

# **Distribuição espacial das necessidades de rega das culturas no Perímetro de Rega do Lucefecit com recurso a imagens de satélite com elevada resolução espaço-temporal**

**Pedro Poucochinho Aparício**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Agronómica com especialização em Engenharia Rural**

Orientadores: Doutora Maria do Rosário da Conceição Cameira

Doutor João Rui Rolim Fernandes Machado Lopes

**Júri:**

Presidente: Doutor Joaquim Miguel Rangel da Cunha Costa, Professor auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Vogais: Doutor José Luís Monteiro Teixeira, Professor associado jubilado do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Doutora Elisabete Tavares Lacerda de Figueiredo Oliveira, Professora auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Doutor João Rui Rolim Fernandes Machado Lopes, Professor auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

## **Agradecimentos**

Esta dissertação de mestrado simboliza o final de mais um longo ciclo e o atingir de uma importante meta. É o resultado de muitas horas de trabalho e de muito esforço, mas seria impossível de concluir sem o apoio e contributo de várias pessoas e do Instituto Superior de Agronomia, que é muito mais do que uma Universidade, ao longo destes inesquecíveis 5 anos.

Quero começar por dedicar esta dissertação ao meu sobrinho Simão Aparício Albernaz que nasceu 2 dias antes da entrega da versão provisória. Que este trabalho, e a experiência adquirida neste ciclo, possam ser-lhe uteis no futuro.

Aos professores orientadores Maria do Rosário da Conceição Cameira e João Rui Rolim Fernandes Machado Lopes, pela excelente orientação, pelas correções, ensinamentos e ajuda, e, acima de tudo, pela motivação que nunca se esgotava, paciência e disponibilidade total ao longo deste trabalho.

À minha família, porque a Família é a base de tudo, quero agradecer por todo o apoio, em especial à minha irmã Mariana Aparicio, pela ajuda imprescindível, companhia e correções ao longo de todo o trabalho e também pela paciência e disponibilidade. Aos meus Pais, por todo o apoio, paciência e fé, que sempre demonstraram durante toda a minha vida.

Aos meus amigos mais próximos de longa data, que já fazem parte da minha família, nomeadamente Rodrigo Albernaz, José Brandão, Rui Matos, João Ferreira, Nelson Silva, José Vilhena e Miguel Pereira, pelo apoio anímico e por estarem sempre presentes nos momentos fáceis, mas sobretudo nos mais difíceis.

E por último aos restantes familiares, amigos e colegas, pelas boas experiências que partilhámos.

## Resumo

Devido à escassez de água e num contexto de alterações climáticas, é fundamental a implementação, nos Aproveitamentos Hidroagrícolas das regiões mediterrânicas, de práticas melhoradas de gestão da rega. Estas devem abranger diferentes etapas, desde a captação da água na origem, até à rede de rega terciária, à escala da parcela do regante. Na base desta melhoria está a correta quantificação das necessidades de rega (NR) ao nível da parcela agrícola e a sua espacialização ao Perímetro de Rega (PR).

Pretendeu-se com este trabalho estimar as necessidades globais de rega do PR do Lucefecit com recurso a Sistemas de Informação Geográfica que permitiram gerir uma grande quantidade com representação espacial e temporal. Os dados foram organizados em camadas climáticas, pedológicas, culturais, administrativas e sistemas de rega, com o objetivo de obter um mapa final com a informação agregada por unidades homogêneas de análise. Utilizaram-se, também, técnicas de Detecção Remota, a partir da plataforma *Google Earth Engine*, imagens do Sentinel-2 para o cálculo de *NDVI* de forma a melhorar a estimativa da curva dos coeficientes culturais. O balanço hídrico modelado com o ISAREG calculou as NR que alimentaram um mapa final com a sua distribuição espacial.

Os resultados mostram que o aproveitamento hidroagrícola do Lucefecit consome 28,3% a mais das NR simuladas, o que equivale a uma diferença de 158 mm, e que as culturas que mais contribuem para essa diferença são as culturas dos cereais de outono-inverno (com um consumo 231% superior às NR), as pastagens (com um consumo 27,1% superior às NR) e o Milho (com um consumo 20,4% superior às NR). Verifica-se que o caudal de projeto do PRL tem uma capacidade superior à atualmente utilizada, sendo possível aumentar a área regada ou utilizar culturas mais exigentes em rega, com sistemas culturais mais intensivos.

**Palavras-chave:** Sistemas de Informação Geográfica, Detecção Remota, Google Earth Engine, Balanço Hídrico do Solo, Necessidades globais de rega.

## **Abstract**

Due to water scarcity and in a context of climate change, it is essential to implement improved irrigation management practices in the Irrigation Districts of the Mediterranean regions. These should cover different stages, from water collection at source, to the tertiary irrigation network, at the irrigated plot scale. In the basis of this improvement is the correct quantification of irrigation requirements at the plot level and its spatialization to the Irrigation District (ID).

The aim of this work was to estimate the global irrigation requirements (IR) of Lucefecit ID using Geographic Information Systems that allowed managing a large amount of data with spatial and temporal representation. The data were organized in climatic, pedological, cultural, administrative and irrigation systems, with the objective of obtaining a final map with the information aggregated by homogeneous units of analysis. Remote Sensing techniques were also used from the Google Earth Engine platform to obtain Sentinel-2 images for the calculation of NDVI in order to improve the estimation of the crop coefficient curves. The soil water balance modeled with ISAREG computed the IR that fed a final map with the spatial distribution of the volumes consumed in the ID.

The results show that the Lucefecit ID consumes 28.3% more of the simulated irrigation requirements, which is equivalent to a difference of 158 mm, and that the crops that most contribute to this difference are the autumn winter cereal (with consumption 231% higher than IR), pastures (with consumption 27.1% higher than IR) and maize (with consumption 20.4% higher than IR). It can be seen that the Lucefecit ID design flow rate has a higher capacity than the one currently used, in this way, it is possible to increase the irrigated area using crops that are more demanding in irrigation requirements, with more intensive cultural systems.

