, o valor da produtividade calculada, por 0,20 (Quiroz *et al.*, 2012).

Em algumas regiões do Norte, devido à impossibilidade de utilização de uma variedade de milho de ciclo mais longo (FAO600), porque a acumulação térmica necessária para completar o ciclo fazia com que a data de colheita fosse demasiado tardia (finais de novembro a início de dezembro), optou-se por utilizar variedades de ciclo mais curto (FAO300) para as datas de sementeira normal e tardia. Os resultados para estas localizações são apresentados em separado.

Em comparação com outros modelos, o modelo AquaCrop é relativamente mais compreensível de se utilizar, visto são necessários um pequeno conjunto de dados de entrada, sendo os mesmos fáceis de serem obtidos (Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). Esses dados incluem os relativos às características do **Clima** (Precipitação, Evapotranspiração de referência, Temperatura e Concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico), da **Cultura** (Estado de desenvolvimento da cultura, Evapotranspiração da cultura, Produção de Biomassa), das **Práticas agronómicas** (Rega e Fertilidade do solo) e do **Solo** (Características do solo e do nível da toalha freática).

O modelo encontra-se parametrizado por defeito para várias culturas, ou seja, os vários parâmetros que permitem caracterizar as culturas encontram-se pré-definidos assim como os seus valores os quais são disponibilizados ao utilizador.

A seleção do modelo também foi feita uma vez que este já foi previamente validado/calibrado para as culturas em questão (batata, milho e trigo) nomeadamente para Portugal Continental e/ou para a vários locais da bacia do Mediterrâneo (e.g. Paredes *et al.*, 2014).

Os dados de entrada que dizem respeito ao **clima** e ao **solo** já foram referenciados nomeadamente nos Capítulos 3.1 e 3.2. No que diz respeito aos dados relativamente à **cultura** estes foram retirados do Quadro 4 e da pesquisa bibliográfica feita, o que resultou na informação que foi utilizada no presente estudo e que se encontra no Quadro 8. Para todos os outros parâmetros que não se encontram no Quadro 8, foram utilizados os valores por defeito do modelo e que se encontram descritos por Raes *et al.*, (2012).

Quadro 8 - Valores adotados para os diferentes parâmetros do modelo AquaCrop.

Descrição	Unidades ou significado do símbolo	Adotado		
		Trigo	Milho	Batata
<b>Parâmetros conservativos</b>				
Limite de depleção de água no solo para a expansão do coberto	Limite superior	0.2 <sup>a</sup>	0.14 <sup>h</sup>	0.20 <sup>o</sup>
Limite da depleção de água no solo para a expansão do coberto	Limite inferior	0.55 <sup>a</sup>	0.72 <sup>h</sup>	0.60 <sup>o</sup>
Fator de forma do coeficiente de stress hídrico para a expansão do coberto	Curvatura moderadamente convexa	5 <sup>b</sup>	2.9 <sup>h</sup>	3 <sup>o</sup>
Limite da depleção de água no solo para a o controlo estomático	Fração da reserva utilizável para a qual se inicia o fecho estomático	0.65 <sup>c</sup>	0.69 <sup>h</sup>	0.55 <sup>p</sup>
Fator de forma do coeficiente de stress hídrico para o controlo estomático	Curva extremamente convexa	2.5 <sup>b</sup>	6.0 <sup>h</sup>	3 <sup>p</sup>
Limite da depleção de água no solo para a falha da polinização	Fração da reserva utilizável para a qual a polinização deixa de ocorrer	0.85 <sup>b</sup>	0.80 <sup>i</sup>	Não aplicável
Limite da depleção de água no solo para a senescência do coberto – limite superior				0.70 <sup>p</sup>
Coeficiente cultural quando CC <sub>x</sub>	Coeficiente cultural basal (K <sub>cTr,x</sub> )	1.10 <sup>b</sup>	1.18 <sup>j</sup>	1.15 <sup>q</sup>
WP*	Produtividade da água para a biomassa normalizada para a ET <sub>o</sub> e CO <sub>2</sub> (g m <sup>-2</sup> )	15 <sup>b</sup>	33.7 <sup>l</sup>	19 <sup>q</sup>
HI <sub>o</sub>	Índice de colheita de referência (%)	46 <sup>d</sup>	50 <sup>m</sup>	80 <sup>r</sup>
<b>Parâmetros da curva da cobertura do solo pela cultura</b>				
Cobertura do solo pela cultura após 90% da emergência (CC <sub>o</sub> )	cm <sup>2</sup> por planta	1.5 <sup>a</sup>	6.5 <sup>n</sup>	10 <sup>q</sup>
Densidade de sementeira	pl/ha	3500000 <sup>e</sup>	82000 <sup>j</sup>	51000 <sup>s</sup>
Máxima cobertura do solo pelo coberto, CC <sub>x</sub>	%	95 <sup>f</sup>	97 <sup>j</sup>	96 <sup>q</sup>
Coeficiente de desenvolvimento do coberto, CGC	% GDD <sup>-1</sup>	0.60 <sup>g</sup>	1.49 <sup>j</sup>	1.49 <sup>q</sup>
Coeficiente de declínio do coberto, CDC	% GDD <sup>-1</sup>	0.40 <sup>a</sup>	0.40 <sup>j</sup>	0.38 <sup>q</sup>

Fonte de dados: a (Saab *et al.*, 2021); b (Raes *et al.*, 2012); c (Zeleeke & Nendel., 2020); d (Toumi *et al.*, 2016); e (Hui-mim *et al.*, 2017); f Zhang *et al.*, (2022); g (Trombetta *et al.*, 2016); h (Sandhu & Irmak., 2019); i (Guo *et al.*, 2020); j (Paredes *et al.*, 2014); l (Corbari *et al.*, 2021); m (Ran *et al.*, 2018); n (Kuschel-Otárola *et al.*, 2020); o (Dewedar *et al.*, 2021); p (Montoya *et al.*, 2016); q (Linker *et al.*, 2016); r (Zhang *et al.*, 2019).

Nas **práticas agrícolas** no que diz respeito à fertilidade do solo dada a ausência de informação adequada ao estudo assumiu-se que desde a plantação/sementeira da cultura no solo até à sua colheita, nunca existiu défice de nutrientes. Na gestão da rega tendo também em consideração as características dos diferentes solos referidas no Capítulo 3.2, convencionou-se que o limiar para a aplicação de rega nunca seria inferior ao limite da reserva facilmente utilizável, ou seja, os calendários de rega foram definidos para que não ocorresse stress hídrico. Assim, impediu-se a ocorrência do fecho dos estomas, o que limita a produção. Deste modo a cultura irá desenvolver-se em condições ótimas, pois irá estar sempre numa zona de conforto hídrico.

### **3.4.2 - Construção de cenários de gestão das culturas**

Na presente dissertação como já foi mencionado anteriormente, o estudo incide sobre três culturas, a batata, o milho e o trigo. Para cada uma das culturas foram definidas, com base na literatura (e.g. Paredes *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2017; EDIA, 2020, 2021), três datas de sementeira/plantação, uma denominada de normal e que corresponde à data média usualmente utilizada pelos agricultores, uma precoce, e que corresponde à antecipação da data de sementeira/plantação e uma tardia, ou seja, que corresponde adiantamento da data (a qual pode ocorrer por questões de gestão de maquinaria, trabalho ou do solo).

Assim, para o trigo foram selecionadas as seguintes datas: precoce – 31 de Outubro; “normal” – 15 de Novembro; e tardia – 15 de Dezembro enquanto para o milho foram definidas as seguintes datas: precoce – 15 de Abril; “normal” – 30 de Abril; e tardia – 15 de Maio. .

Para a batata dependendo da região agrária, onde se instale a cultura em questão, determinaram-se diferentes datas de plantação. Para a região do Entre Douro e Minho, Trás-os-Montes e Beiras (Beira Interior e Beira Litoral) as datas de sementeira escolhidas foram as seguintes: precoce – 15 de Março; “normal” – 1 de Abril; e tardia – 15 de Abril. Nas regiões do Ribatejo e Oeste, Alentejo e Algarve definiram-se as seguintes datas: precoce – 20 de Dezembro; “normal” – 10 de Janeiro; e tardio – 31 de Janeiro.

### **3.4.3 – Determinação dos anos de seca severa**

Depois de fazer as simulações dos calendários de rega anteriormente referidos para todos os anos da série de dados climáticos (41 anos) apenas alguns dos dados de saída do modelo AquaCrop foram selecionados (Figura 6) para apresentação dos resultados e sua discussão. De modo a determinar os anos de procura climática forte ou seca severa (Rodrigues *et al.*, 2003; Paredes & Rodrigues., 2010), ajustou-se à série de necessidades líquidas de rega (NLR, mm) uma função de distribuição normal.

	A	B	C	D	E	F
1	Ano	Precipitação (mm)	Eto (mm)	Rega (mm)	BioMassa (t/ha)	Produtividade (t/ha)
2	1979	198	437	337	27.357	13.578
3	1980	139	440	342	28.738	14.369
4	1981	125	442	385	26.466	13.233
5	1982	163	434	293	28.375	14.187
6	1983	251	431	250	30.105	15.053
7	1984	274	445	315	28.564	14.282
8	1985	205	444	332	28.032	14.016
9	1986	135	450	386	28.960	14.480
10	1987	132	432	332	25.608	12.804
11	1988	328	440	277	29.368	14.684
12	1989	154	439	357	25.535	12.768
13	1990	86	444	367	26.169	13.084
14	1991	81	440	359	26.796	13.398
15	1992	276	443	313	28.439	14.220
16	1993	361	439	286	28.151	14.076
17	1994	288	451	347	30.584	15.292
18	1995	143	434	329	25.976	13.488
19	1996	152	446	382	28.387	14.194
20	1997	433	426	240	28.183	14.092
21	1998	179	442	358	26.388	13.194
22	1999	179	448	318	29.267	14.633
23	2000	145	443	320	29.717	14.858
24	2001	146	439	335	29.026	14.513
25	2002	281	439	301	30.138	15.069
26	2003	164	440	328	28.133	14.067
27	2004	202	434	314	29.502	14.751
28	2005	67	443	391	26.869	13.435
29	2006	118	436	344	27.172	13.586
30	2007	267	438	298	29.315	14.658
31	2008	301	452	308	30.664	15.332
32	2009	163	448	338	29.733	14.866
33	2010	91	444	388	25.990	12.995
34	2011	164	442	321	30.119	15.059
35	2012	120	447	341	30.069	15.034
36	2013	105	458	378	26.202	13.101
37	2014	287	438	266	29.976	14.988
38	2015	73	443	364	28.877	14.439
39	2016	123	452	380	26.244	13.122
40	2017	88	440	369	28.695	14.347
41	2018	212	424	302	28.219	14.109
42	2019	117	444	327	29.575	14.787

Figura 6 - Exemplo dos dados de saída do modelo AquaCrop para a cultura do milho para a data de sementeira de 15 de Maio.

O primeiro passo consiste na ordenação crescente do valor das NLR da série e depois determina-se a probabilidade de ocorrência ou frequência empírica de Horton para cada ano ao qual estão associadas as distintas características das outras variáveis consideradas. A frequência empírica de Horton ( $P_H$ , %) é calculada como:

$$P_H = \frac{R_i}{(N+1)} \quad (5a)$$

onde  $R_i$  é a posição do valor na série de valores ordenados por ordem crescente e  $N$  é o número de valores da série.

Determinando-se assim o ano com características de procura climática forte ao qual corresponde a seca severa, sendo as condições climáticas destes anos as que correspondem a uma probabilidade de não excedência de 80% (Rodrigues et al., 2003; Paredes & Rodrigues., 2010). Um exemplo da determinação do ano de seca severa para a cultura do milho é apresentado na Figura 7.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Ano	Precipitação (mm)	ETo (mm)	Rega (mm)	BioMassa (t/ha)	Produtividade (t/ha)	P(i) (%)
2	1997	433	426	240	28.183	14.092	2
3	1983	251	431	250	30.105	15.053	5
4	2014	287	438	266	29.976	14.988	7
5	1988	328	440	277	29.368	14.684	10
6	1993	361	439	286	28.151	14.076	12
7	1982	163	434	293	28.375	14.187	14
8	2007	267	438	298	29.315	14.658	17
9	2002	281	439	301	30.138	15.069	19
10	2018	212	424	302	28.219	14.109	21
11	2008	301	452	308	30.664	15.332	24
12	1992	276	443	313	28.439	14.220	26
13	2004	202	434	314	29.502	14.751	29
14	1984	274	445	315	28.564	14.282	31
15	1999	179	448	318	29.267	14.633	33
16	2000	145	443	320	29.717	14.858	36
17	2011	164	442	321	30.119	15.059	38
18	2019	117	444	327	29.575	14.787	40
19	2003	164	440	328	28.133	14.067	43
20	1995	143	434	329	26.976	13.488	45
21	1985	205	444	332	28.032	14.016	48
22	1987	132	432	332	25.608	12.804	50
23	2001	146	439	335	29.026	14.513	52
24	1979	198	437	337	27.357	13.678	55
25	2009	163	448	338	29.733	14.866	57
26	2012	120	447	341	30.069	15.034	60
27	1980	139	440	342	28.738	14.369	62
28	2006	118	436	344	27.172	13.586	64
29	1994	288	451	347	30.584	15.292	67
30	1989	154	439	357	25.535	12.768	69
31	1998	179	442	358	26.388	13.194	71
32	1991	81	440	359	26.796	13.398	74
33	2015	73	443	364	28.877	14.439	76
34	1990	86	444	367	26.169	13.084	79
35	2017	88	440	369	28.695	14.347	81
36	2013	105	458	378	26.202	13.101	83
37	2016	123	452	380	26.244	13.122	86
38	1996	152	446	382	28.387	14.194	88
39	1981	125	442	385	26.466	13.233	90
40	1986	135	450	386	28.960	14.480	93
41	2010	91	444	388	25.990	12.995	95
42	2005	67	443	391	26.869	13.435	98

Figura 7 - Exemplo da determinação do ano correspondente à seca severa e respectivas características para a cultura do milho.

### 3.4.4 Avaliação dos cenários com base na produtividade da água

A avaliação dos calendários de rega é uma ferramenta útil para promover a poupança e a produtividade da água, sendo também bastante útil no que toca ao apoio à decisão dos agricultores (Pereira *et al.*, 2012). Assim, de modo a avaliar os diferentes cenários foi efetuada com base na produção em termos de uso da água, na produtividade das culturas e na produtividade da água (WP, kg m<sup>-3</sup>). O termo produtividade da água é estipulado e utilizado de diversas formas (Figura 8).

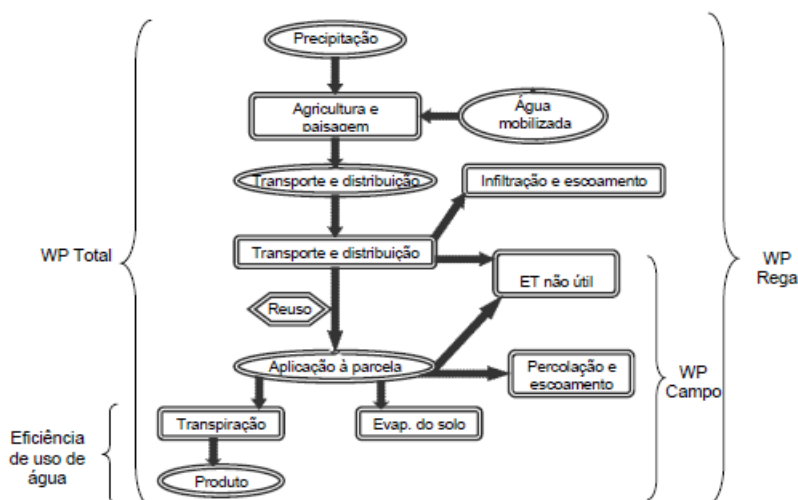


Figura 8 - Diferentes definições de produtividade da água e eficiência do uso da água. (Adaptado de Pereira *et al.*, 2012)

A produtividade da água ao nível da parcela quando referida em termos físicos, trata-se da razão entre a produção final e a água utilizada, incluindo a precipitação (Pereira *et al.*, 2012, 2020).

$$WP_{TWU} = \frac{Y_a}{TWU} \quad (6a)$$

onde  $Y_a$  é a produção final real (kg) e TWU é o total de água utilizada ( $m^3$ ).

No presente trabalho não se utilizou a quantidade total de água utilizada, mas a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ).

$$WP_{ET_c} = \frac{Y_a}{ET_c} \quad (6b)$$

Todos os resultados foram espacializados usando o software QGIS versão 3.8.3.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Duração dos ciclos culturais

Como anteriormente descrito foram considerados, para as três culturas selecionadas, vários cenários de gestão da cultura, em particular a alteração das datas de sementeira/plantação. Assim, de acordo com as distintas datas de sementeira/plantação e usando a série longa de dados climáticos foi possível calcular e analisar a duração dos ciclos culturais.

No que diz respeito à cultura do trigo (Figura 9), para a data de sementeira precoce (final de outubro), a duração média do ciclo cultural é de 191 ( $\pm 22,8$ ) e varia entre 152 e 237 dias. Quanto à data de sementeira normal (novembro), devido ao aumento da temperatura média a duração média do ciclo cultural decresce para 185 ( $\pm 17,7$ ) dias em média, sendo que varia entre 148 e 229 dias. Finalmente, na data de sementeira tardia (dezembro), como consequência de temperaturas médias ainda mais elevadas a duração decresce para 168 ( $\pm 13,1$ ) dias em média que varia entre 140 e 200 dias.