**Key-words:** Geographic Information Systems, Remote Sensing, Gloogle Eath Engine, Global irrigation requirements.

# Conteúdo

Índice de Figuras .....	V
Índice de Quadros .....	VIII
Lista de Símbolos .....	IX
Lista de Acrónimos, siglas e abreviaturas .....	XI
1. Introdução .....	1
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	3
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1. A utilização da água pela agricultura nas regiões mediterrânicas .....	4
2.2. Necessidades de rega das culturas .....	6
2.2.1. Necessidades hídricas .....	6
2.2.2. Balanço hídrico.....	11
2.2.3. Modelo ISAREG .....	13
2.2.4. Eficiência de rega .....	15
2.3. Deteção Remota e os SIG como ferramentas de apoio nos estudos de regadio .....	16
2.3.1. Deteção remota .....	17
2.3.2. Aplicação de sistemas de Informação Geográfica na área da rega .....	24
3. Materiais e Métodos .....	26
3.1. Caracterização da região em estudo .....	27
3.1.1. Localização.....	27
3.1.2. Principais infraestruturas do Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit .....	28
3.1.3. Caracterização climática .....	32
3.1.4. Caracterização edáfica .....	33
3.1.5. Ocupação cultural .....	34
3.2. Origens dos dados .....	35
3.3. Métodos para tratamento da informação.....	36
3.3.1. Tratamento das camadas base de informação.....	36
3.3.2. Unidades homogéneas de análise cultura-solo para modelação .....	42
3.3.3. Caracterização dos parâmetros culturais para a modelação .....	42
3.3.4. Modelação das necessidades de rega líquidas anuais e de ponta.....	49
3.3.5. Mapa das necessidades de rega por parcela.....	52
3.3.6. Necessidades globais de rega e caudal fictício .....	54
4. Análise e discussão de resultados.....	55
4.1. Unidades homogéneas de análise .....	55

4.2.	Caraterização fenológica das culturas.....	56
4.2.1.	Determinação das parcelas médias e das curvas de Kc.....	56
4.2.2.	Determinação dos valores de Kc para cada fase fenológica.....	62
4.2.3.	Resultados da fenologia das culturas .....	64
4.3.	Esquemas de rega utilizados na modelação .....	66
4.4.	Necessidades de rega para o PRL.....	68
4.4.1.	Necessidades de rega líquidas para cada UHA cultura-solo .....	68
4.4.2.	Necessidades de rega por classe cultural.....	69
4.4.3.	Necessidades de rega de ponta e caudal de ponta por classe cultural .....	74
4.4.4.	Necessidades globais de rega e caudal de ponta global ao nível do perímetro.....	75
5.	Conclusões e perspetivas .....	76
6.	Referências bibliográficas.....	79
7.	Anexos.....	88

## Índice de Figuras

Figura 2.1.	Representação da curva dos coeficientes culturais de uma cultura anual com as correspondentes definições dos períodos vegetativos (Pereira, 2004). .....	10
Figura 2.2.	Esquema do reservatório do solo onde estão apresentadas as variáveis do balanço hídrico e as 4 zonas de como é dividido o reservatório: uma zona de saturação em que a água não é imediatamente utilizável (acima da CC), uma zona de conforto hídrico (entre CC e LRFU), uma zona de carência hídrica (entre o LRFU e CE) e uma zona onde da água não utilizável. A variável R indica a reserva útil do solo num determinado dia (Teixeira, 2021). .....	12
Figura 2.3.	Esquema genérico do programa ISAREG (Teixeira, 2021). .....	14
Figura 2.4.	a) Plataforma e respetivos sensores comumente usados na deteção remota; b) representação dos dados obtidos por alguns desses sensores (Lechner <i>et al.</i> , 2020); c) seis tipos de sistemas de DR, comparando a geometria interna do sensor (resolução espectral) com a relação espacial entre a plataforma e o solo (resolução espacial) (Mendes, 2013)(Schuckman & Dutton, 2009).....	18
Figura 2.5.	a) Espectro da radiação eletromagnético (Texas, 2014); b) curvas de reflectância espectral para diferentes superfícies (Pereira, 2018); c) curvas de reflectância espectral da vegetação para diferentes culturas (Ashraf <i>et al.</i> , 2011).....	21
Figura 2.6.	a) Relação das reflectância nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo entre uma planta saudável (maior vigor vegetativo) e uma planta doente ou em fim de vida (EOS, 2020) b) Imagem de NDVI em tempo real de uma parcela de milho (terraDrone, 2019).....	23
Figura 2.7.	Exemplo de uma operação típica na utilização de SIG (adaptado de ShaleTrak, 2017) ....	24
Figura 3.1.	Fluxograma simplificado dos métodos utilizados. ....	26

Figura 3.2. a) Localização de área de estudo em Portugal e na bacia hidrográfica do rio Guadiana; b) limites do PRL.....	27
Figura 3.3. Mapa da localização das estações elevatórias, reservatórios, condutas, canais, hidrantes e tomadas existentes no Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit (ABL, 2021).....	28
Figura 3.4. Barragem do Lucefecit: Fotos dos descarregadores de cheia, coroamento e do paramento a montante (lado esquerdo) e da tomada de água (lado direito), retirado de DGADR (2014). .....	28
Figura 3.5. Volume mensal armazenado na albufeira do Lucefecit (médias de 2001 a 2020), volumes mensais consumidos pela atividade agrícola no AHL (médias de 2001-2009) e cotas médias mensais atingidas na barragem do Lucefecit entre 2001 e 2020 (adaptado de SNIRH, 2021). .....	29
Figura 3.6. Mapa da distribuição espacial da rede secundária.....	30
Figura 3.7. Tipologia e frequência relativa dos sistemas de rega presentes no PRL. ....	31
Figura 3.8. Mapa da distribuição espacial dos sistemas de rega por parcela.....	31
Figura 3.9. Localização das estações meteorológicas nas proximidades do local de estudo e áreas de influência (método de Thiessen) (COTR, 2021).....	32
Figura 3.10. Médias mensais acumuladas da precipitação, da evapotranspiração e do déficit hídrico para o período de 2002 a 2020, obtidas pela estação meteorológica do Redondo (COTR, 2021) .....	32
Figura 3.11. Frequência relativa de cada solo presente no PRL.....	33
Figura 3.12. Mapa da distribuição e classificação dos solos presentes no PRL. ....	33
Figura 3.13. Frequência relativa da área ocupada por cada cultura regada do PRL e da área não regada. ....	34
Figura 3.14. Mapa da ocupação cultural do PRL.....	34
Figura 3.15. Exemplo da correção do perímetro regado. A linha vermelha corresponde à delimitação original e a linha verde corresponde à correção efetuada.....	37
Figura 3.16. Atributos da camada mapa de solos ABL.....	38
Figura 3.17. Exemplo do resultado quando aplicado o método de aglutinação por localização: a) camada depois da aplicação do método e agregada; b) camada antes da aplicação do método. Verifica-se, por exemplo, que o objeto geométrico com a classe representada a amarelo foi aglutinado ao objeto contínuo da classe representada a rosa, ou que o objeto da classe representada a verde foi aglutinado pela classe representada a azul escuro.....	38
Figura 3.18. Nova frequência relativa da ocupação das famílias de solos presente no PRL.....	38
Figura 3.19. Mapa da distribuição espacial das classes de solos utilizadas na modelação. ....	39
Figura 3.20. Serie temporal de NDVI; exemplo para uma parcela da cultura da Luzerna ( — ). .....	39
Figura 3.21. Frequência relativa da ocupação das classes culturais no PRL.....	40
Figura 3.22. Mapa da distribuição espacial das classes de cultura utilizadas na modelação das necessidades de rega. ....	40