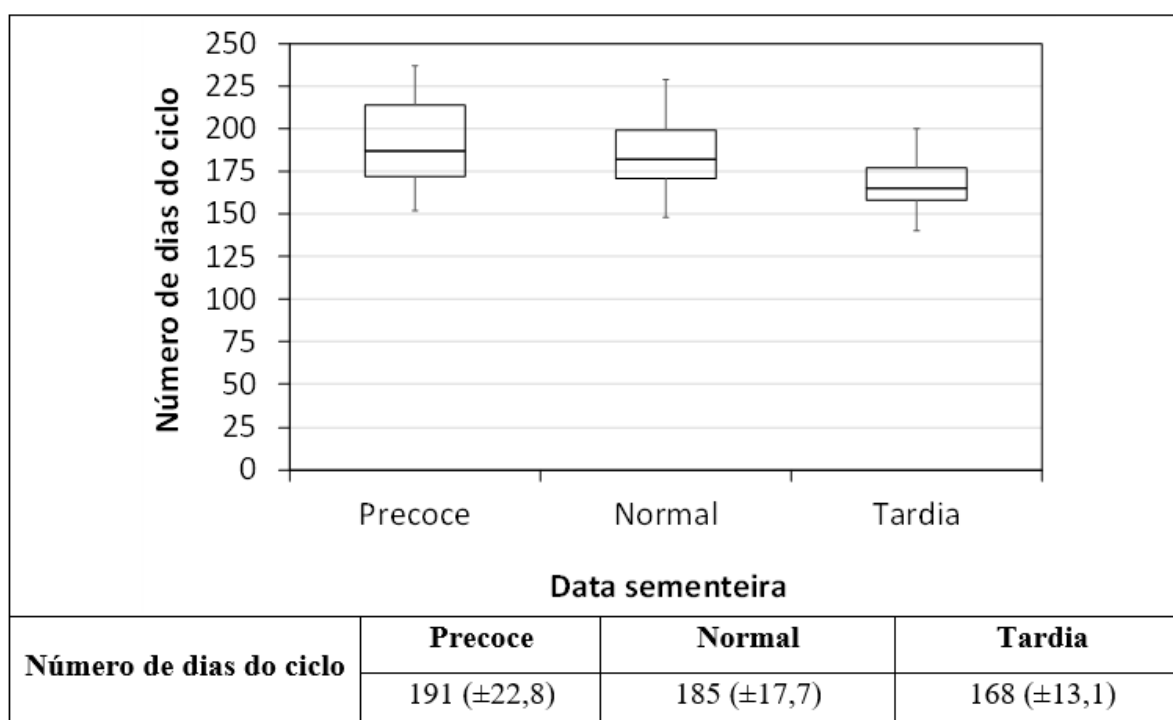


Figura 9 - Diagrama de extremos e quartis referente aos números de dias do ciclo cultural do trigo de acordo com a data de sementeira utilizada (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo).

Para a cultura da batata (Figura 10), para a data de plantação precoce (março e dezembro respetivamente para região do norte e sul), a duração média do ciclo cultural é de 130 ( $\pm 14,5$ ) que varia entre 102 e 160 dias. Verificou-se a ocorrência de um valor espúrio (216 dias). Este valor foi obtido num ponto o qual pertence ao distrito de Beja. A existência deste valor deve-se ao facto de terem sido atingidas temperaturas superiores às quais as atividades metabólicas

das plantas da batata cessam, prolongando assim a duração do seu ciclo cultural. Relativamente à data de plantação normal (abril e janeiro), em consequência do aumento da temperatura média a duração do ciclo cultural diminui para 122 ( $\pm 13,2$ ) dias em média variando entre 98 e 157 dias. Por último, na data de plantação tardia (meados de abril e de janeiro), tendo em conta que as temperaturas médias são ainda mais elevadas a duração do ciclo cultural decresce para 115 ( $\pm 11,0$ ) dias em média que varia entre 91 e 140 dias.

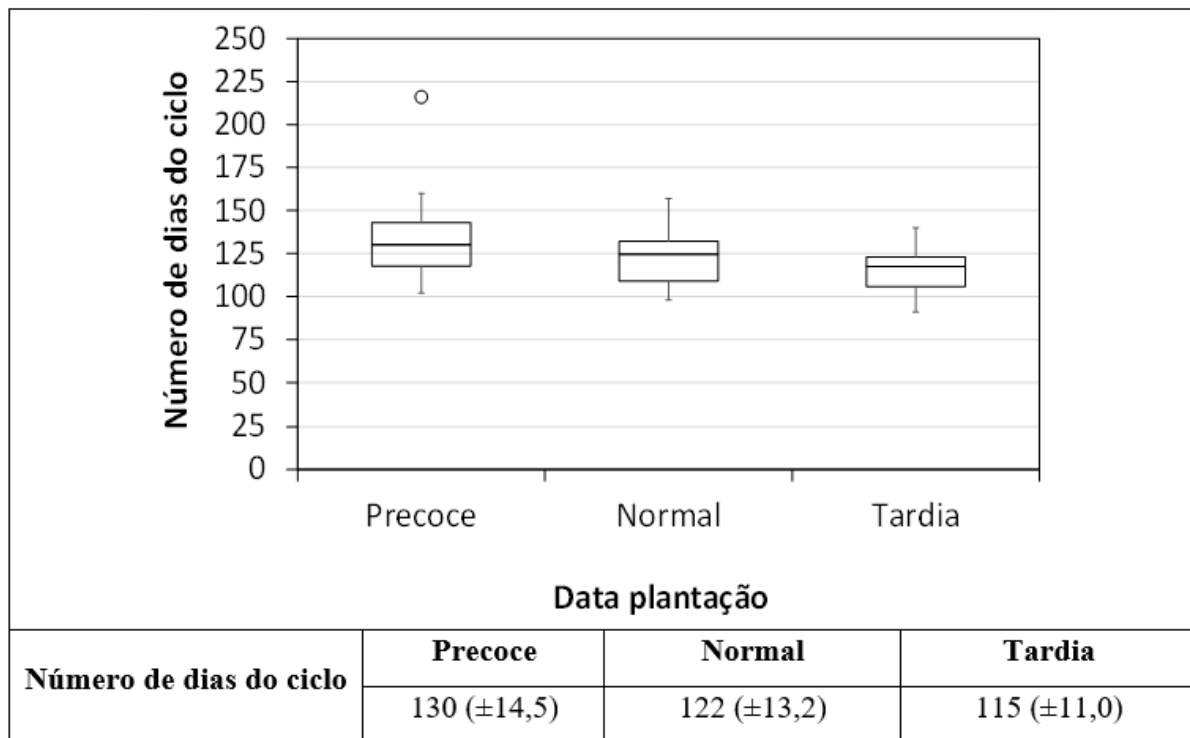


Figura 10 - Diagrama de extremos e quartis referente aos números de dias do ciclo cultural da batata de acordo com a data de plantação utilizada (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo;  $\circ$  representam os valores atípicos/outliers).

Por último, no que diz respeito à cultura do milho (Figura 11), os resultados obtidos para a data de sementeira precoce (meados de abril), indicam que a duração média do ciclo cultural é de 136 ( $\pm 9,0$ ) e varia entre 119 e 162 dias. Em relação à data de sementeira normal (final de abril) e tendo em conta que a temperatura média vai aumentar com adiar da data de sementeira, esta apresenta uma duração média de 128 ( $\pm 10,4$ ) dias que varia entre 115 e 160 dias. Por fim, na data de sementeira tardia (maio), como foi referido anteriormente, com o aumento contínuo das temperaturas médias a duração do ciclo diminui para 123 ( $\pm 8,6$ ) dias em média que varia entre 98 e 145 dias.

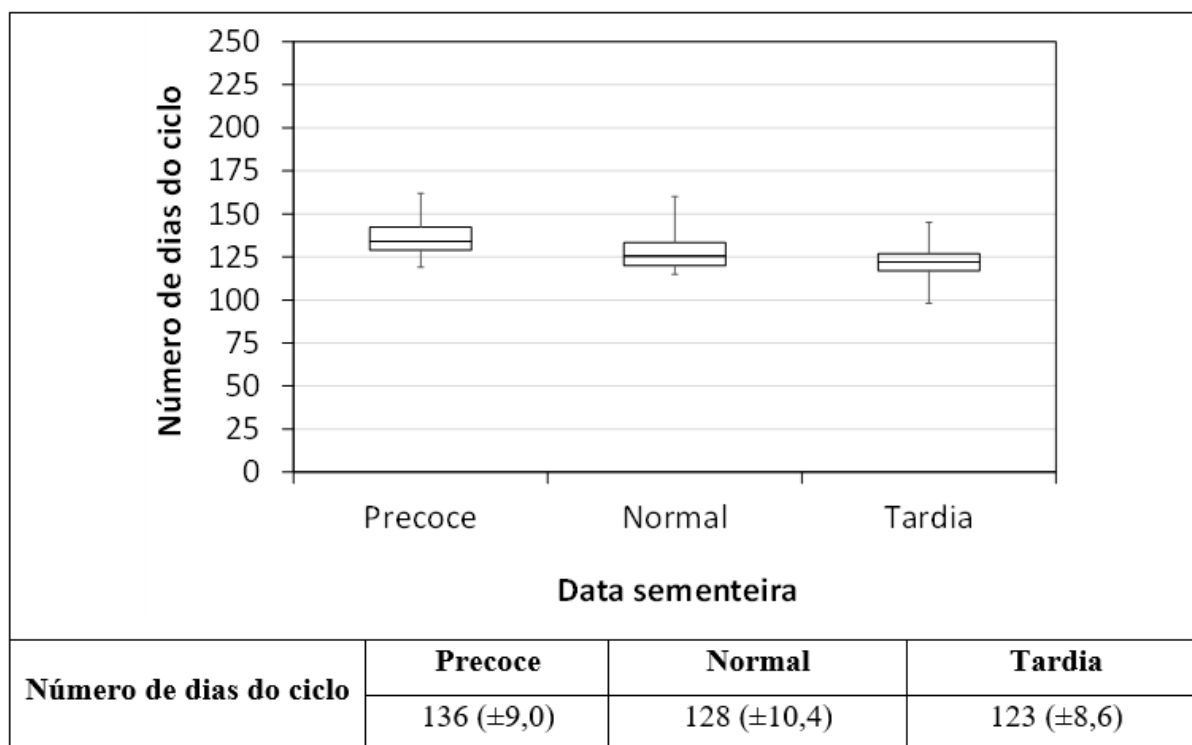


Figura 11 - Diagrama de extremos e quartis referente aos números de dias do ciclo cultural do milho de acordo com a data de sementeira utilizada (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo).

Os resultados obtidos permitiram inferir que, de um modo geral, com o atrasar da sementeira/plantação o número de dias dos ciclos culturais das três culturas diminui. Isto porque com o adiar da sementeira/plantação as culturas vão estar sujeitas a temperaturas mais elevadas, o que vai originar maiores valores de acumulação térmica num menor espaço de tempo e por isso as culturas atingem as diferentes fases do ciclo cultural mais rapidamente. Por outro lado, as culturas ao estarem expostas a uma maior quantidade de radiação solar vão aumentar a produção de fotoassimilados, o que vai ter impacto na produtividade final bem como na duração do ciclo cultural. Adicionalmente, uma vez que a cultura se irá desenvolver num menor espaço de tempo a produção de biomassa decresce e consequentemente a produtividade vai diminuir. Estes resultados são semelhantes aos descritos em vários estudos (Salvi *et al.*, 2007; Buckler *et al.*, 2009; Bouchet *et al.*, 2013; Navarro *et al.*, 2017). Assim, verifica-se que a utilização de acumulação térmica é uma boa ferramenta para o apoio à decisão em termos de gestão das culturas nomeadamente da data de sementeira/plantação.

No caso da cultura do milho, para a zona Norte do país e para algumas datas de sementeira, foi necessário adotar um milho de ciclo mais curto, uma vez que o ciclo não se podia completar dentro de um período razoável. Esses resultados não foram incluídos na Figura 10 uma vez que se estaria a comparar condições distintas. Os distritos onde se utilizou uma variedade de milho de ciclo mais curto foram: Viana do Castelo, em que os resultados obtidos para a data de

sementeira precoce, indicam que a duração média do ciclo cultural é de 127 ( $\pm 15,8$ ) dias, em relação à data de sementeira normal o número de dias médio para completar o ciclo é de 130 ( $\pm 12,0$ ) dias e por último na data de sementeira tardia o ciclo apresenta uma duração média de 109 ( $\pm 11,3$ ) dias; Vila Real, para a data de sementeira precoce a duração média do ciclo cultural é de 117 ( $\pm 11,5$ ) dias, para a data de sementeira normal o número de dias médio para completar o ciclo é de 111 ( $\pm 8,7$ ), por fim para a data de sementeira tardia o ciclo apresenta uma duração média de 104 ( $\pm 5,9$ ) dias; Bragança, para a data de sementeira precoce, a duração média do ciclo cultural é de 109 ( $\pm 6,5$ ) dias, relativamente à data de sementeira normal a duração média do ciclo cultural é de 98 ( $\pm 7,5$ ) dias e por último na data de sementeira tardia o ciclo apresenta uma duração média de 94 ( $\pm 7,6$ ) dias; Braga, para a data de sementeira precoce só se utilizou a variedade de milho de ciclo curto em dois pontos da grelha, tendo apresentado um ciclo cultural com uma duração média de 113 ( $\pm 5,0$ ) dias, para a data de sementeira normal utilizou-se a variedade de milho de ciclo curto em três pontos da grelha, tendo-se obtido uma duração média de 127 ( $\pm 8,6$ ) dias, na data de sementeira tardia o ciclo apresenta uma duração média de 103 ( $\pm 4,2$ ) dias; por último o distrito do Porto, para a data de sementeira precoce e normal só se utilizou a variedade de milho de ciclo curto em um dos pontos da grelha, tendo apresentado uma duração de 120 ( $\pm 0$ ) e de 107 ( $\pm 0$ ), dias respetivamente, no que diz respeito à data de sementeira tardia esta possui uma duração média de 102 ( $\pm 4,0$ ) dias.

#### **4.2. Necessidades líquidas de rega e produtividade das culturas em contexto de seca severa**

Como anteriormente referido a determinação das necessidades líquidas de rega e da produtividade das culturas foi efetuada usando o modelo AquaCrop e tendo em consideração os distintos cenários de gestão das culturas em contexto de seca severa. Assim, e numa perspetiva de apoio à decisão por parte do agricultor a análise dos resultados é baseada nas principais variáveis climáticas que influenciam quer as necessidades de rega como a produtividade, ou seja, a disponibilidade de água da precipitação e a procura climática ( $ET_0$ ). A distribuição espacial destes resultados é apresentada nas Figuras 12 a 14. Os resultados são apresentados em termos de valores acumulados durante o ciclo de cada cultura. Nos casos anteriormente descritos em que se utilizou uma variedade de milho com ciclo mais curto os dados apresentados nas figuras referem-se à utilização de uma interpolação dos pontos mais próximos da grelha usando a metodologia do *kriging* ordinário.

## *Trigo*

Pela análise da Figura 12 verifica-se que, como seria de esperar, em todas as datas de sementeira, a maior quantidade de precipitação está localizada a Norte de Portugal variando entre 219-2302 mm, enquanto a Sul varia de 74 mm a 1169 mm. De salientar que nas localidades de Viana do Castelo, Braga e Porto existe uma elevada precipitação que mesmo em condições de seca severa pode atingir os 2302 mm. Tal pode explicar-se pela elevada drenagem profunda e escoamento superficial que está associada aos eventos de precipitação de elevada intensidade que ocorrem nessas localidades, sendo que a água proveniente da precipitação acaba por não se encontrar disponível para as plantas.

Verifica-se que da data de sementeira precoce (final de outubro) para a normal (meados de novembro), existe de um modo generalizado um decréscimo da precipitação. Esse decréscimo teve maior expressão na zona Centro com um decréscimo médio de 63 mm, depois na zona Norte com 24 mm, seguindo-se o Alentejo com 10 mm e por último a zona do Algarve com 6 mm. Com a exceção da Área Metropolitana de Lisboa onde se obteve um aumento de 13 mm.

Analisando os resultados da data de sementeira normal (meados de novembro) para a tardia (meados de dezembro), no que diz respeito à precipitação obteve-se uma diminuição considerável para todas as regiões. A que apresentou maior diminuição foi a região Norte com 114 mm, seguindo-se a região Centro com 73 mm, o Alentejo com 44 mm, a Área Metropolitana de Lisboa com 41 mm e por último a região do Algarve com 26 mm. Quanto à  $ET_o$ , a Área Metropolitana de Lisboa e o Alentejo foram as regiões que sofreram o maior aumento, de 60 mm, seguindo-se a região do Algarve com 47 mm, a região Centro com 42 mm e por fim a região Norte com 38 mm.

A procura climática ( $ET_o$ ) apresenta um padrão relativamente semelhante à precipitação, no entanto, verifica-se uma procura climática elevada na região de Trás-os-Montes. Assim, de um modo geral obteve-se um aumento para todas as regiões quando se adia a data de sementeira. O maior aumento médio foi obtido na região do Algarve com 46 mm, seguindo-se o Alentejo com 39 mm, depois a Área Metropolitana de Lisboa com 36 mm, a região do Norte com 30 mm e por fim a região Centro com 16 mm.