Figura 3.23. Exemplo da evolução ao longo do ano de 2020 dos padrões de NDVI das culturas a partir das imagens de satélite. A linha azul delimita as áreas de culturas perenes e a linha vermelha as áreas de culturas anuais. As imagens correspondem aos meses de fevereiro (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d).....	44
Figura 3.24. Exemplo do ajuste realizado na obtenção das parcelas de amostra do NDVI para a cultura da vinha. A linha vermelha corresponde ao limite da parcela dos dados originais e a linha azul aos limites das parcelas de amostra do NDVI. As imagens a), c) e e) pertencem ao Google e as imagens b), d) e f) às imagens de satélite obtidas com o parâmetro de visualização com a banda NDVI para o mês maio. ....	45
Figura 3.25. Valores de $K_r$ de acordo com a percentagem da cobertura do solo (Rojas <i>et al.</i> , 1996)....	49
Figura 3.26. Exemplo de um ficheiro de comando. ....	52
Figura 4.1. Mapa da distribuição espacial das Unidades Homogêneas de Análise (UHA) cultura-solo. ....	56
Figura 4.2. Series temporais de NDVI para cada parcela (linhas a tracejado) e para uma parcela média (linha contínua) para o ano 2020. ....	58
Figura 4.3. Serie temporal de NDVI da parcela média (—) e curva de $K_c$ obtida pelo método FAO 56 ou Pastor (olival), para o ano 2020 (—).....	60
Figura 4.4. Curvas de $K_c$ estimadas pelas equações empíricas da relação do NDVI com o $K_c$ publicadas em Calera-Belmonte <i>et al.</i> (2005) (.....), González-Piqueras (2006) (.....) e Toureiro <i>et al.</i> (2017) (.....), e a curva de $K_c$ obtida com os valores de $K_c$ publicados em Allen <i>et al.</i> (1998) com as fases fenológicas obtidas na análise da curva do NDVI (—).....	62
Figura 4.5. Curvas de $K_c$ com valores tabelados (—) e com a representação das várias fases de desenvolvimento: 1 – Inicial; 2 – Desenvolvimento rápido; 3 – período intermédio; 4 – senescência). ....	65
Figura 4.6. Dados acumulados mensais e anual, e dados médios anual da precipitação, da evapotranspiração e do déficit hídrico para o ano de 2020, obtidas pela estação meteorológica do Redondo (COTR, 2021). ....	69
Figura 4.7. Relação entre as necessidades líquidas de rega (mm) simuladas e as áreas correspondentes para cada cultura no PRL. ....	70
Figura 4.8. Consumos líquidos ( $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ) de maior expressão no PRL.....	71
Figura 4.9. Necessidades de rega (NR) modeladas para cada classe cultural para o ano 2020, comparadas com os consumos nas bocas de rega correspondentes (ABL, 2020) e com os valores do ano médio de rega do anuário agrícola de Alqueva 2020 (EDIA, 2020). ....	72
Figura 4.10. Distribuição relativa das NR anuais por sistema de rega.....	73
Figura 4.11. Mapa da distribuição espacial das necessidades de rega por parcela e agrupamento de parcelas de cada cultura.....	73



Figura 4.12. Necessidades de rega (NR) de ponta modeladas para cada classe cultural para o ano 2020, comparadas com os caudais fictícios contínuos modelados para o período de ponta do ano em estudo como para um ano com uma probabilidade de não excedência de 81% de uma série entre 2001 e 2020. ....74

## Índice de Quadros

Quadro 2.1. Valores indicativos para sistemas de rega bem projetados e bem mantidos das eficiências de aplicação (adaptado de Pedreira, 2004).....	16
Quadro 3.1. Consumos registados nos hidrantes (ABL, 2020) por classe de cultura nas parcelas consideradas neste estudo e nas parcelas descartadas .....	41
Quadro 3.2. Relação entre NDVI e Kc apresentados em estudos de referência (adaptado de Toureiro <i>et al.</i> , 2017) .....	48
Quadro 3.3. Valores de Kc para o olival apresentados por Pastor & Orgaz (1994) (retirados de Rojas <i>et al.</i> , 1996) .....	48
Quadro 3.4. Características dos solos presentes no PRL, obtidas e utilizadas na modelação, em que Z significa a profundidade do perfil e $\theta_v$ o teor volumétrico de água no solo à capacidade de campo (CC) e na capacidade de emurchecimento (CE). .....	50
Quadro 4.1. UHA obtidas para modelação.....	55
Quadro 4.2. Necessidades de rega líquidas (NRL) anuais modeladas para 2020 e médias do período 2001 a 2020. ....	68

## Lista de Símbolos

AC	Ascensão capilar (mm)
$C_p$	Calor específico do ar a pressão constante ( $\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
Dr	Drenagem profunda (mm)
Rg	Dotação útil de rega (mm)
E	Evaporação (mm)
$e_a$	Pressão parcial de vapor atual (kPa)
$(e_a - e_d)$	Défice da pressão de vapor medido a 2 m de altura (kPa)
Es	Escoamento superficial (mm)
$e_s$	Pressão parcial de vapor saturado (kPa)
ET	Evapotranspiração ( $\text{mm d}^{-1}$ )
$ET_c$	Evapotranspiração cultural ( $\text{mm d}^{-1}$ )
$ET_o$	Evapotranspiração de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ )
$f_c$	Fração de cobertura do solo coberta pela vegetação (adim)
G	Densidade do fluxo de calor do solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )
h	Altura da cultura (m)
HR	Humidade relativa (%)
$K_c$	Coefficiente cultural (adim)
$K_{c \text{ end}}$	Coefficiente cultural para a o período final (adim)
$K_{c \text{ ini}}$	Coefficiente cultural para a o período inicial (adim)
$K_{c \text{ mid}}$	Coefficiente cultural para a o período médio (adim)
$K_r$	Coefficiente que correlaciona o $K_c$ com a $f_c$ (adim)
$K_s$	Coefficiente de stress (adim)
$K_y$	Coefficiente de resposta de produtividade específico da cultura (admin)
LAI	Área foliar ( $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ )
LRFU	Limite da reserva facilmente utilizável (mm)
NGR	Necessidades globais de rega (mm)
NLR	Necessidades líquidas de rega (mm)
NR	Necessidades de rega (mm)
P	Precipitação (mm)

$q_f$	Caudal fictício contínuo ( $l\ s^{-1}\ ha^{-1}$ )
$R$	Reserva útil (mm)
$r_a$	Resistência de aerodinâmica ( $s\ m^{-1}$ )
RFU	Reserva facilmente utilizável (mm)
$R_n$	Radiação líquida ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ )
$r_s$	Resistência de superfície ( $s\ m^{-1}$ )
RU	Reserva utilizável de água no solo (mm)
$T$	Temperatura do ar a 2 m altura ( $^{\circ}C$ )
$Tr$	Transpiração (mm)
$U_2$	Velocidade do vento medida a 2 m de altura ( $m\ s^{-1}$ )
$Z$	Profundidade do solo (m)
$Z_r$	Profundidade radical (cm)
$\alpha$	Albedo (adim)
$\gamma$	Constante psicrométrica ( $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$ )
$\Delta$	Declive da curva de pressão de vapor saturado ( $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$ )
$\Delta S$	Varição do armazenamento da água (mm)
$\Delta t$	Varição de tempo (s)
$\Delta V$	Varição do conteúdo em água nas plantas (mm)
$\Delta z$	Varição da espessura do solo (m)
$\theta_{VCE}$	Teor de água volumétrica no coeficiente de emurchecimento ( $cm^3\ cm^{-3}$ )
$\theta_{VCC}$	Teor de água volumétrica na capacidade de campo ( $cm^3\ cm^{-3}$ )
$\lambda$	Fluxo de calor latente ( $MJ\ kg^{-1}$ )
$\rho$	Densidade média do ar ( $kg\ m^{-3}$ )
$\rho_{NIR}$	Reflectância na banda do infravermelho próximo (adim)
$\rho_{red}$	Reflectância na banda do vermelho (adim)
$\varepsilon_r$	Eficiência do sistema de rega (adim)
$p$	Défice permissível de água no solo (adim)

## Lista de Acrónimos, siglas e abreviaturas

A	Solos Incipientes - Aluviossolos Modernos, Não Calcários, de textura mediana
ABL	Associação de Beneficiários do Lucefecit
AGIR	Avaliação da eficiência do uso da água e da energia
AHL	Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit
ArcMap	Plataforma SIG
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BH	Balanco hídrico do solo
CAOP2020	Carta Administrativa Oficial de Portugal, versão 2020
CC	Capacidade de campo
CE	Capacidade de emurchecimento
CNROA	Centro Nacional de Reconhecimento e Ordenamento Agrário
COTR	Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio
CROPWAT	Modelo para a simulação do balanço hídrico do solo com rega
Csa	Clima temperado de verões secos e quentes, segundo a classificação Climática de Köppen
Csb	Clima temperado de verões secos e suaves, segundo a classificação Climática de Köppen
CSP	Carta de solos de Portugal
DDA	Dia do ano
DEMETER	<i>DEMONstration of Earth observation TEchnologies in Routine irrigation advisory services</i>
DGADR	Direcção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural
DGT	Direção Geral do Território
DR	Detecção remota
DSS	Rede de suporte à decisão
EE	Espectro eletromagnético
EFMA	Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva
ENSO	<i>El Niño-Southern Oscillation</i>
ESRI®	<i>Environmental Systems Research Institute</i>

ETRS89/PT-TM06	<i>European Terrestrial Reference System 1989/Portugal- Transversa de Mercator 2006</i>
EU	<i>União Europeia</i>
EVAP56	Programa para o cálculo da $ET_0$ utilizado pelo ISAREG
Excel	Programa desenvolvido pela empresa <i>Microsoft</i> para operações financeiras e contabilísticas usando folhas de cálculo eletrónicas.
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
FAO-PM	Abordagem da FAO para o cálculo da $ET_c$ com a equação de PM
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GISAREG	Modelo de simulação na programação da rega baseado em SIG
GISClimReg	Aplicação SIG para o apoio à gestão da rega
<i>HelioClim-1</i>	Base de dados que contem valores diários da radiação solar
Hubbls	<i>Open innovation Hub for Irrigation Systems in Mediterranean agriculture</i>
IDEWA	<i>Irrigation and Drainage monitoring by remote sensing for Ecosystems and WAter resources management</i>
IDRHa	Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica
IDSS-C	Sistema integrado de apoio à decisão para obtenção de consenso
IR	Radiação infravermelho
IrrigRotation	Modelo para a simulação do balanço hídrico do solo com rega
ISAREG	Modelo para a simulação do balanço hídrico do solo com rega
IV	Índice de vegetação
K <sub>c</sub> _NDVI	Relações empíricas entre o NDVI e o K <sub>c</sub>
KCISA	Programa para o cálculo da evolução média do K <sub>c</sub> utilizado pelo ISAREG
LANDSAF	<i>Satellite Application Facility on Land Surface Análise</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MI	Índice hídrico
NDVI	Índice de vegetação por diferença normalizada
NIR	Radiação do infravermelho próximo
O-I	Outono-inverno
P <sub>c</sub>	Solos Calcários, Pardos dos Climas de Regime Xérico, Normais, de calcários não compactos

PILOTE	Modelo para a simulação do balanço hídrico do solo com rega
PLEIADES	<i>Participatory multi-Level Earth-Observation-assisted tools for Irrigation water management and Agricultural Decision-Support</i>
PM	<i>Penman-Monteith</i>
PRIMA	Modelo para a simulação do balanço hídrico do solo com rega
PRL	Perímetro de rega do Lucefecit
Px	Solos Argiluvitados Pouco Insaturados - Solos Mediterrâneos, Pardos, de Materiais Não Calcários, Normais, de xistos ou grauvaques
QGIS	<i>Quantum GIS</i>
RADAR	<i>RADio Detection And Ranging</i>
RE	Radiação eletromagnética
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SDSS	Sistemas de apoio à decisão espacial
shp	<i>Shapefile</i> , formato de arquivo para dados geoespaciais vetoriais
SI	Sistema de Informação
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIMDualKC	Modelo para a simulação do balanço hídrico do solo com rega
Sr	Solos Argiluvitados Pouco Insaturados - Solos Mediterrâneos, Vermelhos ou Amarelos, de Materiais Não Calcários, Normais, de "rañas" ou depósitos afins
SRC	Sistema de referência de coordenadas
SROA	Serviço de Reconhecimento e Desenvolvimento Agrário
SWAMP	<i>Soil water management for paddies</i>
Tiff	<i>Tagged Image File Format</i> , formato de arquivo para imagens digitais rasterizadas
txt	Formato de arquivo para texto delimitado
UHA	Unidade homogénea de análise
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
VPPT	Valor de Produção Padrão Total
WGS84/UTM	World Geodetic System 1984/Universal Transverse Mercator
WINISAREG	Modelo para a simulação do balanço hídrico do solo com rega