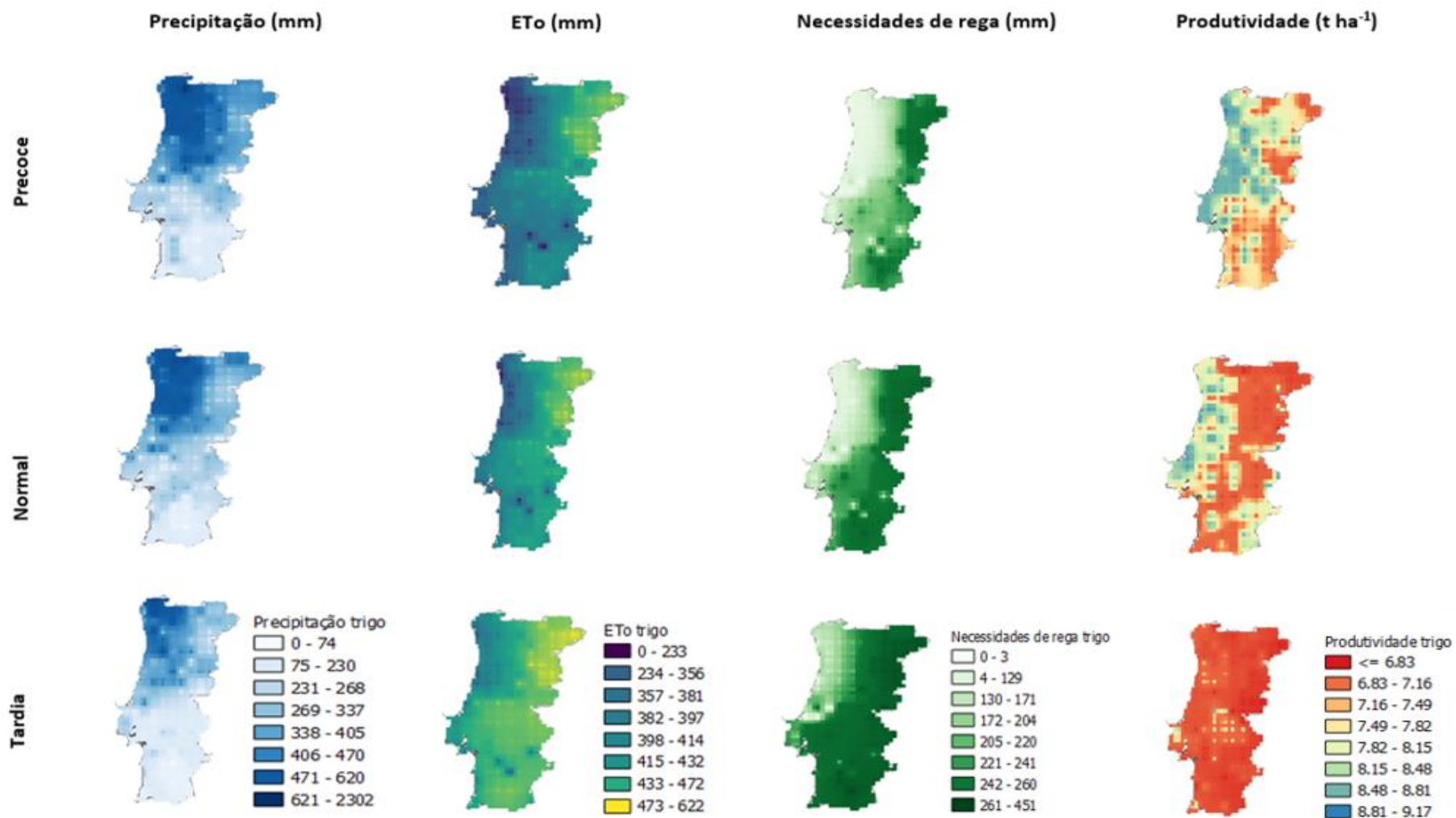


Figura 12 - Representação espacial dos resultados obtidos para as diferentes variáveis (precipitação, evapotranspiração de referência, necessidades de rega e produtividade) para a cultura do trigo de acordo com a data de sementeira (precoce, normal e tardia)

No que diz respeito às necessidades de rega verifica-se para todo o país que quando a data de sementeira é precoce estas são mais baixas e vão aumentando à medida que se adia a data de sementeira. Em termos espaciais verifica-se NLR mais baixas nas regiões costeiras em particular a Norte do Rio Tejo. Quando se analisa a produtividade verifica-se que os locais mais produtivos em condições de seca severa e recorrendo a rega de complemento são: a Área Metropolitana de Lisboa e toda a região Centro e Norte Litoral.

De modo a facilitar a análise espacial das necessidades líquidas de rega e da produtividade do trigo os resultados foram agregados como é efetuado nas estatísticas nacionais (INE), ou seja, ao nível das NUTS II (Quadro 9).

Os resultados no Quadro 9 indicam que para a data de sementeira precoce para a normal para a cultura do trigo, as necessidades líquidas de rega apresentam um comportamento idêntico ao da  $ET_0$ , obteve-se um aumento generalizado para todas as regiões. A região em que se obteve um maior aumento foi no Alentejo com 37 mm, depois na região do Algarve com 36 mm, seguindo-se o Norte e Centro com 30 mm e por último a Área Metropolitana de Lisboa com 25 mm.

Quanto à produtividade, verifica-se que existe uma pequena variabilidade entre NUTS II para cada data de sementeira sendo que a data precoce é mais favorável devido à obtenção de uma maior produtividade ainda que a diferença seja pouco expressiva. O valor mais baixo obtido foi de  $6,83 \text{ t ha}^{-1}$  no distrito de Portalegre e o valor mais alto registado foi de  $9,17 \text{ t ha}^{-1}$  no distrito de Braga.

Assim, verifica-se que a produtividade tende a decrescer da sementeira precoce (final de outubro) para a normal (meados de novembro) em todas as NUTS. A região em que se verificou a maior diminuição foi na do Norte com  $0,28 \text{ t ha}^{-1}$  depois a do Centro com  $0,26 \text{ t ha}^{-1}$ , o Alentejo com  $0,11 \text{ t ha}^{-1}$  e por último a Área Metropolitana de Lisboa com uma quebra de  $0,05 \text{ t ha}^{-1}$ , estas variações correspondem a 3,5%, 3,2%, 1,4% e 0,6%, respetivamente. Exceto na região do Algarve, em que se obteve um aumento de  $0,04 \text{ t ha}^{-1}$ , o que corresponde a um crescimento de 0,5%.

Analisando os resultados da data normal (meados de novembro) para a tardia (meados de dezembro) (Quadro 9), quanto às necessidades líquidas de rega a Área Metropolitana de Lisboa foi a que registou o maior aumento com 71 mm, seguindo-se a região do Alentejo 67 mm, depois a região do Algarve com 62 mm, a região Centro com 57 mm e por fim a região Norte com 46 mm.

Por último de um modo geral, para a produtividade obteve-se uma redução para todas as regiões. A região em que se verificou ter sido maior foi na Área Metropolitana de Lisboa com  $0,44 \text{ t ha}^{-1}$ , o que corresponde a uma redução de 5,5%, segue-se a região Centro com  $0,43 \text{ t ha}^{-1}$ , a do Algarve com  $0,42 \text{ t ha}^{-1}$ , depois a região do Alentejo com  $0,36 \text{ t ha}^{-1}$  e por último a do Norte com uma quebra de 4,3% ou seja  $0,33 \text{ t ha}^{-1}$ .

*Quadro 9 - Necessidade de rega e produtividade média da cultura do trigo de acordo com as diferentes datas de sementeira para as diferentes regiões de Portugal continental (NUTSII).*

NUTS II	Data de Sementeira	Cultura	Necessidades de rega (mm)	Produtividade (t/ha)
Norte	Precoce	Trigo	189	8,04
Centro			183	8,15
Área Metropolitana de Lisboa			168	8,05
Alentejo			232	8,01
Algarve			237	7,88
NUTS II	Data de Sementeira	Cultura	Necessidades de rega (mm)	Produtividade (t/ha)
Norte	Normal	Trigo	219	7,76
Centro			213	7,89
Área Metropolitana de Lisboa			193	8,00
Alentejo			269	7,90
Algarve			273	7,92
NUTS II	Data de Sementeira	Cultura	Necessidades de rega (mm)	Produtividade (t/ha)
Norte	Tardia	Trigo	265	7,43
Centro			270	7,46
Área Metropolitana de Lisboa			264	7,56
Alentejo			336	7,54
Algarve			335	7,50

## **Batata**

Verifica-se pela análise da Figura 13 que para todas as datas de plantação, a maior quantidade de precipitação encontra-se circunscrita às regiões Norte e Centro Litoral de Portugal variando entre 23 – 948 mm, ao passo que a Sul vai variar de 6 mm a 613 mm. De destacar que os distritos de Viana do Castelo, Braga, Porto, Aveiro e Coimbra, são os que mesmo em condições de seca severa apresentam uma elevada precipitação.

Tendo em consideração a data de plantação, precoce (meados de março a norte e meados de dezembro a sul) para a normal (abril a norte e janeiro a sul), verificou-se que ocorreu um decréscimo médio da precipitação com maior destaque na região Norte com uma redução de 77 mm, seguindo-se o Alentejo com uma diminuição de 37 mm, a região Centro com 36 mm, a região do Algarve com 10 mm e por último a Área Metropolitana de Lisboa com 3 mm.

No caso da  $ET_0$ , na região Norte ocorreu uma redução desprezável (de 1 mm), ao passo que nas outras NUTS II a  $ET_0$  aumentou. A região em que se obteve um maior aumento foi na região do Algarve com 29 mm, seguindo-se a Área Metropolitana de Lisboa com 28 mm, o Alentejo com 22 mm e por último a região Centro com 7 mm.

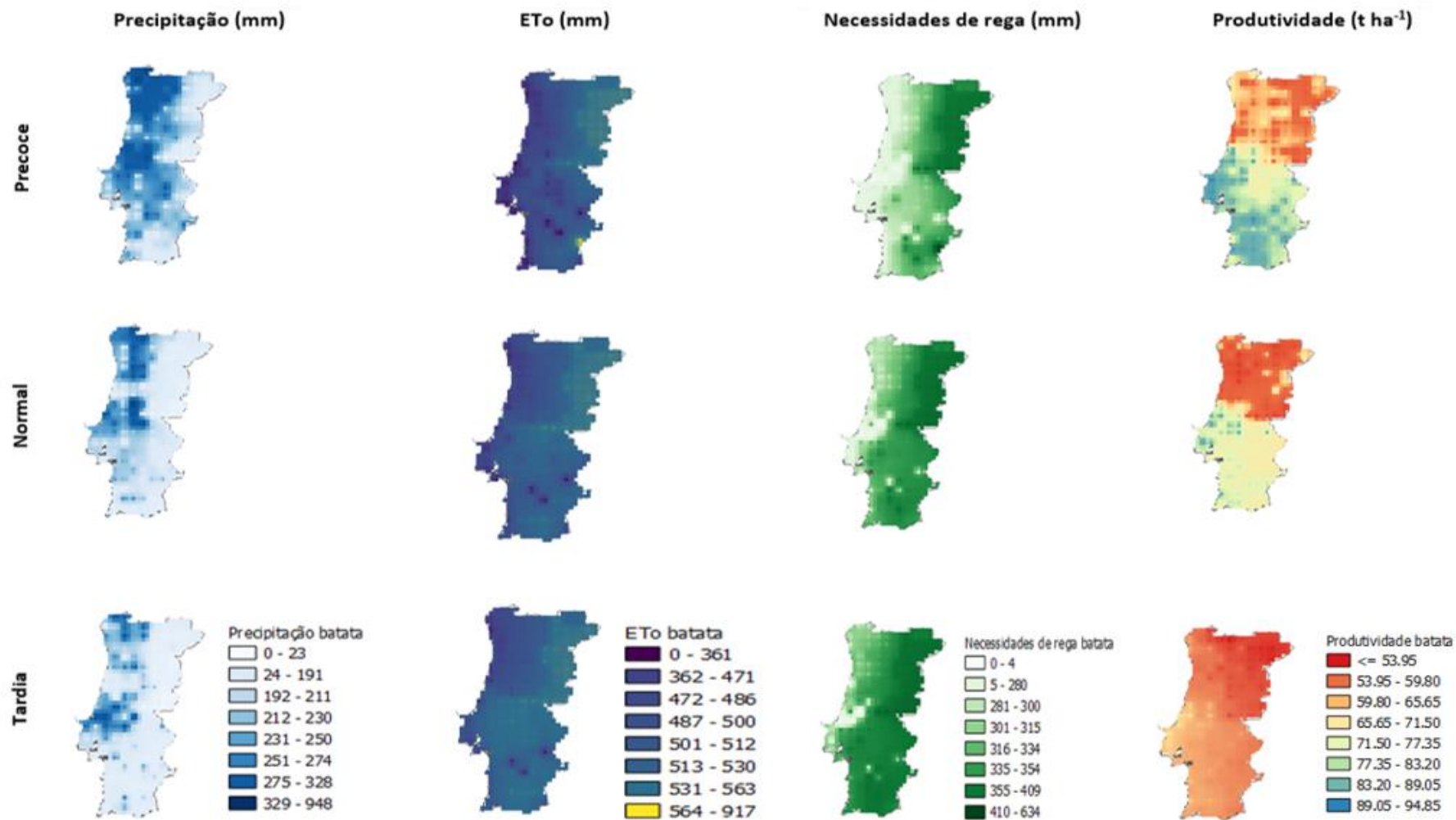


Figura 13 - Representação espacial dos resultados obtidos para as diferentes variáveis (precipitação, evapotranspiração de referência, necessidades de rega e produtividade) para a cultura da batata de acordo com a data de plantação (precoce, normal e tardia).

Analisando a data de plantação normal (abril a norte e janeiro a sul) para a tardia (meados de abril a norte e final janeiro a sul), verificou-se que em relação à precipitação, esta teve uma diminuição com maior expressão na Área Metropolitana de Lisboa com uma redução de 32 mm, seguindo-se da região Norte com 30 mm, a região Centro com 27 mm, o Alentejo com 23 mm e por último a região do Algarve registou um aumento desprezável (de 1 mm). No que diz respeito à  $ET_o$ , a região Norte foi a única em que ocorreu uma diminuição, tendo esta sido pouco expressiva (5 mm). Nas outras regiões a  $ET_o$  aumentou, tendo sido maior na Área Metropolitana de Lisboa com 29 mm, a região do Algarve com 21 mm, depois a do Alentejo com 20 mm e por último a região Centro com 4 mm.

No Quadro 10 são apresentados os resultados dos diferentes cenários de plantação da cultura da batata agregados ao nível das NUTS II. No que diz às necessidades líquidas de rega constata-se que para todo o país à medida que se atrasa a data de plantação, as necessidades de rega vão aumentando. Tendo em consideração a data de plantação precoce para normal, a Área Metropolitana de Lisboa foi a região que registou o maior aumento com 45 mm, seguindo-se a região do Algarve com 37 mm, o Alentejo com 33 mm, a região Centro com 22 mm e por último a região Norte com 16 mm.

Por último para a produtividade verificou-se uma redução para todas as regiões. A região em que se verificou ter sido maior foi a Área Metropolitana de Lisboa com uma quebra de 6,85 t ha<sup>-1</sup>, seguindo-se o Alentejo com 4,3 t ha<sup>-1</sup>, a região do Algarve com 3,7 t ha<sup>-1</sup>, a região Norte com 2,7 t ha<sup>-1</sup> e por último a região Centro com 2,4 t ha<sup>-1</sup>, estas variações correspondem a 8,0%, 5,3%, 4,6%, 4,0% e 3,5%, respetivamente. O valor mais baixo obtido foi de 53,95 t ha<sup>-1</sup> no distrito de Castelo Branco e o valor mais alto registado foi de 94,85 t ha<sup>-1</sup> na Área Metropolitana de Lisboa.

Para a data de plantação normal para tardia (Quadro 10), quanto às necessidades líquidas de rega a região do Algarve foi a que registou o maior aumento com 44 mm, seguindo-se da Área Metropolitana de Lisboa com 43 mm, o Alentejo com 34 mm, a região Centro com 16 mm e por fim a região Norte com 9 mm.

Quadro 10 - Necessidade de rega e produtividade média da cultura da batata de acordo com as diferentes datas de plantação para as diferentes regiões de Portugal continental (NUTSII).

NUTS II	Data de Plantação	Cultura	Necessidades de rega (mm)	Produtividade (t/ha)
Norte	Precoce	Batata	345	67,90
Centro			348	69,60
Área Metropolitana de Lisboa			256	85,90
Alentejo			330	80,65
Algarve			315	80,00
NUTS II	Data de Plantação	Cultura	Necessidades de rega (mm)	Produtividade (t/ha)
Norte	Normal	Batata	361	65,20
Centro			370	67,20
Área Metropolitana de Lisboa			301	79,05
Alentejo			363	76,35
Algarve			360	76,30
NUTS II	Data de Plantação	Cultura	Necessidades de rega (mm)	Produtividade (t/ha)
Norte	Tardia	Batata	370	65,10
Centro			386	64,40
Área Metropolitana de Lisboa			344	77,90
Alentejo			397	73,35
Algarve			396	71,60

Para a produtividade verificou-se uma redução para todas as regiões (Quadro 10). A região em que se verificou ter sido maior foi na região do Algarve com  $4,7 \text{ t ha}^{-1}$ , depois o Alentejo com  $3 \text{ t ha}^{-1}$ , a região Centro com  $2,8 \text{ t ha}^{-1}$ , a Área Metropolitana de Lisboa com  $1,15 \text{ t ha}^{-1}$  e por último a região Norte com uma quebra de  $0,1 \text{ ha}^{-1}$ , estas variações correspondem a 6,2%, 3,9%, 4,2%, 1,5% e 0,2%, respetivamente.