# 1. Introdução

## 1.1. Contextualização

A agricultura, juntamente com a pecuária, utiliza 74,7% do volume total de água consumida em Portugal continental (sem contar com o sector enérgico) (APA, 2015), permitindo regar 14,3% da superfície agrícola utilizada, o que corresponde a 57,1% do valor de produção padrão total (VPPT), alcançando nas explorações predominantemente de regadio um VPPT médio por hectare de 5,5 mil euros, mais do triplo da média nacional (1,7 mil euros) (INE, 2021). Estes dados mostram a importância do regadio na agricultura, sendo, por sua vez, esta atividade importante em termos de segurança e soberania alimentar de um país, influenciando o desenvolvimento da sociedade e a sustentação dos meios rurais (Elshaikh *et al.*, 2018). Uma vez que o setor agrícola é o grande utilizador de água doce, é importante maximizar a eficiência do uso da água de modo a implementar estratégias para mitigar o desperdício deste recurso e para adaptação às alterações climáticas (Melton *et al.*, 2012).

Portugal é um dos países onde se espera que os efeitos das alterações climáticas se façam sentir na duração e na frequência dos períodos de seca, na redução dos escoamentos originados pela precipitação, na recarga dos aquíferos e ainda na elevação do nível médio das águas do mar (APA, 2015). Urge, por isso, desenvolver métodos que permitam otimizar o uso da água na agricultura.

Avaliar a eficiência do uso da água, tendo por base a distribuição espacial das necessidades de rega é importante, pois permite implementar um conjunto de práticas melhoradas de gestão, assim como de inovações tecnológicas, adaptadas às situações espacialmente distintas. A utilização de ferramentas como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Deteção Remota (DR) e modelação do Balanço Hídrico (BH), permite, de uma forma remota, determinar as necessidades de rega das culturas. A DR, que até há algum tempo tinha utilização limitada na agricultura devido ao elevado custo das imagens de satélite e da análise de dados, encontra agora lugar para larga aplicação devido ao aparecimento de imagens de baixo custo, nomeadamente através da utilização da plataforma *Google Earth Engine* (GEE).

Têm sido realizados trabalhos científicos (nacionais e internacionais) que assentam na avaliação da performance de projetos de rega (Elshaikh *et al.*, 2018), no uso da DR e/ou SIG como ferramentas para estimar parâmetros associados ao regadio, tais como os volumes de água a

aplicar na rega, índices de stress hídricos, condução da rega ou gestão do meio ambiente, adaptando ou formulando novos métodos (Barker *et al.*, 2018; Dari *et al.*, 2020; Etchanchu *et al.*, 2019; Pôças *et al.*, 2020; Rolim *et al.*, 2019; Rozenstein *et al.*, 2018; Veysi *et al.*, 2017).

Também nos últimos anos foram realizadas teses de doutoramento e dissertações de mestrado que, a partir da utilização de técnicas de DR e SIG, obtiveram resultados para a modelação da evapotranspiração (ET), para a monitorização de culturas e estimativa das suas necessidades e ainda para o apoio à gestão da rega. Vejam-se os trabalhos de Mendes (2013), Rosa (2018) e Vilar (2015).

Para além dos trabalhos referidos, a problemática da eficiência do uso da água ao nível dos Aproveitamentos Hidroagrícolas em Portugal é/foi objeto de estudo em vários projetos científicos e de demonstração, de entre os quais: 1) Projeto AGIR “Avaliação da Eficiência do Uso da Água e da Energia em Aproveitamentos Hidroagrícolas” apoiado pelo Programa de Desenvolvimento Rural 2014-2020, Portugal 2020; 2) Projeto Hubls “Open innovation Hub for Irrigation Systems in Mediterranean agriculture” Section 2 Call 2019 - Multi-topic for Network PRIMA, com término em 2023; 3) Mais focado na utilização da deteção remota e na sua utilização para identificar as necessidades hídricas das culturas de forma a incorporá-las em sistemas de aviso de rega, salientam-se os projeto *IDEWA “Irrigation and Drainage monitoring by remote sensing for Ecosystems and Water resources management”*, também da Section 2 Call 2019 - Multi-topic for Network PRIMA, com término em 2023; 4) Projeto DEMETER “DEMONstration of Earth observation TEchnologies in Routine irrigation advisory services”, financiado por EU research and innovation framework programs e terminado em novembro de 2005; 5) Projeto PLEIADES “Participatory multi-Level Earth-Observation-assisted tools for Irrigation water management and Agricultural Decision-Support”, financiado por European Commission Framework Programme 6 e terminado em novembro de 2009.

## **1.2. Objetivos**

No âmbito da problemática apresentada no ponto 1.1, esta dissertação apresenta como objetivo geral a determinação e espacialização das necessidades globais de rega do Perímetro de Rega do Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit, para ano 2020, recorrendo a imagens de satélite com elevada resolução espaço-temporal. Em particular pretende-se:

- Caracterizar espacialmente, com recurso a SIG e a DR, a área regada do PRL;



- Obter os valores dos parâmetros biofísicos das culturas a partir do índice de vegetação NDVI das imagens obtidas através do satélite Sentinel-2;
- Obter unidades homogêneas de análise (UHA) caracterizadas por solo-cultura constantes;
- Realizar o balanço hídrico ao nível de unidades homogêneas;
- Obter e caracterizar espacialmente as necessidades de rega de cada parcela agrícola;
- Obter as necessidades globais de rega anuais e do período de ponta para o ano do estudo
- Analisar o caudal fictício contínuo global para o período de 2001 a 2020.

O trabalho será realizado em ambiente SIG (Qgis) e recorrendo à modelação do balanço hídrico (ISAREG). Os dados de base para o trabalho são de diversos tipos: (i) meteorológicos (temperatura máxima, mínima e média, humidade relativa mínima, máxima e média, radiação solar global, velocidade do vento média e máxima e precipitação), (ii) solo (textura e características de retenção da água), (iii) administrativos (divisão parcelar), (iv) sistemas de rega utilizados para cada parcela e correspondente eficiência de aplicação, e por último, (v) dados das culturas instaladas em cada parcela. Os últimos referem-se ao período de estudo, ao tipo de cultura, às datas das várias fases fenológicas e aos seus coeficientes culturais ao longo do ciclo, que serão obtidos a partir de imagens de deteção remota retiradas do Sentinel-2 e processadas na aplicação Google Earth Engine.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos e 13 Anexos (incluindo o glossário). O presente capítulo trata da introdução, tendo-se apresentado a contextualização do tema em estudo, os objetivos propostos e estruturação posterior. O Capítulo 2 visa apresentar os principais conceitos estudados: alterações climáticas e utilização da água pela agricultura, necessidades de rega para as diferentes culturas e a sua especialização, e a deteção remota e os sistemas de informação geográficos aplicados aos estudos do regadio. No Capítulo 3 pretende descrever-se o local em estudo, os dados e as ferramentas utilizadas, juntamente com os métodos aplicados para concretizar os objetivos propostos. No Capítulo 4 são apresentados e analisados os principais resultados obtidos. No último capítulo, são expostas as considerações finais, avaliando a consistência dos resultados obtidos, juntamente com as principais conclusões retiradas. Por fim, nos anexos, apresentam-se algumas informações complementares.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. A utilização da água pela agricultura nas regiões mediterrânicas

Segundo Köppen, o clima de Portugal continental é classificado como temperado (C), de subtipo verões secos (Cs). Caracteriza-se por apresentar precipitação mensal na estação mais quente que é menos de 33% da precipitação mensal na estação mais fria, e em que a precipitação mensal da estação mais quente é inferior a 40 mm. O clima Cs apresenta duas variações, o clima mediterrânico de verão suave (Csb), que abrange as regiões do litoral alentejano e todo o norte de Portugal (exceto na terra quente de Trás-os-Montes), em que temperatura média mensal do mês mais quente é menor que 22 °C e se verificam mais de quatro meses com temperatura média mensal superior a 10 °C; o clima mediterrânico de verão quente (Csa), que abrange todo o resto do território, inclusive o local de estudo desta dissertação, em que a temperatura média mensal do mês mais quente é superior a 22 °C e se verificam mais de quatro meses com temperatura média mensal superior a 10 °C (Abreu, 2018; Beck *et al.*, 2018).

De acordo com a classificação de Thornthwaite, existe uma variabilidade no clima em Portugal que pode ir de zonas com classificação A, que caracteriza o clima segundo o índice hídrico (MI) como clima perma-húmido ( $MI > 100\%$ ), a zonas com classificação D, com clima semiárido ( $-66,0\% < MI < -33,3\%$ ). Quanto ao índice de eficiência térmica, baseado no potencial da evaporação, existem em Portugal classificações que variam de B'1 ( $570\text{ mm} < \sum ET_{\text{anual}} > 712\text{ mm}$ ) a B'3 ( $855\text{ mm} < \sum ET_{\text{anual}} > 997\text{ mm}$ ), que correspondem a climas mesotérmicos (Abreu, 2018; Gouveia, 2017).

As regiões mediterrânicas caracterizam-se pela existência de uma grande variação intra e inter-anual da precipitação e da temperatura, e uma grande amplitude nas variáveis climáticas (Abreu, 2018; del Pozo *et al.*, 2019). No caso de Portugal, a estação húmida coincide com o período de menores temperaturas, enquanto a estação seca coincide com o período com temperaturas mais elevadas. A rega é, portanto, fundamental para o desenvolvimento das culturas pois colmata a necessidade em água das plantas durante a época em que a precipitação não é suficiente. A rega compensa ainda a variabilidade inter e intra-anual da precipitação e temperatura, que põe em risco a produção potencial das culturas numa dada região. Além disso, a rega atua na proteção das culturas, nomeadamente no controlo das geadas, da temperatura

ou/e do controlo da humidade e no controlo de parâmetros de qualidade produtiva, como a maturação (Oliveira, 2011).

Paralelamente, a água é um recurso importante também numa perspetiva social, económica e ambiental (Chartzoulakis & Bertaki, 2015; UNESCO, 2020). Além da agricultura de regadio, que é uma importante ferramenta para fazer face ao aumento da procura de produtos alimentares decorrente do aumento da população mundial, outros sectores da sociedade utilizam este recurso, nomeadamente a indústria e o consumo humano (Chartzoulakis & Bertaki, 2015; Oliveira, 2011; UNESCO, 2020).

As alterações climáticas são um fenómeno cíclico em que se registam mudanças do clima do planeta ao longo do tempo, e o seu processo natural tem-se vindo a agravar e acelerar devido à ação humana (Costa, 2013). O principal impacto destas alterações é o aumento da temperatura média global do planeta, que se espera que irá ultrapassar os 2 °C (IPCC, 2018). Temperaturas mais elevadas associadas a um aumento da intensidade e frequência de eventos extremos afetam o ciclo hidrológico, em particular a disponibilidade de água e a sua distribuição, deteriorando a sua qualidade (UN-Water, 2010; UNESCO, 2020). Começa a observar-se, devido às alterações climáticas, um aumento da temperatura média com uma redução da precipitação anual, afetando, assim, o armazenamento de água disponível e prolongando os períodos de seca e escassez de água em certas regiões (del Pozo *et al.*, 2019; Rolim *et al.*, 2014; UNESCO, 2020), mas também, noutras regiões, um aumento da precipitação que leva a eventos extremos como inundações, tempestades e deslizamentos de terra (Rolim *et al.*, 2014).