### **Milho**

No que diz respeito à precipitação que ocorre ao longo do ciclo da cultura do milho, em todas as datas de sementeira e tendo em consideração a Figura 14, verifica-se que a maior quantidade de precipitação está localizada a norte de Portugal variando entre 34 mm e 641 mm. De frisar que nos distritos de Viana do Castelo, Braga e Vila Real existe uma elevada precipitação mesmo em condições de seca severa.

Verifica-se que da data de sementeira, precoce (meados de abril) para a normal (final de abril), ocorreu um decréscimo da precipitação com maior destaque na região do Algarve com 37 mm, seguindo-se a região Centro com 35 mm, a região Norte com 33 mm, depois o Alentejo com 30 mm e por último na Área Metropolitana de Lisboa observou-se um aumento de 9 mm.

Quanto à  $ET_o$ , obteve-se um aumento generalizado em todas as regiões, a que apresentou maior aumento foi a região Centro com 39 mm, depois a região do Algarve com 38 mm, o Alentejo com 36 mm, seguindo-se a Área Metropolitana de Lisboa com 33 mm e por fim a região Norte com 28 mm.

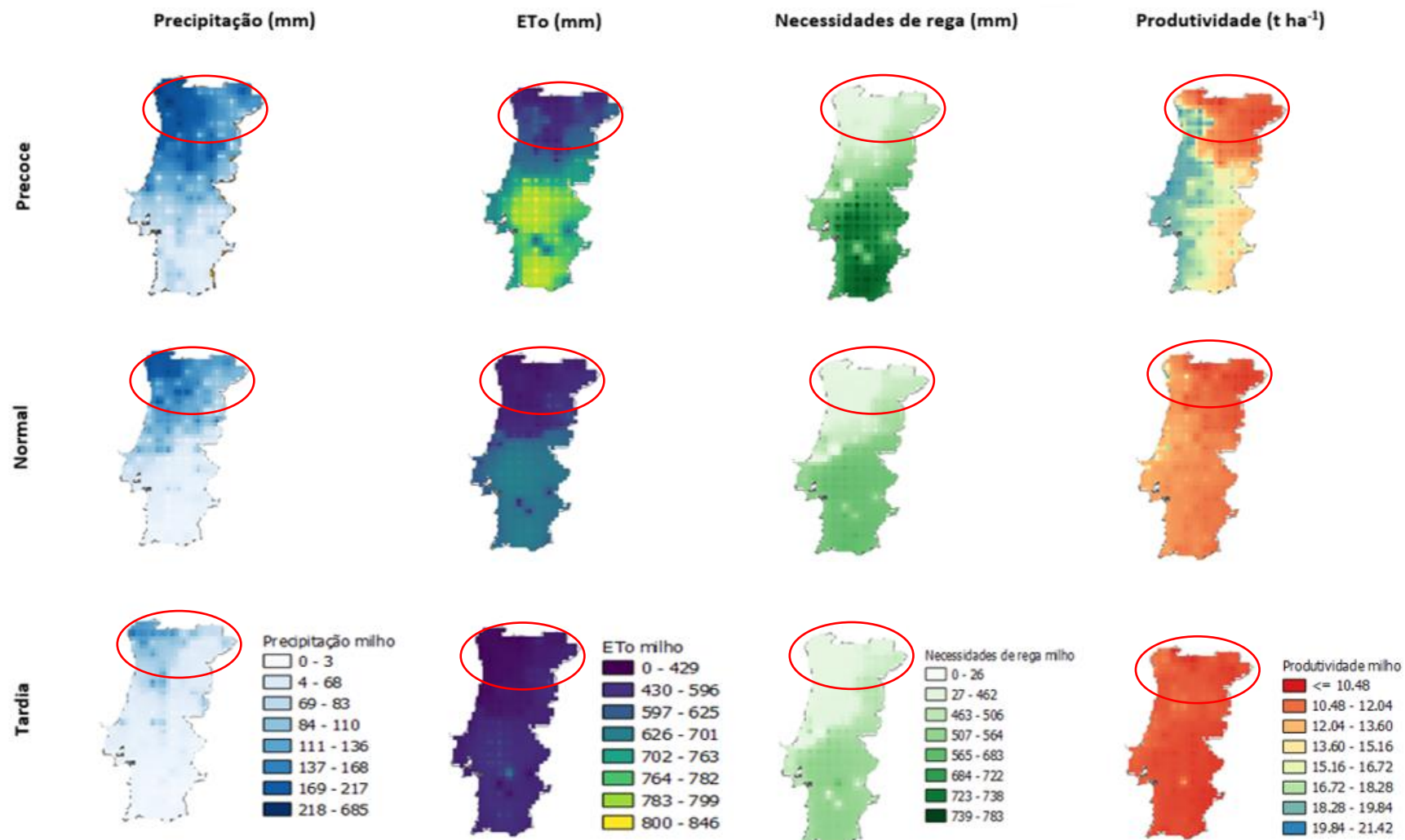


Figura 14 -Representação espacial dos resultados obtidos para as diferentes variáveis (precipitação, evapotranspiração de referência, necessidades de rega e produtividade) para a cultura do milho de acordo com a data de semeadura (precoce, normal e tardia); nota: os resultados relativos ao milho de ciclo curto (FAO300) estão assinalados com um círculo.

Os resultados da data de sementeira normal (final de abril) para a tardia (meados de maio), indicam que em relação à precipitação, esta teve uma redução com maior expressão na região Norte com 82 mm, seguindo-se da região Centro com 54 mm, a Área Metropolitana de Lisboa com 43 mm, a região do Algarve com 17 mm e por último o Alentejo com 13 mm.

No que diz respeito à  $ET_0$ , a região Norte foi a que sofreu o maior aumento de 45 mm, seguindo-se a região Centro com 37 mm, a Área Metropolitana de Lisboa com 29 mm, a região do Algarve com 23 mm, depois o Alentejo com 22 mm.

As necessidades de rega do milho (Quadro 11) e tendo em consideração a data de sementeira precoce para normal, que corresponde a um adimento de 15 dias na data, verifica-se que a região Centro foi a que apresentou um maior aumento, tendo sido de 18 mm, seguindo-se da Área Metropolitana de Lisboa com 17 mm, depois o Alentejo com 15 mm, a região do Algarve com 12 mm e por último a região Norte com 8 mm.

Como anteriormente referido existem vários locais em que têm restrições em termos de GDD para que se complete o ciclo cultural antes de meados de novembro quando se utiliza um milho FAO600, assim, os agricultores devem usar variedades de milho de ciclo curto. Verificou-se que nestes casos (como assinalado na Figura 14) o distrito que apresentou maior diminuição das NLR foi o de Viana do Castelo com uma diminuição de 16 mm, seguido do distrito do Porto com 12 mm, depois o distrito de Vila Real com 10 mm, o distrito de Braga com 6 mm e por último o distrito de Bragança com 4 mm. Por último analisando a produtividade do milho verificou-se, que quando se atrasa a sementeira (precoce vs normal) ocorre uma redução para todas as regiões, tendo sido a região Centro aquela que teve a maior redução de  $0,69 \text{ t ha}^{-1}$ , seguindo-se do Alentejo com  $0,52 \text{ t ha}^{-1}$ , a região do Algarve com  $0,44 \text{ t ha}^{-1}$  e por último a região Norte com  $0,14 \text{ t ha}^{-1}$ , estas variações correspondem a 4,2%, 2,9%, 2,5% e 1,0%, respetivamente. Esta diminuição ocorre, como referido no Capítulo 4.1, por efeito de um ciclo cultural mais curto. Com exceção da Área Metropolitana de Lisboa que teve um ligeiro aumento, inferior a 1%, o que corresponde a  $0,01 \text{ t ha}^{-1}$ . No que diz respeito à produtividade da variedade de ciclo curto (como assinalado na Figura 14) o distrito que apresentou a maior redução foi o distrito do Porto com uma diminuição de  $1,09 \text{ t ha}^{-1}$ , depois o distrito de Bragança com  $0,44 \text{ t ha}^{-1}$  e por último o distrito de Vila Real com uma redução de  $0,28 \text{ t ha}^{-1}$ , estas variações correspondem a 6,6%, 3,5% e 2,1%, respetivamente. Os distritos que registaram um aumento das produtividades foram: o distrito de Viana do Castelo com  $0,79 \text{ t ha}^{-1}$  (5,3%) e o

distrito de Braga com 0,46 t ha<sup>-1</sup> (2,9%). O valor mais baixo obtido foi de 10,48 t ha<sup>-1</sup> no distrito de Vila Real e o valor mais alto registado foi de 21,42 t ha<sup>-1</sup> no distrito de Leiria.

*Quadro 11 - Necessidade de rega e produtividade média da cultura do milho de acordo com as diferentes datas de sementeira para as diferentes regiões de Portugal continental (NUTS II).*

NUTS II	Data de Sementeira	Cultura	Necessidades de rega (mm)	Produtividade (t/ha)
Norte	Precoce	Milho	433	14,22
Centro			527	16,54
Área Metropolitana de Lisboa			689	18,90
Alentejo			733	17,90
Algarve			746	17,57
NUTS II	Data de Sementeira	Cultura	Necessidades de rega (mm)	Produtividade (t/ha)
Norte	Normal	Milho	425	14,08
Centro			509	15,85
Área Metropolitana de Lisboa			672	18,91
Alentejo			718	17,38
Algarve			734	17,13
NUTS II	Data de Sementeira	Cultura	Necessidades de rega (mm)	Produtividade (t/ha)
Norte	Tardia	Milho	409	13,21
Centro			491	15,11
Área Metropolitana de Lisboa			655	18,38
Alentejo			703	17,37
Algarve			705	17,25

Analisando agora os resultados relativos à data de sementeira normal e tardia (Quadro 11), verificou-se que em relação às necessidades líquidas de rega a região do Algarve foi a que registou o maior aumento com 29 mm, seguindo-se da região Centro com 18 mm, depois a Área Metropolitana de Lisboa com 17 mm, a região Norte com 16 mm e por fim o Alentejo com 15 mm. No que diz respeito aos distritos em que se deve utilizar uma variedade de milho de ciclo curto o que apresentou a maior diminuição foi o distrito do Porto com 34 mm, depois o distrito de Braga com 31 mm, seguindo-se o distrito de Vila Real com 13 mm e por último os distritos de Viana do Castelo e Bragança com uma redução de 8 mm.

Por último para a produtividade verificou-se uma redução para todas as regiões. A região em que se verificou ter sido maior foi na região Norte com 0,87 t ha<sup>-1</sup>, o que corresponde a uma redução de 6,2% depois a região Centro com 0,74 t ha<sup>-1</sup> (4,7%), a Área Metropolitana de Lisboa com 0,53 t ha<sup>-1</sup> (2,8%) e por último o Alentejo com uma quebra de 0,01 t ha<sup>-1</sup> (0,1%). Exceto a região do Algarve em que se obteve um aumento de 0,12 t ha<sup>-1</sup>, o que corresponde a 0,7%. Quanto aos distritos em que se utilizou a variedade de milho de ciclo curto (como assinalado na Figura 14) o que apresentou maior quebra foi o do Porto com 2,35 t ha<sup>-1</sup>, seguindo-se o de Braga com 2,23 t ha<sup>-1</sup>, o distrito de Viana do Castelo com 1,41 t ha<sup>-1</sup> e por último o distrito de Vila Real com uma redução de 0,54 t ha<sup>-1</sup>, estas variações correspondem a 15,1%, 13,7%, 9,0% e 4,1%, respetivamente. O distrito de Bragança registou um ligeiro aumento de 0,33 t ha<sup>-1</sup> (2,7%).

Neste caso de estudo em particular, a modelação subestimou a produção observada quando comparada com os resultados médios das estatísticas agrícolas do INE (Quadro12). Estes resultados podem ser explicados pelo facto de que a modelação fornece uma estimativa, a qual se baseia na otimização dos recursos utilizados (água, fertilizantes, pragas e doenças, infestantes) enquanto as estatísticas agrícolas são uma média das observações e englobam quer os resultados obtidos por agricultores que maximizam os recursos e que praticam agricultura de precisão assim como os que se dedicam a agricultura familiar (parcelas pequenas dimensões e que os recursos não são muitas vezes otimizados). Por exemplo analisando os resultados da produtividade do milho obtidos por Paredes *et al.* (2014) em parcelas de agricultores situadas na região Centro variaram entre 12,77 e 20,62 t ha<sup>-1</sup> no período 2010-13 enquanto o valor médio apresentado nas estatísticas agrícolas é de 7,98 t ha<sup>-1</sup> nesse mesmo período. Por outro lado, os resultados obtidos utilizando o modelo AquaCrop, não refletem verdadeiramente os resultados alcançados pelos agricultores, mas dão uma ideia do que poderia ser obtido em condições de otimização dos recursos.

Quadro 12 - Produtividades médias das três culturas de acordo com os dados do INE (Fonte: INE, 2021).

NUTS II	Cultura	Produtividade (t/ha)
Continente	Trigo	2,68
Norte		1,66
Centro		2,33
Área Metropolitana de Lisboa		4,21
Alentejo		2,87
Algarve		1,41
NUTS II	Cultura	Produtividade (t/ha)
Continente	Batata	25,54
Norte		19,83
Centro		23,60
Área Metropolitana de Lisboa		36,48
Alentejo		33,27
Algarve		26,17
NUTS II	Cultura	Produtividade (t/ha)
Continente	Milho	10,16
Norte		5,66
Centro		10,59
Área Metropolitana de Lisboa		11,08
Alentejo		12,73
Algarve		13,69

### 4.3. Produtividade da água

Os valores obtidos para a produtividade da água ( $WP_{ET}$ , kg m<sup>-3</sup>) das diferentes culturas, foram calculados tendo em conta a Equação (6b) definida anteriormente no capítulo 3.4.4.

Os resultados nas Figuras 15 e 16 mostram que a produtividade média da água respetivamente para a cultura do trigo e da batata diminui com o atrasar da sementeira/plantação. Em oposição a produtividade da água para a cultura do milho vai aumentando com adiar da sementeira (Figura 17). Tal é explicado, como anteriormente discutido, pelo aumento da produção em oposição à diminuição das necessidades de água da cultura (Fig. 14).

No que diz respeito à cultura do trigo (Figura 15) e tendo em consideração a data de sementeira precoce, alcançou-se uma  $WP_{ET}$  média de  $1,94 (\pm 0,4) \text{ kg m}^{-3}$ , em que o máximo obtido foi de  $3,49 \text{ kg m}^{-3}$  no distrito de Braga e o mínimo obtido foi de  $1,17 \text{ kg m}^{-3}$  no distrito de Castelo Branco (Figura 18). Quanto à data de sementeira normal, esta atingiu a nível nacional um valor médio de  $1,76 (\pm 0,4) \text{ kg m}^{-3}$ , em que o máximo foi de  $3,03 \text{ kg m}^{-3}$  no distrito de Braga e o mínimo obtido foi de  $1,17 \text{ kg m}^{-3}$  no distrito de Bragança. Em contraste, valores de  $WP_{ET}$  foram obtidos para a data de sementeira tardia, com um valor médio de  $1,50 (\pm 0,3) \text{ kg m}^{-3}$ . O valor máximo foi obtido no distrito de Setúbal com um valor de  $2,38 \text{ kg m}^{-3}$  e um mínimo de  $1,06 \text{ kg m}^{-3}$  no distrito de Bragança. Assim, verifica-se que a produtividade média da água tende a decrescer da sementeira precoce para a normal e consequentemente da data de sementeira normal para a tardia, estas quebras correspondem a 9,3% e 14,8% respetivamente.

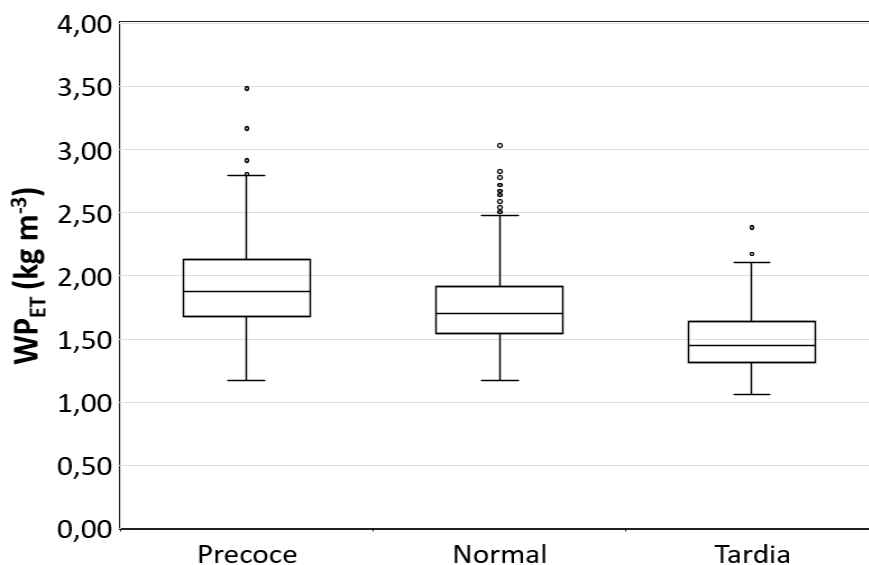


Figura 15 - Diagrama de extremos e quartis referente à produtividade média da água referente à cultura do trigo (expressa em kg de grão seco por  $\text{m}^3$  de água evapotranspirada) para as diferentes datas de sementeira (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo;  $\circ$  representam os valores atípicos/outliers).

Os resultados do presente estudo são mais elevados dos que os obtidos por Islam *et al.* (2022) na região de Dinajpur, Bangladesh, que apresenta uma produtividade média do trigo de  $3,73 \text{ t ha}^{-1}$  e uma  $WP_{ET}$  média de  $1,37 \text{ kg m}^{-3}$ . Os valores do presente estudo são comparáveis aos reportados por Kheir *et al.* (2021) num estudo sobre o impacto de diversos calendários de rega

deficitária na produção e na produtividade da água do trigo cultivado no Egito obtendo produtividades a variarem entre 4000 a 9000 kg ha<sup>-1</sup> e uma WP<sub>ET</sub> a variar entre 1,2 a 3,2 kg m<sup>-3</sup>. De acordo com a revisão efetuada por Zwart *et al.* (2010), verifica-se que os resultados obtidos no presente estudo são mais elevados do que os obtidos em diferentes regiões da bacia do mediterrâneo como por exemplo para Chlef (Argélia) com uma WP<sub>ET</sub> média de 0,73 kg m<sup>-3</sup> (variando de 0,46 a 1,08 kg m<sup>-3</sup>), para Córdoba (Espanha) reportando um valor médio de 0,90 kg m<sup>-3</sup> (variando entre 0,79 e 0,98 kg m<sup>-3</sup>) e para Sidi El Aydi (Marrocos) com um valor médio de WP<sub>ET</sub> de 0,63 kg m<sup>-3</sup> (variando entre 0,58 e 0,67 kg m<sup>-3</sup>). Esta diferença pode ser explicada pela otimização que foi efetuada nos distintos cenários do presente estudo.

Quanto à cultura da batata e tendo em conta a data de plantação precoce, obteve-se uma produtividade média da água de 15,01 (±3,47) kg m<sup>-3</sup> (Figura 16), em que se atingiu um máximo de 36,64 kg m<sup>-3</sup> no distrito de Setúbal e o mínimo obtido foi de 9,55 kg m<sup>-3</sup> no distrito de Beja (Figura 18). No que se refere à data de plantação normal, obteve-se uma WP<sub>ET</sub> média de 13,81 (±2,8) kg m<sup>-3</sup> (Figura 16), em que o máximo atingido foi de 36,86 kg m<sup>-3</sup> no distrito de Setúbal e o mínimo obtido foi de 9,54 kg m<sup>-3</sup> no distrito de Vila Real (Figura 18). Por fim para a data de plantação tardia, alcançou-se uma WP<sub>ET</sub> média de 13,04 (±2,2) kg m<sup>-3</sup> (Figura 16), tendo sido atingido um máximo de 29,43 kg m<sup>-3</sup> no distrito de Setúbal e um mínimo de 8,96 kg m<sup>-3</sup> no distrito da Guarda (Figura 18). Assim, verifica-se que a WP<sub>ET</sub> média tende a decrescer da plantação precoce para a normal e consequentemente da data de plantação normal para a tardia, estas quebras correspondem a 8,0% e 5,6% respetivamente.

Os resultados do presente estudo são comparáveis aos reportados por Paredes *et al.* (2018) para o sul de Itália usando diferentes calendários de rega (rega sem stress, rega com redução de 50% da quantidade de rega usada no tratamento sem stress) e sequeiro. Nesse estudo foram observadas produtividades da batata a variar entre 12,48 t ha<sup>-1</sup> (sequeiro) e 42,76 t ha<sup>-1</sup> (rega sem stress) tendo sido obtidas para esses calendários WP<sub>ET</sub> a variar entre 5,69 kg m<sup>-3</sup> (sequeiro) e 10,99 kg m<sup>-3</sup> (rega sem stress). Os resultados obtidos no presente estudo encontram-se dentro do intervalo reportado num estudo realizado na Dinamarca Ahmadi *et al.* (2010) no qual foi obtida uma produtividade média de batata de 42000 kg ha<sup>-1</sup>, e uma produtividade da água a variar entre 16 e 26 kg m<sup>-3</sup>.

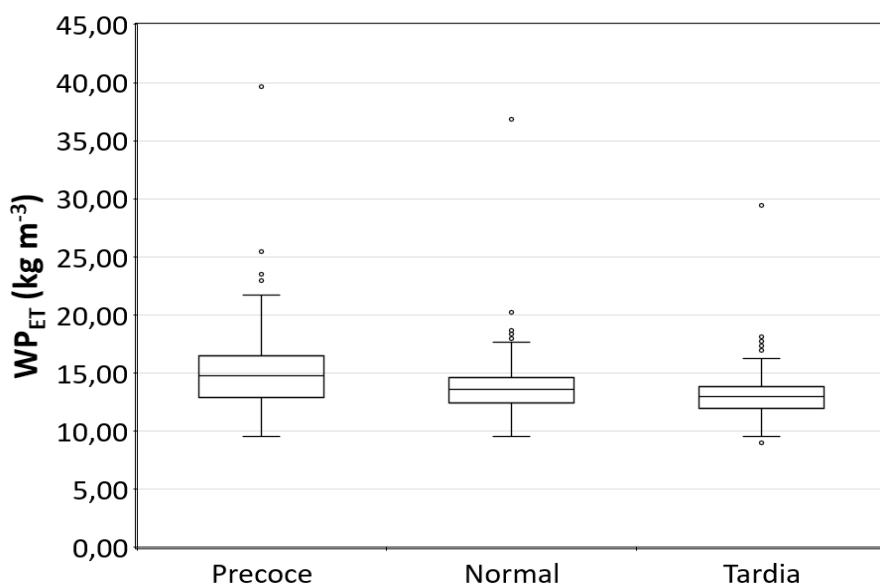


Figura 16 - Diagrama de extremos e quartis referente à produtividade média da água referente à cultura da batata (expressa em kg de tubérculo por m<sup>3</sup> de água evapotranspirada) para as diferentes datas de plantação (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo;  $\circ$  representam os valores atípicos/outliers).

No que diz respeito à cultura do milho e tendo em consideração a data de sementeira precoce, alcançou-se uma produtividade média da água de  $2,36 (\pm 0,3) \text{ kg m}^{-3}$  (Figura 17), tendo atingido o valor máximo de  $3,41 \text{ kg m}^{-3}$  no distrito de Braga e o valor mínimo de  $1,83 \text{ kg m}^{-3}$  no distrito de Bragança (Figura 18). Quanto à data de sementeira normal, alcançou-se uma  $WP_{ET}$  média de  $2,42 (\pm 0,3) \text{ kg m}^{-3}$  (Figura 17), em que o máximo atingido foi de  $3,57 \text{ kg m}^{-3}$  no distrito de Braga e o mínimo obtido foi de  $1,94 \text{ kg m}^{-3}$  no distrito de Bragança (Figura 18). Por último para a data de sementeira tardia, estimou-se uma  $WP_{ET}$  média de  $2,49 (\pm 0,3) \text{ kg m}^{-3}$ , em que o máximo foi atingido no distrito de Braga com um valor de  $3,46 \text{ kg m}^{-3}$  e um mínimo de  $2,08 \text{ kg m}^{-3}$  no distrito de Bragança. Assim, constatou-se que a  $WP_{ET}$  média tende a aumentar da data de sementeira precoce para a normal e consequentemente da data de sementeira normal para a tardia, esses aumentos correspondem a 2,6% e 2,6% respetivamente. De salientar que nos distritos em que se obteve uma  $WP_{ET}$  mais elevada coincidem com aqueles em que se utilizou uma variedade de milho com ciclo mais curto (FAO 300), tal é explicado pela menor  $ET_c$  que ocorreu ao longo do ciclo.

Um exemplo de um estudo realizado em Portugal numa exploração agrícola é o de Paredes *et al.* (2014). Nesse estudo as produtividades do milho observadas variaram entre 12,8 e 20,6  $\text{kg ha}^{-1}$  sendo que a produtividade da água, calculada como a razão entre a produtividade e a quantidade sazonal de água de rega utilizada, variou entre 1,78 e 3,15  $\text{kg m}^{-3}$ . Os resultados obtidos para a data de sementeira normal são comparáveis aos obtidos por Trout & DeJonge (2017) no Colorado, EUA, no qual foi obtida uma produtividade média de 12500  $\text{kg ha}^{-1}$  e uma

produtividade da água de  $2,0 \text{ kg m}^{-3}$ . Os resultados obtidos para a data de sementeira tardia estão próximos dos reportados num estudo efetuado por Djaman *et al.* (2018) no Novo México, EUA, uma  $WP_{ETc}$  a variar desde  $2,0$  a  $2,3 \text{ kg m}^{-3}$  e com um valor médio de  $2,1 \text{ kg m}^{-3}$ .

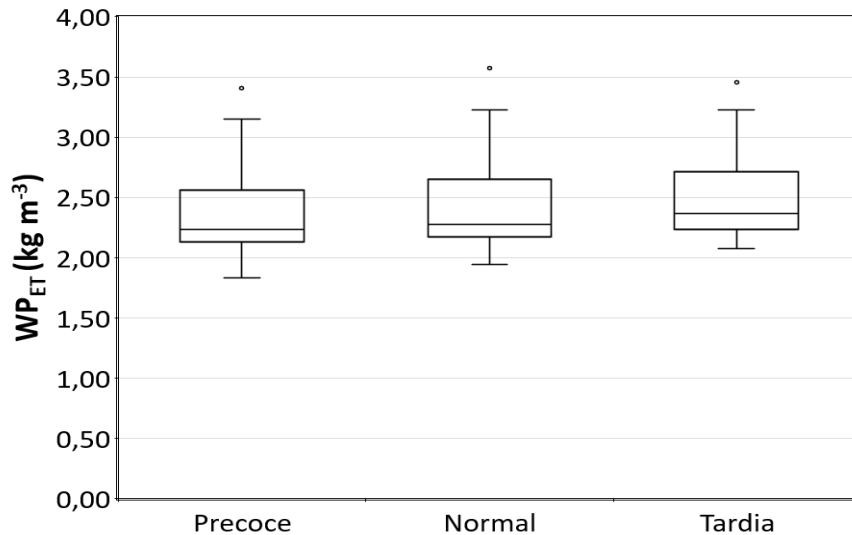


Figura 17 - Diagrama de extremos e quartis referente à produtividade média da água referente à cultura do milho (expressa em kg de grão seco por  $\text{m}^3$  de água evapotranspirada) para as diferentes datas de sementeira (representados o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o valor máximo e mínimo;  $\circ$  representam os valores atípicos/outliers).

Realizada a análise e a espacialização (Figura 18) dos resultados da produtividade média da água constatou-se que para a cultura do trigo e da batata, com o atrasar da data de sementeira/plantação o valor médio da evapotranspiração cultural vai aumentando o que não é compensado pelo aumento da produtividade pelo que a  $WP_{ET}$  diminui. Ao aumentar a evapotranspiração cultural, por consequência direta, aumentam também as necessidades de rega, o que significa que o total de água utilizada aumenta. Para a cultura do trigo verificou-se, que quando se atrasa a sementeira (precoce vs normal) ocorre um decréscimo da  $WP_{ET}$  em todas as regiões (Fig. 18). A região em que se verificou um maior decréscimo foi na região do Norte com  $0,21 \text{ kg m}^{-3}$ , seguindo-se a Área Metropolitana de Lisboa com  $0,19 \text{ kg m}^{-3}$ , o Alentejo com  $0,18 \text{ kg m}^{-3}$ , o Algarve com  $0,16 \text{ kg m}^{-3}$  e por último a região Centro com  $0,15 \text{ kg m}^{-3}$ , estas variações correspondem a 10,7%, 8%, 9,8%, 8,5% e 8,0% respetivamente. Analisando os resultados relativos à data de sementeira normal e tardia verifica-se uma manutenção do comportamento da  $WP_{ET}$  que ocorre quando se adia a data de sementeira de precoce para a normal. A região que apresentou uma maior variação foi a Área Metropolitana de Lisboa com um decréscimo de  $0,38 \text{ kg m}^{-3}$ , depois o Alentejo com  $0,27 \text{ kg m}^{-3}$ , o Algarve com  $0,26 \text{ kg m}^{-3}$ , o Centro com  $0,25 \text{ kg m}^{-3}$  e por último a região do Norte com  $0,23 \text{ kg m}^{-3}$ , estas variações correspondem a 18,3%, 15,8%, 15,0%, 13,9% e 13,2% respetivamente.

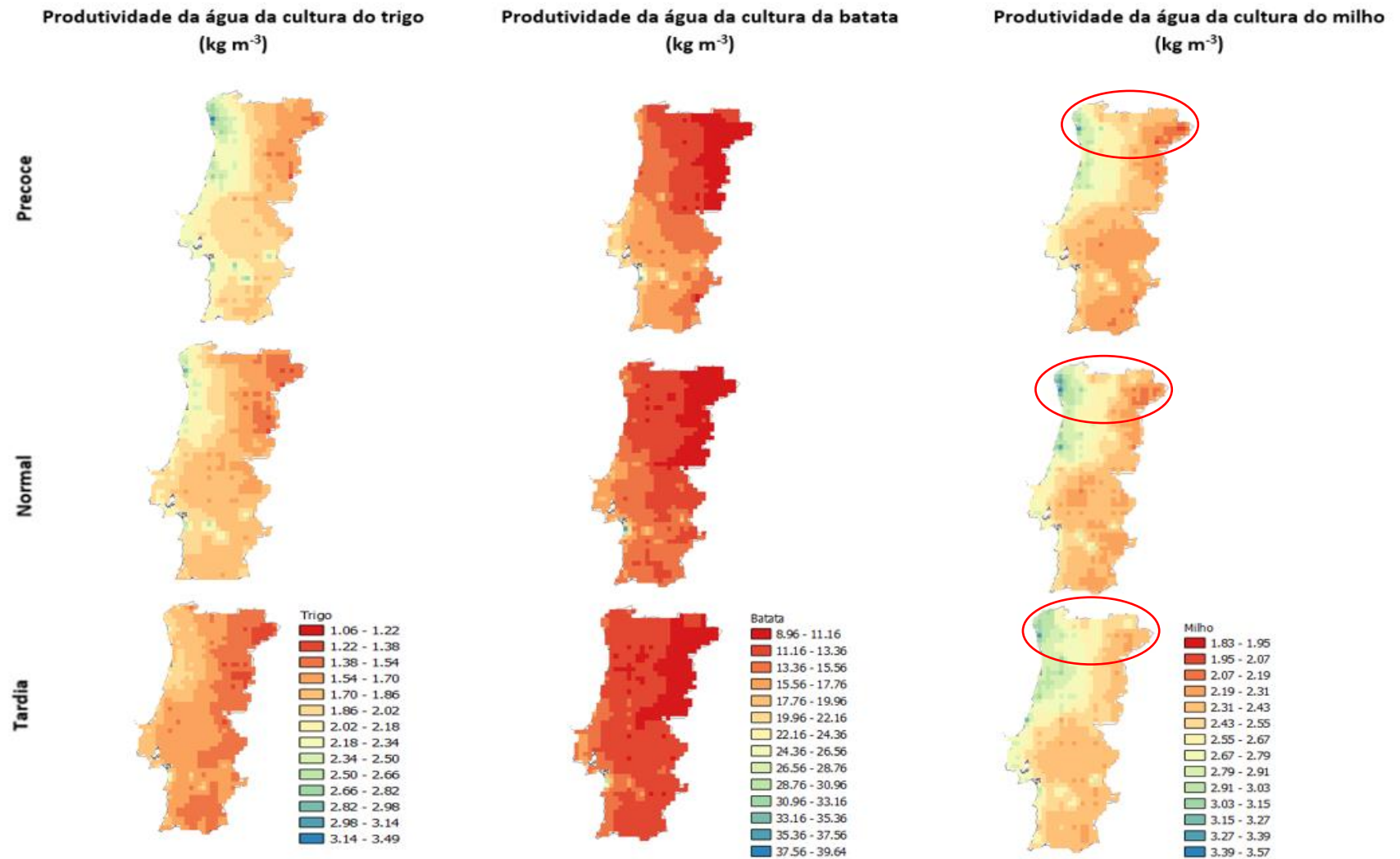


Figura 18 - Representação espacial dos resultados obtidos para a produtividade da água para as diferentes culturas, trigo, batata e milho de acordo com a data de sementeira (precoce, normal e tardia).