Na agricultura os impactos das alterações climáticas começam a sentir-se na alteração na data de ocorrência dos eventos fenológicos, no crescimento e produção das culturas, nas necessidades hídricas das culturas, na competição de infestantes e eficiências dos herbicidas, na taxa de erosão do solo, na incidência de pragas e doenças e na eficiência dos pesticidas e, por último, nas condições económicas, financeiras e sociais, dos agricultores (Abreu, 2018)

Tendo em atenção a intensificação da escassez de recursos hídricos, é necessário a racionalização do seu uso e o aumento do seu rendimento ao nível da produção, a melhorar o uso de água na rega, e assim a sustentabilidade do regadio. A sustentabilidade assenta em três pilares, o ambiental, viabilizando a capacidade de algo se manter ao longo do tempo; o social, garantindo equidade e justiça na distribuição; e o económico, de modo que os custos a ela associados sejam suportados (Oliveira, 2011). Assim, a sustentabilidade do regadio implica a

capacidade de satisfazer as necessidades presentes do ser humano, sem comprometer a disponibilidade dos recursos (água, solo, ambiente, etc.) que serão necessários às gerações futuras, para que estas possam colmatar as suas próprias necessidades (Oliveira, 2011). Tal, passará pela melhoria e modernização dos regadios acuais, não só a nível das infraestruturas, mas também ao nível da determinação das necessidades hídricas e de rega das culturas e nos sistemas de aplicação, gestão e exploração da água de rega, numa ótica de conservação, não apenas da água, mas também do solo, energia e ambiente (Oliveira, 2011).

## **2.2. Necessidades de rega das culturas**

### 2.2.1. Necessidades hídricas

Conhecer as necessidades hídricas das plantas, evapotranspiração (ET), permite calcular a quantidade de água a aplicar com a rega.

#### 2.2.1.1. Evapotranspiração cultural

Doorembos & Pruitt (1977) definiram necessidades hídricas como a quantidade de água necessária para repor no solo a água perdida pela evapotranspiração de uma cultura ( $ET_C$ ) sã, cultivada em áreas extensas e sem limitações de solo, água e fertilidade, a qual poderá atingir uma produção máxima para as condições do meio.

A transpiração das plantas ocorre por necessidade de sintetizar hidratos de carbono, sendo necessário manter os estomas abertos, de forma que a difusão do dióxido de carbono atmosférico seja possível e ainda permitir o fluxo de água e nutrientes através do sistema vascular, necessário ao metabolismo celular e à termorregulação da planta. A evaporação de água a partir do solo, após o seu humedecimento por água aplicada com a rega ou precipitação, corresponde a um fluxo de vapor de água para a atmosfera que não pode ser dissociado da transpiração das plantas, aquando da contabilização das necessidades de água de uma cultura (Rosa, 2018).

A taxa  $ET_C$  depende do ambiente físico (temperatura do ar, humidade, radiação solar, velocidade do vento, etc.), da espécie/cultivar, do estado de desenvolvimento e de crescimento e do estado nutricional e sanitário da cultura (Abreu, 2018; Reyes-González *et al.*, 2017; Oliveira, 2011).

De acordo com Adnan (2020) e Mehdizadeh (2017), é fundamental realizar a correta medição/determinação da  $ET_C$ , pois esta é um dos termos do balanço hídrico (BH) em diversos processos hidrológicos, influenciando o ciclo hidrológico e permitindo compreender o impacto da influência humana, possibilitando, assim, a melhoria da gestão de recursos hídricos, principalmente nas regiões áridas.

A  $ET_C$  pode ser medida diretamente *in-situ* ou remotamente, por diferentes tipos de métodos, ou estimada indiretamente por modelos. Os métodos diretos podem ser divididos em métodos hidrológicos, micrometeorológicos e de medição separada das duas componentes da ET (Rosa, 2018): 1) os primeiros, estimam a ET através da determinação *in-situ* dos restantes termos do BH, podendo o balanço ser calculado em condições naturais ou em lisímetros (Rosa, 2018; Reyes-González *et al.*, 2017; Pereira, 2004); 2) os seguintes recorrem à medição de grandezas físicas num ou mais níveis dentro da camada conservativa atmosférica acima do coberto para direta ou indiretamente, se calcular os fluxos de calor latente e sensível entre os cobertos vegetais e uma determinada altura da referida camada. Exemplos disto são os métodos da “Razão de Bowen” e das “Flutuações Instantâneas”; 3) por fim, no terceiro tipo de método, a ET é obtida a partir da medição das suas componentes, usando, por exemplo, métodos baseados no fluxo de seiva para a componente da transpiração, e o método mini- ou micro lisímetros para a componente da evaporação. Autores como Rosa (2018), Mehdizadeh (2017), Feng (2016), Oliveira (2011) e Pereira (2004), referem que estes métodos diretos são pouco práticos, bastante dispendiosos, quer em valor económico, por recorrerem a equipamentos caros e de construção complexa, quer em tempo, e exigem um elevado nível de conhecimento por parte dos operadores. Por estas razões, são normalmente utilizados na investigação e para calibrar e validar os métodos indiretos.

Os métodos indiretos dispensam medições de campo, são mais fáceis de utilizar e, de acordo com Rosa (2018), são mais adequados para uma utilização a um nível operacional (por exemplo gestão e condução da rega), principalmente quando requerem um conjunto de dados de entrada de obtenção simples e prática, e quando o investimento em termos da sua parametrização e calibração é moderado. Recorrem a equações que representam o balanço energético e princípios aerodinâmicos, nomeadamente a equação com base física de Penman-Monteith (PM) ou por equações empíricas (Muhammad *et al.*, 2020; Rosa, 2018; Gocic *et al.*, 2016; Allen *et al.*,

1998), diferentes consoante as condições climáticas, a acessibilidade à informação meteorológica e os seus pressupostos (Moeletsi *et al.*, 2013; Pandey *et al.*, 2016).

Estas podem ser: i) baseadas na temperatura, tais como os modelos de Thornthwaite (1948) de Hargreaves and Samani (1985) (Feng *et al.*, 2016), e ainda de Blaney-Criddle (Moeletsi *et al.*, 2013), ii) baseadas na transferência de massa, como é o caso dos modelos de Penman (1948) (Feng *et al.*, 2016), de Dalton e de Rohwer (Moeletsi *et al.*, 2013), e ainda iii) baseadas na radiação, como os modelos de Priestley-Taylor (1972) (Feng *et al.*, 2016; Moeletsi *et al.*, 2013) e de Makkink e Ritchie-Type (Moeletsi *et al.*, 2013). Como exemplo de um método combinado, destaca-se o modelo de Copais, que necessita de dados de humidade relativa (HR), temperatura média e radiação solar como dados de entrada, funcionando através da combinação entre os dados da radiação e os da temperatura (Moeletsi *et al.*, 2013). A conceção e utilização destes métodos empíricos advém da necessidade de desenvolver aproximações simples que consigam estimar a  $ET_C$  com grande precisão, quando as variáveis meteorológicas para o método de PM estão em falta ou incompletas, o que é uma realidade em várias áreas do mundo (Muhammad *et al.*, 2020; Feng *et al.*, 2016; Pandey *et al.*, 2016; Moeletsi *et al.*, 2013). No entanto, estes métodos têm severas limitações quando aplicados em grande escala (Muhammad *et al.*, 2020) e exigem cuidado na aplicação, uma vez que são desenvolvidos para ambientes específicos. Para que os resultados obtidos sejam confiáveis, é necessário calibrar estes modelos para a região em estudo, utilizando nomeadamente a equação de PM (Moeletsi *et al.*, 2013).