Analisando os resultados obtidos para a cultura da batata quando se adia a data de plantação de precoce (meados de março a norte e meados de dezembro a sul) para a normal (abril a norte e janeiro a sul), verifica-se que ocorreu um decréscimo dos valores da  $WP_{ET}$  em todas as regiões. A região em que se verificou um maior decréscimo foi na região da Área Metropolitana de Lisboa com  $2,56 \text{ kg m}^{-3}$ , depois a região do Algarve com  $1,73 \text{ kg m}^{-3}$ , depois o Alentejo com  $1,60$ , o Centro com  $0,67 \text{ kg m}^{-3}$  e por último o Norte com  $0,43 \text{ kg m}^{-3}$ , estas variações correspondem a 13,5%, 10,4%, 10,1%, 4,9% e 3,3% respetivamente. Os resultados da  $WP_{ET}$  para a data de plantação normal vs. tardia indicam que a região que apresenta maior decréscimo dos valores da  $WP_{ET}$  é a região do Algarve com  $1,64 \text{ kg m}^{-3}$ , seguindo-se o Alentejo com  $1 \text{ kg m}^{-3}$ , a Área Metropolitana de Lisboa com  $1 \text{ kg m}^{-3}$  e por último o Centro com  $0,68 \text{ kg m}^{-3}$ , estas variações correspondem a 11,0%, 7,0%, 6,1% e 5,3% respetivamente. Com exceção da região do Norte que apresenta um aumento pouco representativo de  $0,02 \text{ kg m}^{-3}$  (0,2%). Por outro lado, quanto à cultura do milho com o adiar da data de sementeira existe uma diminuição do valor médio da evapotranspiração cultural o que vai originar uma diminuição das necessidades de rega. Diminuindo as necessidades de rega diminui também o total de água utilizada. Verificou-se que quando se atrasa a sementeira (precoce vs normal) existe um aumento da produtividade da água em todas as regiões, a região em que se verificou um maior aumento foi no Norte com  $0,11 \text{ kg m}^{-3}$ , seguindo-se da Área Metropolitana de Lisboa com  $0,09 \text{ kg m}^{-3}$ , Algarve com  $0,06 \text{ kg m}^{-3}$ , o Alentejo com  $0,05$  e por último a região Centro com  $0,05 \text{ kg m}^{-3}$ , estas variações correspondem a 4,4%, 3,5%, 2,8%, 2,1% e 1,8% respetivamente. Quanto aos distritos em que se utilizou a variedade de milho de ciclo curto (como assinalado na Figura 18) aquele que apresentou um maior aumento da  $WP_{ET}$  foi o de Viana do Castelo com  $0,27 \text{ kg m}^{-3}$ , seguindo-se o distrito de Braga com  $0,20 \text{ kg m}^{-3}$ , depois o distrito do Porto com  $0,08 \text{ kg m}^{-3}$ , o distrito de Vila Real com  $0,06 \text{ kg m}^{-3}$  e por último o distrito de Bragança com  $0,03 \text{ kg m}^{-3}$ , estas variações correspondem a 10,2%, 7,2%, 2,9%, 2,4% e 1,7% respetivamente.

Analisando agora os resultados relativos à data de sementeira normal e tardia verificou-se o mesmo que ocorreu da data de sementeira precoce para a normal, ou seja, um aumento em todas as regiões. A região que registou o maior aumento foi a região do Algarve com  $0,07 \text{ kg m}^{-3}$ , seguindo-se do Centro com  $0,07 \text{ kg m}^{-3}$ , o Alentejo com  $0,06 \text{ kg m}^{-3}$ , a Área Metropolitana de Lisboa com  $0,06 \text{ kg m}^{-3}$  e por último o Norte com  $0,05 \text{ kg m}^{-3}$ , estas variações correspondem a 3,4%, 2,8%, 2,7%, 2,5% e 2,0% respetivamente. No que diz respeito aos distritos em que se utilizou a variedade de ciclo curto (como assinalado na Figura 18) o que apresentou um maior decréscimo da  $WP_{ET}$  foi o distrito do Porto com  $0,15 \text{ kg m}^{-3}$  (5,3%), seguindo-se o distrito de

Braga com  $0,06 \text{ kg m}^{-3}$  (1,9%). Os distritos que registaram um aumento da  $WP_{ET}$  foram: o distrito de Bragança com  $0,18 \text{ kg m}^{-3}$ , seguindo-se o distrito de Vila Real com  $0,08 \text{ kg m}^{-3}$  e por último o distrito de Viana do Castelo com  $0,01 \text{ kg m}^{-3}$ , estas variações correspondem a 8,4%, 3,1% e 0,3% respetivamente.

Assim, verificou-se que um maior uso de água resulta em produções maiores e que nem sempre uma diminuição do uso total de água origina um aumento considerável da produtividade da água. Aconselha-se deste modo a que a produtividade da água seja acompanhada de uma análise económica de modo a aferir o impacto económico conjunto relativo às quebras de produção e às poupanças de água de rega.

## 5. Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo a utilização da acumulação térmica (GDD) para a determinação das fases do ciclo de três diferentes culturas anuais (batata, milho e trigo), bem como apoiar a seleção da data de sementeira/plantação mais adequada em contexto de seca severa (procura climática elevada). A tomada de decisão na agricultura de regadio, tem de ser previamente planeada. Esta tomada de decisão está dependente quer da variabilidade climática existente no contexto do mediterrâneo assim como do impacto da gestão da rega na produção e no rendimento final do produtor. Em condições de escassez de água, em particular em contexto de seca severa, a seleção da data de sementeira/plantação das culturas é um método bastante útil no que diz respeito à poupança de água de rega bem como a possibilidade de o produtor obter maiores produções. Esta metodologia provou ser muito interessante no apoio ao processo decisório no dia a dia do agricultor nomeadamente se se utilizarem dados de previsão meteorológica uma vez que permite adequar as decisões com antecipação e tendo em consideração as condições climáticas.

Pela análise global dos resultados, torna-se evidente que para a cultura do trigo e da batata a data de sementeira/plantação precoce é a que apresenta um impacto positivo quer na produtividade final quer na diminuição do consumo de água por parte de ambas as culturas. Esta diminuição do consumo de água para rega deve-se ao facto de, antecipando a data de sementeira/plantação, ser possível ajustar os ciclos culturais para que haja maior aproveitamento da precipitação e certa forma reduzir o stress hídrico e evitar os períodos de temperaturas excessivas. Quanto à cultura do milho, a situação pode ter dois pontos de vista. Caso o produtor decida que a produção final se destina à produção de grão, o que acontece na maioria dos produtores que se encontram na região Centro, Área Metropolitana de Lisboa, Alentejo e Algarve terá de optar pela data de sementeira precoce visto que relativamente à produtividade verificou-se que os resultados não apresentavam vantagens em adiar a sementeira. Caso decida que a produção final seja para forragem, o que pode acontecer na região Norte, a data de sementeira normal ou tardia, podem ser escolhidas. Tal é suportado pelos resultados relativos ao número de dias necessários a completar o ciclo cultural, ou seja, com o atrasar da data de sementeira o número médio de dias para completar o ciclo cultural diminui, o que possibilita o produtor instalar a cultura do milho na data mais tardia, colhê-la em meados do mês de setembro, e caso decida realizar uma cultura de Outono/Inverno pode fazer.

Quanto à produtividade física da água ( $WP_{ET}$ ,  $\text{kg m}^{-3}$ ), em relação às culturas do trigo e da batata, ambas apresentam um comportamento semelhante, ou seja, com o atrasar da data de sementeira/plantação a produtividade da água de ambas as culturas tende a diminuir isto porque o valor médio da evapotranspiração cultural aumenta e a produção não acompanha este aumento. Para estas duas culturas a produtividade da água é maior quando a data de sementeira/plantação escolhida for a precoce. Para a cultura do milho a situação já é diferente. Neste caso a produtividade da água aumenta com o atrasar da data de sementeira atingindo o seu máximo na data de sementeira tardia. Assim, a produtividade física da água constitui um indicador que deve ser coadjuvado com outro que tome em consideração a componente económica a qual é um dos principais fatores na tomada de decisão dos agricultores.

Os produtores devem escolher cuidadosamente não só as culturas, mas também as técnicas de rega a utilizar, de modo a maximizarem o valor das suas produções e ao mesmo tempo viabilizar a sustentabilidade da agricultura. Por fim, considera-se que este trabalho pode ser mais um estímulo para que se valorize mais a utilização das unidades de acumulação térmica, nomeadamente em estudos destinados à análise do impacto das alterações climáticas, servindo de base a futuros trabalhos nesta temática.

## Referências bibliográficas

- Abi Saab, M. T., El Alam, R., Jomaa, I., Skaf, S., Fahed, S., Albrizio, R., & Todorovic, M. (2021). Coupling remote sensing data and aquacrop model for simulation of winter wheat growth under rainfed and irrigated conditions in a mediterranean environment. *Agronomy*, *11*(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy11112265>
- Abi Saab, M. T., Todorovic, M., & Albrizio, R. (2015). Comparing aquaCrop and cropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes: Does calibration year influence the performance of crop growth models? *Agricultural Water Management*, *147*, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.001>
- Abraha, M. G., & Savage, M. J. (2008). The soil water balance of rainfed and irrigated oats, Italian rye grass and rye using the CropSyst model. *Irrigation Science*, *26*(3), 203–212. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0086-8>
- Abrha, B., Delbecque, N., Raes, D., Tsegay, A., Todorovic, M., Heng, L., Vanutrecht, E., Geerts, S., Garcia-Vila, M., & Deckers, S. (2012). Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare* L.) based on modelled yield response to water with Aquacrop. *Experimental Agriculture*, *48*(2), 252–271. <https://doi.org/10.1017/S0014479711001190>
- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adekalu, K. O., & Prasad, K. C. (2019). Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. *Agricultural Water Management*, *213*(May 2018), 1130–1146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.006>
- Ahmadi, H., Asadi, S., & Moradkhani, H. (2019). Spatial distribution and deviation from optimum temperature conditions of phenological stages of potato cultivation in West Azerbaijan. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *16*(7), 3523–3538. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1749-0>
- Ahmadi, S. H., Andersen, M. N., Plauborg, F., Poulsen, R. T., Jensen, C. R., Sepaskhah, A. R., & Hansen, S. (2010). Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, *97*(11), 1923–1930. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.007>
- Ahmed, P., Saikia, M., Pathak, K., & Choudhury, M. (2020). Effect of microclimatic regimes and nitrogen management practices on phenology , yield and agrometeorological indices for rabi maize. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *October*, 971–974.

- Akyuz, F. A., Kandel, H., & Morlock, D. (2017). Developing a growing degree day model for North Dakota and Northern Minnesota soybean. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.027>
- Al-Ghobari, H. M., & Dewidar, A. Z. (2018). Integrating deficit irrigation into surface and subsurface drip irrigation as a strategy to save water in arid regions. *Agricultural Water Management*, 209(January), 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.010>
- Alghory, A., & Yazar, A. (2018). Evaluation of net return and grain quality characteristics of wheat for various irrigation strategies under the Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 203(March), 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.033>
- Allen, Richard G., PEREIRA, Luis S., RAES, Dirk and SMITH, M. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by. *Irrigation and Drainage*, 300(56), 300. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899–920. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>
- Anandhi, A. (2016). Growing degree days - Ecosystem indicator for changing diurnal temperatures and their impact on corn growth stages in Kansas. *Ecological Indicators*, 61, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.023>
- Anar, M. J., Lin, Z., Hoogenboom, G., Shelia, V., Batchelor, W. D., Teboh, J. M., Ostlie, M., Schatz, B. G., & Khan, M. (2019). Modeling growth, development and yield of Sugarbeet using DSSAT. *Agricultural Systems*, 169(November 2018), 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.11.010>
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>
- Andarzian, Bahram, Hoogenboom, G., Bannayan, M., Shirali, M., & Andarzian, B. (2015). Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(2), 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.04.004>

- Anderson, R., Bayer, P. E., & Edwards, D. (2020). Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current Opinion in Plant Biology*, 56, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.006>
- Andrea, O., Catia, B., Paolo, B., Marcello, G., & Francesco, T. (2009). Is CropSyst adequate for management-oriented simulation of growth and yield of processing tomato? *Journal of Applied Horticulture*, 11(1), 17–22. <https://doi.org/10.37855/jah.2009.v11i01.03>
- Arora, N. K. (2019). Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainability*, 2(2), 95–96. <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00078-w>
- Aznar-Sánchez, J. A., Piquer-Rodríguez, M., Velasco-Muñoz, J. F., & Manzano-Agugliaro, F. (2019). Worldwide research trends on sustainable land use in agriculture. *Land Use Policy*, 87(June), 104069. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104069>
- Bagulho, A. S., Costa, R., Almeida, A. S., Pinheiro, N., Moreira, J., Gomes, C., Coco, J., Costa, A., Coutinho, J., & Maçãs, B. (2015). Influence of year and sowing date on bread wheat quality under Mediterranean conditions. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 27(2), 186–199. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v27i2.19279>
- Basu, S., Parya, M., Dutta, S. K., Jena, S., Maji, S., Nath, R., Mazumdar, D., & Chakraborty, P. K. (2012). Effect of growing degree day on different growth processes of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop and Weed*, 8(2), 18–22.
- Belo-Pereira, M., Dutra, E., & Viterbo, P. (2011). Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(20), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2010JD015481>
- Bengtsson, L., Hagemann, S., & Hodges, K. I. (2004). Can climate trends be calculated from reanalysis data? *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 109(11), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2004JD004536>
- Bennett, N. D., Croke, B. F. W., Guariso, G., Guillaume, J. H. A., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., Marsili-Libelli, S., Newham, L. T. H., Norton, J. P., Perrin, C., Pierce, S. A., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A. A., Fath, B. D., & Andreassian, V. (2013). Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling and Software*, 40, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>

- Bijanzadeh, E., Barati, V., Emam, Y., & Pessarakli, M. (2019). Sowing date effects on dry matter remobilization and yield of triticale (*Triticosecale wittmack*) under late season drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, *42*(7), 681–695. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1568463>
- Briak, H., & Kebede, F. (2021). Wheat (*Triticum aestivum*) adaptability evaluation in a semi-arid region of Central Morocco using APSIM model. *Scientific Reports*, *11*(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02668-3>
- Canatário Duarte, A. (2018). Aspectos Sociais E Institucionais Do Regadio Em Portugal. *VII Congresso Nacional De Rega E Drenagem*, 1–12.
- Canavar, Ö., Ellmer, F., & Chmielewski, F. M. (2010). Investigation of yield and yield components of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in the ecological conditions of Berlin (Germany). *Helia*, *33*(53), 117–130. <https://doi.org/10.2298/HEL1053117C>
- Carvalho, D. F., Domínguez, A., Neto, D. H. O., Tarjuelo, J. M., & Martínez-Romero, A. (2014). Combination of sowing date with deficit irrigation for improving the profitability of carrot in a tropical environment (Brazil). *Scientia Horticulturae*, *179*, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.024>
- Chaves, M. M., Santos, T. P., Souza, C. R., Ortuño, M. F., Rodrigues, M. L., Lopes, C. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2007). Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Annals of Applied Biology*, *150*(2), 237–252. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2006.00123.x>
- Cichota, R., Vogeler, I., Werner, A., Wigley, K., & Paton, B. (2018). Performance of a fertiliser management algorithm to balance yield and nitrogen losses in dairy systems. *Agricultural Systems*, *162*(September 2017), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.017>
- Confalonieri, R., & Bocchi, S. (2005). Evaluation of CropSyst for simulating the yield of flooded rice in northern Italy. *European Journal of Agronomy*, *23*(4), 315–326. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.12.002>
- Corbari, C., Ben Charfi, I., & Mancini, M. (2021). Optimizing irrigation water use efficiency for tomato and maize fields across Italy combining remote sensing data and the aquacrop model. *Hydrology*, *8*(1). <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY8010039>
- Costa, R., Pinheiro, N., Almeida, A. S., Gomes, C., Coutinho, J., Coco, J., Costa, A., & Maças,

- B. (2013). Effect of sowing date and seeding rate on bread wheat yield and test weight under mediterranean conditions. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 25(12), 951–961. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i12.16731>
- Darouich, H., Cameira, M. R., Gonçalves, J. M., Paredes, P., & Pereira, L. S. (2017). Comparing sprinkler and surface irrigation for wheat using multi-criteria analysis: Water saving vs. Economic returns. *Water (Switzerland)*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/w9010050>
- Dasari, H. P., & Challa, V. S. (2015). A Study of Precipitation Climatology and Its Variability over Europe Using an Advanced Regional Model (WRF). *American Journal of Climate Change*, 04(01), 22–39. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2015.41003>
- de Wit, A., Boogaard, H., Fumagalli, D., Janssen, S., Knapen, R., van Kraalingen, D., Supit, I., van der Wijngaart, R., & van Diepen, K. (2019). 25 years of the WOFOST cropping systems model. *Agricultural Systems*, 168(October 2017), 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.018>
- Devi, S., Singh, M., & Aggarwal, R. K. (2019). Thermal Requirements and Heat Use Efficiency of Pea Cultivars under Varying Environments. *Current World Environment*, 14(3), 376–382. <https://doi.org/10.12944/cwe.14.3.06>
- DEWEDAR, O., PLAUBORG, F., EL-SHAFIE, A., & MARWA, A. (2021). Response of potato biomass and tuber yield under future climate change scenarios in Egypt. *Journal of Water and Land Development*, 49, 139. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137106>
- Di Paola, A., Valentini, R., & Santini, M. (2016). An overview of available crop growth and yield models for studies and assessments in agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(3), 709–714. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7359>
- Dias, M. P. N. M., Navaratne, C. M., Weerasinghe, K. D. N., & Hettiarachchi, R. H. A. N. (2016). Application of DSSAT Crop Simulation Model to Identify the Changes of Rice Growth and Yield in Nilwala River Basin for Mid-centuries under Changing Climatic Conditions. *Procedia Food Science*, 6(Icsusl 2015), 159–163. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2016.02.039>
- Djaman, K., O'Neill, M., Owen, C. K., Smeal, D., Koudahe, K., West, M., Allen, S., Lombard, K., & Irmak, S. (2018). Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate. *Water*

- (Switzerland), 10(4). <https://doi.org/10.3390/w10040405>
- Domínguez, A., Jiménez, M., Tarjuelo, J. M., de Juan, J. A., Martínez-Romero, A., & Leite, K. N. (2012). Simulation of onion crop behavior under optimized regulated deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 113, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.019>
- Domínguez, A., Martínez-Romero, A., Leite, K. N., Tarjuelo, J. M., de Juan, J. A., & López-Urrea, R. (2013). Combination of typical meteorological year with regulated deficit irrigation to improve the profitability of garlic growing in central Spain. *Agricultural Water Management*, 130, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.024>
- Domínguez, A., Martínez, R. S., De Juan, J. A., Martínez-Romero, A., & Tarjuelo, J. M. (2012). Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 107, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.006>
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. In *In FAO Irrigation and Drainage paper* (1979th ed.).
- EDIA. (2020). *Anuário Agrícola de Alqueva 2020*. [https://www.edia.pt/wp-content/uploads/2021/01/Anuario\\_Agricola\\_Alqueva\\_2020\\_ii.pdf](https://www.edia.pt/wp-content/uploads/2021/01/Anuario_Agricola_Alqueva_2020_ii.pdf)
- EDIA. (2021). *Anuário Agrícola de Alqueva 2021*. 1–212.
- El-Batal, M. A., Abdo, F. A., & Abdel-Gawad, M. H. (2009). Phenological Stages and Growing Degree Days for Different Soybean Cultivars. *Journal of Plant Production*, 34(4), 3639–3650. <https://doi.org/10.21608/jpp.2009.117189>
- Espadafor, M., Couto, L., Resende, M., Henderson, D. ., Garcá-Vila, M., & Fereres, E. (2017). *Simulation of the responses of dry beans (Phaseolus vulgaris L.) to irrigation*. [Www.Asabe.Org](http://www.asabe.org). <https://doi.org/10.13031/trans.12386>
- Faria de Sousa Maldonado, M. da C. (2018). *CARACTERIZAÇÃO E MODELAÇÃO DA Maria da Conceição Faria de Sousa Maldonado*. Instituto Superior de Agronomia.
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Fonseca, A., Andrade, C., & Santos, J. A. (2022). Agricultural Water Security under Climate

- Change in the Iberian Peninsula. *Water*, 14, 1–18. [https://doi.org/10.1163/9789047408185\\_008](https://doi.org/10.1163/9789047408185_008)
- Fotiadis, S., Koutroubas, S. D., & Damalas, C. A. (2017). Sowing date and cultivar effects on assimilate translocation in spring mediterranean chickpea. *Agronomy Journal*, 109(5), 2011–2024. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0048>
- Fraga, H., García de Cortázar Atauri, I., & Santos, J. A. (2018). Viticultural irrigation demands under climate change scenarios in Portugal. *Agricultural Water Management*, 196(October 2017), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.023>
- Fraga, Helder, Pinto, J. G., & Santos, J. A. (2020). Olive tree irrigation as a climate change adaptation measure in Alentejo, Portugal. *Agricultural Water Management*, 237(June 2019), 106193. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106193>
- Fraga, Helder, & Santos, J. A. (2021). Assessment of Climate Change Impacts on Chilling and Forcing for the Main Fresh Fruit Regions in Portugal. *Frontiers in Plant Science*, 12(June), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.689121>
- Funes, I., Savé, R., de Herralde, F., Biel, C., Pla, E., Pascual, D., Zabalza, J., Cantos, G., Borràs, G., Vayreda, J., & Aranda, X. (2021). Modeling impacts of climate change on the water needs and growing cycle of crops in three Mediterranean basins. *Agricultural Water Management*, 249(February). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106797>
- Giménez, L., Paredes, P., & Pereira, L. S. (2017). Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc models. *Water (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/w9060393>
- Griffin, T. S., Johnson, B. S., & Ritchie, J. T. (1993). A Simulation Model for Potato Growth and Development : *Soil Science*, January 1995, 32.
- Haddad, L., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Zerargui, H., Hannachi, A., Bachir, A., Salmi, M., Oulmi, A., Fellahi, Z. E. A., Nouar, H., & Laala, Z. (2016). Analysis of genotype × environment interaction for grain yield in early and late sowing date on durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes. *Jordan Journal of Biological Sciences*, 9(3), 139–146.
- Hakl, J., Šantrůček, J., Fuksa, P., & Krajíc, L. (2010). The use of indirect methods for the prediction of lucerne quality in the first cut under the conditions of Central Europe. *Czech Journal of Animal Science*, 55(6), 258–265. <https://doi.org/10.17221/86/2009-cjas>

- Hanks, R. J. (1974). *Model for Predicting Plant Yield as Influenced by Water Use*. 1804, 660–665.
- Hartz, T. K., & Bottoms, T. G. (2009). Nitrogen requirements of Drip-irrigated processing tomatoes. *HortScience*, 44(7), 1988–1993. <https://doi.org/10.21273/hortsci.44.7.1988>
- Haverkort, A. J., Franke, A. C., Steyn, J. M., Pronk, A. A., Caldiz, D. O., & Kooman, P. L. (2015). A Robust Potato Model: LINTUL-POTATO-DSS. *Potato Research*, 58(4), 313–327. <https://doi.org/10.1007/s11540-015-9303-7>
- Hengl, T., De Jesus, J. M., Heuvelink, G. B. M., Gonzalez, M. R., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangquan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. In *PLoS ONE* (Vol. 12, Issue 2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Hénin, R., Liberato, M. L. R., Ramos, A. M., & Gouveia, C. M. (2018). Assessing the use of satellite-based estimates and high-resolution precipitation datasets for the study of extreme precipitation events over the Iberian Peninsula. *Water (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/w10111688>
- Hijmans, R. J. (2021). *The raster package*.
- Hodges, T., Johnson, S. L., & Johnson, B. S. (1992). A Modular Structure for Crop Simulation Models: Implemented in the SIMPOTATO Model. *Agronomy Journal*, 84(5), 911–915. <https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400050027x>
- Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E. J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A. D., Brown, H., Whish, J. P. M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L. W., Peake, A. S., Poulton, P. L., Hochman, Z., ... Keating, B. A. (2014). APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling and Software*, 62, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop- The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>

INE - Instituto Nacional de Estadística. (2021). *Estatísticas Agrícolas 2020*.

Islam, A. T., Islam, A. S., Islam, G. T., Bala, S. K., Salehin, M., Choudhury, A. K., Dey, N. C., & Hossain, A. (2022). Adaptation strategies to increase water productivity of wheat under changing climate. *Agricultural Water Management*, 264(January), 107499. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107499>

Islam, M. R., & Sikder, S. (2011). Phenology and degree days of rice cultivars under organic culture. *Bangladesh Journal of Botany*, 40(2), 149–153. <https://doi.org/10.3329/bjb.v40i2.9770>

Jensen, M. E. (1968). Water consumption by agricultural plants BT - Water Deficits and Plant Growth, Vol. 1. *Water Deficits and Plant Growth, Vol. 1*, 1(1), 1–22. [papers2://publication/uuid/34BD5F31-8B30-474B-A2F1-D7898D7EC229](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(68)90001-7)

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

José Rodrigues, G. (2013). *Influência da irrigação e do manejo da desfolha sobre o balanço hídrico e produção de forragem de tifton 85*. Universidade Federal de Santa Maria.

Karandish, F., Kalanaki, M., & Saberali, S. F. (2016). Projected impacts of global warming on cropping calendar and water requirement of maize in a humid climate. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1177176>

Katerji, N., Campi, P., & Mastrorilli, M. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.005>

Kheir, A. M. S., Alrajhi, A. A., Ghoneim, A. M., Ali, E. F., Magrashi, A., Zoghdan, M. G., Abdelkhalik, S. A. M., Fahmy, A. E., & Elnashar, A. (2021). Modeling deficit irrigation-based evapotranspiration optimizes wheat yield and water productivity in arid regions. *Agricultural Water Management*, 256(August), 107122. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107122>

Kooman, P. L., & Haverkort, A. J. (1995). *Modelling development and growth of the potato*

- crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. Haverkort 1990*, 41–59. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-0051-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0051-9_3)
- Kumar, A., & Sinha, R. (2010). Journal of Food Legumes. *Journal of Food Legumes*, 23(March), 41–43. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22336.79365>
- Laurenson, S., Cichota, R., Reese, P., & Breneger, S. (2018). Irrigation runoff from a rolling landscape with slowly permeable subsoils in New Zealand. *Irrigation Science*, 36(2), 121–131. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0570-3>
- Léllis, B. C., Carvalho, D. F., Martínez-Romero, A., Tarjuelo, J. M., & Domínguez, A. (2017). Effective management of irrigation water for carrot under constant and optimized regulated deficit irrigation in Brazil. *Agricultural Water Management*, 192, 294–305. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.018>
- Li, M., Sui, R., Meng, Y., & Yan, H. (2019). A real-time fuzzy decision support system for alfalfa irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163(April), 104870. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104870>
- Linker, R., & Sylaios, G. (2016). Efficient model-based sub-optimal irrigation scheduling using imperfect weather forecasts. *Computers and Electronics in Agriculture*, 130, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.10.004>
- Linker, R., Sylaios, G., Tsakmakis, I., Ramos, T., Simionesei, L., Plauborg, F., & Battilani, A. (2018). Sub-optimal model-based deficit irrigation scheduling with realistic weather forecasts. *Irrigation Science*, 36(6), 349–362. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0592-x>
- Lyu, D., Doce, R. R., Juskiw, P., Zhou, G., & Baron, V. S. (2018). Diverse grain-filling dynamics affect harvest management of forage barley and triticale cultivars. *Agronomy Journal*, 110(3), 1017–1027. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.09.0549>
- Martínez-Romero, A., Domínguez, A., & Landeras, G. (2019). Regulated deficit irrigation strategies for different potato cultivars under continental Mediterranean-Atlantic conditions. *Agricultural Water Management*, 216(January), 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.030>
- Martins, D. S., Raziei, T., Paulo, A. A., & Pereira, L. S. (2012). Spatial and temporal variability of precipitation and drought in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(5), 1493–1501. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1493-2012>

- Martins, D S, Paulo, A. A., Pires, C., & Pereira, L. S. (2017). Long-term variation of PDSI and SPI computed with reanalysis products. *European Water*, 60(1), 271–278. [https://www.ewra.net/ew/pdf/EW\\_2017\\_60\\_37.pdf](https://www.ewra.net/ew/pdf/EW_2017_60_37.pdf)
- Martins, Diogo S, Paredes, P., Cadima, J., Pires, C. A. L., & Pereira, L. S. (2015). *Predictabilidade sazonal de secas: avaliação ao nível regional e agrícola* (C. A. L. Pires & L. S. Pereira (eds.); ISAPress). ISAPress.
- Martins, M. A., Tomasella, J., & Dias, C. G. (2019). Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. *Agricultural Water Management*, 216(2001), 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.011>
- Martins, M. Q. (2019). As alterações climáticas nas políticas públicas agrícolas e de desenvolvimento rural, no ensino e na investigação em Portugal. *XIII Jornadas Internacionais Sobre Grandes Problemáticas Do Espaço, May 2018*, 274–284. <https://doi.org/10.21747/9789898969149/alte>
- Matthews, R. B., Rivington, M., Muhammed, S., Newton, A. C., & Hallett, P. D. (2013). Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: The role of crop modelling. *Global Food Security*, 2(1), 24–28. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.11.009>
- Mibulo, T., & Kiggundu, N. (2018). Evaluation of FAO aquacrop model for simulating rainfed maize growth and yields in Uganda. *Agronomy*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy8110238>
- Middleton, N., & Thomas, D. (1997). *World Atlas of Desertification* (2<sup>a</sup>). Arnold Publishers.
- Mkhabela, M. S., & Bullock, P. R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.03.009>
- Monneveux, P., Ramírez, D. A., Khan, M. A., Raymundo, R. M., Loayza, H., & Quiroz, R. (2014). Drought and Heat Tolerance Evaluation in Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Potato Research*, 57(3–4), 225–247. <https://doi.org/10.1007/s11540-014-9263-3>
- Montoya, F., Camargo, D., Córcoles, J. I., Domínguez, A., & Ortega, J. F. (2019). Analysis of deficit irrigation strategies by using SUBSTOR-Potato model in a semi-arid area. *Journal of Agricultural Science*, 157(7–8), 578–591.

<https://doi.org/10.1017/S002185961900090X>

- Montoya, F., Camargo, D., Ortega, J. F., Córcoles, J. I., & Domínguez, A. (2016). Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, *164*, 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.019>
- Mote, B. M., Kumar, N., & Ban, Y. G. (2015). Thermal requirements for attainment of phenophases of rice cultivars under variable weather conditions. *Plant Archives*, *15*(2), 987–990.
- Nishad, Y., Gandhi Krishi Vshwavidyalaya, I., ASRAS Sastri, I., Usha Durgam, I., Correspondence Yamlesh Nishad, I., Sastri, A., & Durgam, U. (2018). Evaluation and computing study of crop phenology and agrometeorological indices i.e. GDD, HTU and other growth parameters. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *7*(6), 268–273.
- Nv, C., Kumar, N., Pk, P., Kk, D., & Sn, C. (2019). Thermal indices in relation to crop phenology and yield of rice ( *Oryza sativa* L .) grown in the south Gujarat region. *Journal of Pharmacognosey and Phytochemistry*, *8*(2), 146–149.
- O. Rauff, K., & Bello, R. (2015). A Review of Crop Growth Simulation Models as Tools for Agricultural Meteorology. *Agricultural Sciences*, *06*(09), 1098–1105. <https://doi.org/10.4236/as.2015.69105>
- Onder, S., Caliskan, M. E., Onder, D., & Caliskan, S. (2005). Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components. *Agricultural Water Management*, *73*(1), 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.023>
- Ouda, S., Noreldin, T., Alarcón, J. J., Ragab, R., Caruso, G., Sekara, A., & Abdelhamid, M. T. (2021). Response of spring wheat (*Triticum aestivum*) to deficit irrigation management under the semi-arid environment of egypt: Field and modeling study. *Agriculture (Switzerland)*, *11*(2), 1–13. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020090>
- Pala, M., Stockle, C. O., & Harris, H. C. (1996). Simulation of Durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. Durum) growth under different water and nitrogen regimes in a Mediterranean environment using CropSyst. *Agricultural Systems*, *51*(2), 147–163. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(95\)00043-5](https://doi.org/10.1016/0308-521X(95)00043-5)
- Pandži, M., Ljubii, N., Mimić, G., Pandži, J., Pejak, B., & Crnojević, V. (2020). A case study of monitoring maize dynamics in serbia by utilizing sentinel-1 data and growing degree

- days. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5(3), 117–124. <https://doi.org/10.5194/isprs-Annals-V-3-2020-117-2020>
- Paredes, P., Rodrigues, G.C., 2010. Necessidades de água para a rega de milho em Portugal continental considerando condições de seca. In: LS Pereira, JT Mexia, CA Pires (eds.) *Gestão do Risco em Seca. Métodos, Tecnologias e Desafios*. Edições Colibri e CEER, pp. 301-319
- Paredes, P., Rodrigues, G. C., Alves, I., & Pereira, L. S. (2014). Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies. *Agricultural Water Management*, 135, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.010>
- Paredes, Paula, D'Agostino, D., Assif, M., Todorovic, M., & Pereira, L. S. (2018). Assessing potato transpiration, yield and water productivity under various water regimes and planting dates using the FAO dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, 195, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.011>
- Paredes, Paula, Rodrigues, G. C., Cameira, M. do R., Torres, M. O., & Pereira, L. S. (2017). Assessing yield, water productivity and farm economic returns of malt barley as influenced by the sowing dates and supplemental irrigation. *Agricultural Water Management*, 179, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.033>
- Paredes, Paula, Rodrigues, G. C., Cameira, M. do R., Torres, M. O., Pereira, L. S., Rodrigues, G. C., Alves, I., Rosário Cameira, M., Melo-Abreu, J. P., Odete Torres, M., & Pereira, L. S. (2017). Calendários de rega para condições de seca e sua avaliação pela produtividade da água. Aplicação a cevada e milho. *Agricultural Water Management*, 35(1), 27–41. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0520-x>
- Paredes, Paula, & Torres, M. O. (2017). Parameterization of AquaCrop model for vining pea biomass and yield predictions and assessing impacts of irrigation strategies considering various sowing dates. *Irrigation Science*, 35(1), 27–41. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0520-x>
- Paredes, Paula, Trigo, I., de Bruin, H., Simões, N., & Pereira, L. S. (2021). Daily grass reference evapotranspiration with Meteosat Second Generation shortwave radiation and reference ET products. *Agricultural Water Management*, 248(September 2020). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106543>

- Parker, W. S. (2016). Reanalyses and observations: What's the Difference? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(9), 1565–1572. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00226.1>
- Pathak, T. B., & Stoddard, C. S. (2018). Climate change effects on the processing tomato growing season in California using growing degree day model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(2), 765–775. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0460-y>
- Paulo, A. A., Rosa, R. D., & Pereira, L. S. (2012). Climate trends and behaviour of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(5), 1481–1491. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1481-2012>
- Paulo, Ana A., Martins, D. S., Paredes, P., Rosa, R., & Pereira, L. S. (2017). Modification of the Palmer Drought Severity Index for Mediterranean environments. Model and Application. *Ewra 2017, 2007*, 195–201.
- Pereira, L. S., Paredes, P., Hunsaker, D. J., López-Urrea, R., & Mohammadi Shad, Z. (2021). Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agricultural Water Management*, 243(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106466>
- Pereira, L. S., Paredes, P., & Jovanovic, N. (2020). Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, 241(February), 106357. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>
- Pereira, L. S., Teodoro, P. R., Rodrigues, P. N., & Teixeira, J. L. (2003). *Irrigation Scheduling Simulation: The Model Isareg*. January 2017, 161–180. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0129-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0129-8_10)
- Pereira, Luis S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, 108, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>
- Pereira, Luis S., Paredes, P., Rodrigues, G. C., & Neves, M. (2015). Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. *Agricultural Water Management*, 159, 239–254. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.006>

- Pereira, Luis Santos. (2017). Water, Agriculture and Food: Challenges and Issues. *Water Resources Management*, 31(10), 2985–2999. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1664-z>
- Piekutowska, M., Wojciechowski, T., Czechowska-kosacka, A., & Oliveira, K. W. (2018). *Modeling Methods of Predicting Potato Yield - Examples Metody Modelowania Predykcji Plonu Ziemniaków – Przykłady*. 63(4), 176–180.
- Premdeep, Khichar, M., Niwas, R., Singh, M., & Kumar, S. (2019). Agrometeorological indices in relation to phenology of wheat. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2500–2503.
- Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E. 2016. Crop Water Productivity. Calculation Procedures and Calibration Guidance; AquaCrop version 4.6; FAO: Rome, Italy
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2012). AquaCrop Version 4.0:Chapter 3 Calculation Procedures:FAO, Land and Water Division. In *Reference Manual AquaCrop Version 4.0* (Issue June).
- Rajanna, G. A., & Dhindwal, A. S. (2019). Water dynamics, productivity and heat use efficiency responses in wheat (*Triticum aestivum*) to land configuration techniques and irrigation schedules. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 89(6), 912–919.
- Ran, H., Kang, S., Li, F., Du, T., Tong, L., Li, S., Ding, R., & Zhang, X. (2018). Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 203(January), 438–450. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.030>
- Ray, M., Sahoo, K. C., Mohanty, T. R., Mishra, P., Mishra, N., Sahoo, S. K., & Tudu, S. (2020). Effect of Climate Change on Productivity and Profitability of Chickpea Cultivars under Various Dates of Sowing in Rice Fallows. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 39(31), 116–124. <https://doi.org/10.9734/cjast/2020/v39i3130997>
- Raymundo, R., Asseng, S., Cammarano, D., & Quiroz, R. (2014). Potato, sweet potato, and yam models for climate change: A review. *Field Crops Research*, 166, 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.06.017>

- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8(2), 1–29. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>
- Renato, N. dos S., Silva, J. B. L., Sediya, G. C., & Pereira, E. G. (2013). Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(4), 382–388. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400004>
- Richter, G. M., Acutis, M., Trevisiol, P., Latiri, K., & Confalonieri, R. (2010). Sensitivity analysis for a complex crop model applied to Durum wheat in the Mediterranean. *European Journal of Agronomy*, 32(2), 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.09.002>
- Ritchie, S. W., Hanway, J. J., & Benson, G. O. (1993). How a Corn Plant Develops. In *Iowa Agricultural and Home Economics Experiment Station Publications* (Vol. 48, Issue Jan).
- Rodrigues, G. C., Paredes, P., Gonçalves, J. M., Alves, I., & Pereira, L. S. (2013). Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns. *Agricultural Water Management*, 126, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.005>
- Rodrigues, G. C., & Pereira, L. S. (2009). Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. *Biosystems Engineering*, 103(4), 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.05.002>
- Rodrigues, P.N., Machado, T., Pereira, L.S, Teixeira, J.L., El Amami, H., Zairi, A., 2003. Feasibility of deficit irrigation with center-pivot to cope with limited water supplies in Alentejo, Portugal. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L. S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (Eds.) *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, pp. 203-222. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0129-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0129-8_12)
- Rolim, J., & Teixeira, J. (2008). IrrigRotation, a time continuous soil water balance model. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 4(7), 577–587.
- Rosa, R. D., Paredes, P., Rodrigues, G. C., Alves, I., Fernando, R. M., Pereira, L. S., & Allen, R. G. (2012). Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agricultural Water Management*, 103, 8–24.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.013>

- Rose, S., & Apt, J. (2015). What can reanalysis data tell us about wind power? *Renewable Energy*, 83, 963–969. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.027>
- Roy, S., Sikder, S., & Kumer Pramanik, S. (2018). PHENOLOGY AND HEAT USE EFFICIENCY OF WHEAT GENOTYPES UNDER HEAT STRESS CONDITION. *Agricultural and Rural Research*, 2, 15–20.
- Royer, A. C., Figueiredo, T. de, Fonseca, F., Araújo Schütz, F. C. de, & Hernández, Z. (2021). Trends of change in precipitation and in drought susceptibility as assessed by the standardized precipitation index (SPI) in northeast Portugal. *Territorium*, 28(V), 13–26. [https://doi.org/https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_28-2\\_2](https://doi.org/https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-2_2)
- Saab, M. T. A., Albrizio, R., Nangia, V., Karam, F., & Roupheal, Y. (2014). Developing scenarios to assess sunflower and soybean yield under different sowing dates and water regimes in the Bekaa valley (Lebanon): Simulations with Aquacrop. *International Journal of Plant Production*, 8(4), 457–482. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2014.1720>
- Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2015). Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, 147, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.008>
- Saiyed, I. M., Bullock, P. R., Sapirstein, H. D., Finlay, G. J., & Jarvis, C. K. (2009). Thermal time models for estimating wheat phenological development and weather-based relationships to wheat quality. *Canadian Journal of Plant Science*, 89(3), 429–439. <https://doi.org/10.4141/CJPS07114>
- Salman, M., García-Vila, M., Fereres, E., Raes, D., & Steduto, P. (2021). The AquaCrop model: enhancing crop water productivity. In *The AquaCrop model: Enhancing crop water productivity*. <https://doi.org/10.4060/cb7392en>
- Sandhu, R., & Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223(July), 105687. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105687>
- Santos, J. F., Pulido-Calvo, I., & Portela, M. M. (2010). Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. *Water Resources Research*, 46(3), 1–13.

<https://doi.org/10.1029/2009WR008071>

- Schulz, V. S., Munz, S., Stolzenburg, K., Hartung, J., Weisenburger, S., & Graeff-Hönninger, S. (2019). Impact of different shading levels on growth, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomy*, *9*(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy9060330>
- Seijo-Rodríguez, A., Escuredo, O., Rodríguez-Flores, M. S., & Seijo, M. C. (2018). Improving the use of aerobiological and phenoclimatological data to forecast the risk of late blight in a potato crop. *Aerobiologia*, *34*(3), 315–324. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9515-9>
- Shepherd, M., Lucci, G., Vogeler, I., & Balvert, S. (2018). The effect of drought and nitrogen fertiliser addition on nitrate leaching risk from a pasture soil; an assessment from a field experiment and modelling. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *98*(10), 3795–3805. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.8893>
- Si, Z., Zain, M., Li, S., Liu, J., Liang, Y., Gao, Y., & Duan, A. (2021). Optimizing nitrogen application for drip-irrigated winter wheat using the DSSAT-CERES-Wheat model. *Agricultural Water Management*, *244*(380), 106592. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106592>
- Siad, S. M., Iacobellis, V., Zdruli, P., Gioia, A., Stavi, I., & Hoogenboom, G. (2019). A review of coupled hydrologic and crop growth models. *Agricultural Water Management*, *224*(August), 105746. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105746>
- Soares, P. M. M., Cardoso, R. M., Miranda, P. M. A., de Medeiros, J., Belo-Pereira, M., & Espirito-Santo, F. (2012). WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal. *Climate Dynamics*, *39*(9–10), 2497–2522. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1315-2>
- Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*.
- Soukissian, T. H., Karathanasi, F. E., & Zaragkas, D. K. (2021). Exploiting offshore wind and solar resources in the Mediterranean using ERA5 reanalysis data. *Energy Conversion and Management*, *237*, 114092. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114092>
- Sousa, V., & Pereira, L. S. (1999). Regional analysis of irrigation water requirements using kriging: Application to potato crop (*Solanum tuberosum* L.) at Tras-os-Montes. *Agricultural Water Management*, *40*(2–3), 221–233. <https://doi.org/10.1016/S0378->

- Spinoni, J., Vogt, J., & Barbosa, P. (2015). European degree-day climatologies and trends for the period 1951-2011. *International Journal of Climatology*, 35(1), 25–36. <https://doi.org/10.1002/joc.3959>
- Šťastná, M., Toman, F., & Dufková, J. (2010). Usage of SUBSTOR model in potato yield prediction. *Agricultural Water Management*, 97(2), 286–290. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.015>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water. In *FAO Irrigation and Drainage Paper No.66*.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Stewart, J. I., Hagan, R. M., Pruitt, W. O., Danielson, R. E., Franklin, W. T., Hanks, R. J., Riley, J. P., & Jackson, E. B. (1977). Optimising crop production through control of water salinity levels in the soil. In *Paper 67* (Issue January). [https://digitalcommons.usu.edu/water\\_rep/67%0AThis](https://digitalcommons.usu.edu/water_rep/67%0AThis)
- Stöckle, C. O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 289–307. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0)
- Stöckle, C. O., Martin, S. A., & Campbell, G. S. (1994). CropSyst, a cropping systems simulation model: Water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems*, 46(3), 335–359. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)90006-2)
- T. Parthasarathi, G. V. P. J. (2013). Impact of Crop Heat Units on Growth and Developmental Physiology of Future Crop Production: A Review. *Research & Reviews : Journal of Crop Science and Technology*, 2(1), 11–18. <http://www.stmjournals.com/sci/index.php?journal=RRJoCST&page=article&op=view&path%5B%5D=311%5Cn>
- Tafes Desta, B., Meseret Gezahegn, A., Eshetu, S., & Takele, A. (2020). Optimizing Sowing Date for the Productivity of Durum Wheat (*Triticum turgidum* L. var. Durum) in Central Highland of Ethiopia. *Agriculture, Forestry and Fisheries*, 9(2), 28.

<https://doi.org/10.11648/j.aff.20200902.12>

- Talagrand, O. (1997). Assimilation of Observations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 75(43), 191–209. <http://www.mendeley.com/research/geology-volcanic-history-eruptive-style-yakedake-volcano-group-central-japan/>
- Tandzi, L. N., & Mutengwa, C. S. (2019). Estimation of Maize (*Zea mays* L.) Yield Per Harvest Area: Appropriate methods. *Agronomy*, 10(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010029>
- Teixeira, J. L., & Rolim, J. (2014). Cenários de Alteração Climática. In *Impacte Das Alterações Climáticas Nos Sistemas De Regadio No Alentejo*. ISAPress.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M. T., Stöckle, C., & Steduto, P. (2009). Assessment of aquacrop, cropsyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101(3), 509–521. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0166s>
- Tomaz, A., Patanita, M., Oliveira, P., Boteta, L., Dôres, J., Guerreiro, J., & Palma, J. F. (2018). *Respostas produtivas do trigo mole à rega e à fertilização azotada em condições Mediterrânicas Productive responses of soft wheat to irrigation and nitrogen fertilization in Mediterranean conditions*. 1–10.
- Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., & Tóth, G. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, 66(1), 226–238. <https://doi.org/10.1111/ejss.12192>
- Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L., & Chehbouni, A. (2016). Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, 163, 219–235. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.007>
- Trenberth, K. E., Koike, T., & Onogi, K. (2008). Progress and prospects for reanalysis for weather and climate. *Eos*, 89(26), 234–235. <https://doi.org/10.1029/2008EO260002>
- Trombetta, A., Iacobellis, V., Tarantino, E., & Gentile, F. (2016). Calibration of the AquaCrop model for winter wheat using MODIS LAI images. *Agricultural Water Management*, 164(Part 2), 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.013>

- Trout, T. J., & DeJonge, K. C. (2017). Water productivity of maize in the US high plains. *Irrigation Science*, 35(3), 251–266. <https://doi.org/10.1007/s00271-017-0540-1>
- Trout, T. J., & DeJonge, K. C. (2018). Crop Water Use and Crop Coefficients of Maize in the Great Plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(6), 04018009. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0001309](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001309)
- van Diepen, C. A., Wolf, J., van Keulen, H., & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5(1), 16–24. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., Garcia Vila, M., & Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, 62, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
- Vélez-Sánchez, J. E., Balaguera-López, H. E., & Alvarez-Herrera, J. G. (2021). Effect of regulated deficit irrigation (RDI) on the production and quality of pear Triunfo de Viena variety under tropical conditions. *Scientia Horticulturae*, 278(May 2020). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109880>
- Vogeler, I., & Cichota, R. (2016). Deriving seasonally optimal nitrogen fertilization rates for a ryegrass pasture based on agricultural production systems simulator modelling with a refined AgPasture model. *Grass and Forage Science*, 71(3), 353–365. <https://doi.org/10.1111/gfs.12181>
- Wang, W., Dong, X., Lu, Y., Liu, X., Zhang, R., Li, M., Tian, L., Ding, Y., & Pu, X. (2018). Soil Water Balance and Water Use Efficiency of Rain-fed Maize under a Cool Temperate Climate as Modeled by the AquaCrop. *MATEC Web of Conferences*, 246. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824601059>
- Wannasek, L., Ortner, M., Amon, B., & Amon, T. (2017). Sorghum, a sustainable feedstock for biogas production? Impact of climate, variety and harvesting time on maturity and biomass yield. *Biomass and Bioenergy*, 106(2017), 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.031>
- Wilhite, D. A. (2019). Integrated drought management: moving from managing disasters to managing risk in the Mediterranean region. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 4(1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s41207-019-0131-z>

- Yamaguchi, C. K., Stefenon, S. F., Ramos, N. K., dos Santos, V. S., Forbici, F., Klaar, A. C. R., Ferreira, F. C. S., Cassol, A., Marietto, M. L., Yamaguchi, S. K. F., & de Borba, M. L. (2020). Young people's perceptions about the difficulties of entrepreneurship and developing rural properties in family agriculture. *Sustainability*, *12*(21), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su12218783>
- Yang, C., Fraga, H., Ieperen, W. Van, & Santos, J. A. (2017). Assessment of irrigated maize yield response to climate change scenarios in Portugal. *Agricultural Water Management*, *184*, 178–190. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.004>
- Yang, C., Fraga, H., van Ieperen, W., & Santos, J. A. (2020). Assessing the impacts of recent-past climatic constraints on potential wheat yield and adaptation options under Mediterranean climate in southern Portugal. *Agricultural Systems*, *182*(November 2019), 102844. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102844>
- Yu, L., Zhao, X., Gao, X., & Siddique, K. H. M. (2019). Improving/maintaining water-use efficiency and yield of wheat by deficit irrigation: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, *228*(June). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105906>
- Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, *170*(January), 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>
- Zhang, Y., Zhang, L., Yang, N., Huth, N., Wang, E., van der Werf, W., Evers, J. B., Wang, Q., Zhang, D., Wang, R., Gao, H., & Anten, N. P. R. (2019). Optimized sowing time windows mitigate climate risks for oats production under cool semi-arid growing conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, *266–267*(October 2018), 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.019>
- Zhao, N., Yu, F., Li, C., Wang, H., Liu, J., & Mu, W. (2014). Investigation of rainfall-runoff processes and soil moisture dynamics in grassland plots under simulated rainfall conditions. *Water (Switzerland)*, *6*(9), 2671–2689. <https://doi.org/10.3390/w6092671>
- Zwart, S. J., Bastiaanssen, W. G. M., de Fraiture, C., & Molden, D. J. (2010). WATPRO: A remote sensing based model for mapping water productivity of wheat. *Agricultural Water Management*, *97*(10), 1628–1636. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.017>
- Žydelis, R., Weihermüller, L., Herbst, M., Klosterhalfen, A., & Lazauskas, S. (2018). A model study on the effect of water and cold stress on maize development under nemoral climate.

*Agricultural and Forest Meteorology*, 263(March), 169–179.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.011>

## 7. Anexos

### Anexo I – Unidades de análise NUTS

Quadro 13 - Constituição das NUTS 2013 (Fonte: INE 2015).

NUTS I	NUTS II	NUTS III
Continente	Norte	Alto Minho
		Cávado
		Ave
		Área Metropolitana do Porto
		Alto Tâmega
		Tâmega e Sousa
		Douro
		Terras de Trás-os-Montes
	Centro	Oeste
		Região de Aveiro
		Região de Coimbra
		Região de Leiria
		Viseu Dão Lafões
		Beira Baixa
		Médio Tejo
		Beiras e Serra da Estrela
	Área Metropolitana de Lisboa	Área Metropolitana de Lisboa
	Alentejo	Alentejo Litoral
		Baixo Alentejo
		Lezíria do Tejo
		Alto Alentejo
		Alentejo Central
	Algarve	Algarve