Nos últimos anos têm começado a utilizar-se métodos de deteção remota (DR) e cartografia para a estimação da  $ET_C$ , combinando dados de DR com a interpolação das observações terrestres de dados meteorológicos (Pereira *et al.*, 2015). Estima-se a  $ET_C$  a partir de base de dados da radiação solar, como o *HelioClim-1*, em que os dados são obtidos de satélites meteorológicos geoestacionários (Pereira *et al.*, 2015; Rigollier & Wald, 1999). Mais recentemente, estima-se a  $ET_C$  diretamente do *Satellite Application Facility on Land Surface Analysis* (LANDSAF) (Pereira *et al.*, 2015), com melhorias verificadas quando se usam dados de satélites de temperatura em conjunto aos satélites de radiação (Pereira *et al.*, 2015).

Como referido anteriormente, os métodos indiretos têm limitações e exigem grandes cuidados ao serem aplicadas; por outro lado, as equações de base física, nomeadamente a equação PM, requerem o conhecimento de vários parâmetros, tanto climáticos como da superfície evaporante que permitem estimar a resistência de superfície ( $r_s$ ) e a resistência aerodinâmica ( $r_a$ ), são

influenciadas pelas características do copado de cada cultura, como ainda das suas práticas culturais. Deste modo de acordo com Pereira (2004), é extremamente difícil estimar estes parâmetros, sendo ainda necessário utilizar a aproximação empírica dos coeficientes culturais simples (Eq. 2.1) proposto por Allen *et al.* (1998), que apresenta dois passos: (1) cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), que representa as condições ambientais da cultura de referência, influencia do clima; (2) cálculo da  $ET_c$  da cultura em estudo considerando a sua especificidade através da utilização de coeficientes culturais ( $K_c$ ). Os  $K_c$  representam as diferenças de comportamento energético e aerodinâmico relativamente à cultura de referência (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_c = ET_0 K_c \quad (2.1)$$

onde  $ET_c$  representa a evapotranspiração cultural ( $\text{mm d}^{-1}$ ),  $ET_0$  a evapotranspiração de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ ) e  $K_c$  o coeficiente cultural (adimensional).

De modo geral, existem três características que distinguem a evapotranspiração da cultura da de referência: 1) a altura da cultura ( $h$ ), que afeta a rugosidade e a  $r_a$ ; 2) a  $r_s$  relativa à cultura-solo, que é afetada pela área foliar (LAI), pela fração de cobertura do solo coberta pela vegetação ( $f_c$ ), pela idade e condição das folhas e pelo teor de humidade à superfície do solo; 3) o albedo ( $\alpha$ ) da superfície cultura-solo, que é influenciado pela  $f_c$ , pela vegetação e pelo teor de humidade à superfície do solo, e influencia a radiação líquida á superfície da cultura ( $R_n$ ) disponível à superfície, que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo evaporativo (Pereira, 2004; Rosa, 2018).

O  $K_C$  varia durante o período vegetativo de uma cultura, à medida que a cultura cresce e se desenvolve e à medida que a cultura envelhece e atinge a maturação, sendo possível, assim, construir uma curva dos  $K_C$  que caracterize tipicamente o desenvolvimento de uma cultura anual, desde a sementeira até à colheita. Para culturas perenes ou multianuais são necessárias algumas adaptações, procedendo-se à sua definição por comparação com as fases do ciclo da cultura. Esta construção é realizada em três passos: 1) dividir o ciclo vegetativo em quatro períodos de acordo com a fenologia e o desenvolvimento da cultura, ou seja, em período inicial, período de crescimento rápido, período intermédio e período final; 2) identificar os três valores de  $K_c$  que correspondem a  $K_c$  inicial ( $_{ini}$ ),  $K_c$  médio ( $_{mid}$ ),  $K_c$  final ( $_{end}$ ) (Allen *et al.*, 1998); 3) traçar os segmentos de reta relativos aos quatro períodos de desenvolvimento, como mostra a Figura 2.1 (Allen *et al.*, 1998).

Outras variantes, ao método atrás referido consiste no método dos coeficientes culturais duais, a utilizar em culturas esparsas e na utilização de um terceiro passo com um coeficiente de stress ( $K_s$ ) que corrige a  $ET_c$  quando as condições ótimas de cultivo não se verificam (Allen *et al.*, 1998).

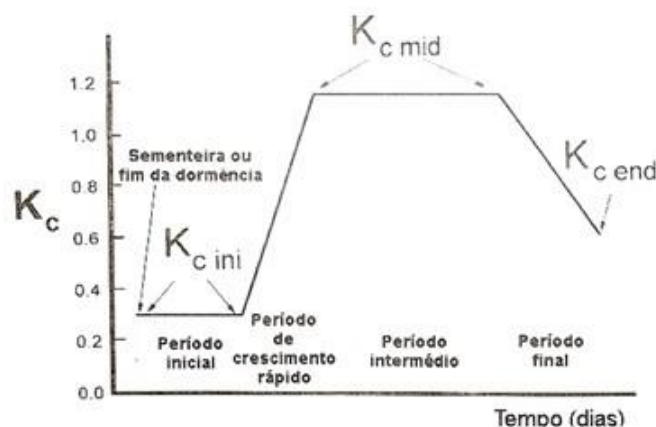


Figura 2.1. Representação da curva dos coeficientes culturais de uma cultura anual com as correspondentes definições dos períodos vegetativos (Pereira, 2004).

Os valores de  $K_c$  são geralmente obtidos em ensaios experimentais em lisímetros de pesagem, instalados no centro de grandes parcelas onde a cultura em estudo é sujeita a práticas culturais cuidadas e uniformes. Allen *et al.* (1998) apresentam vários valores de  $K_c$  para numerosas culturas em várias regiões climáticas. No entanto, os valores podem afastar-se significativamente dos reais já que dependem muito das variedades, das datas de sementeira ou plantação, das práticas culturais e das condições ambientais. Quando as condições climáticas são muito díspares das utilizadas para determinar os valores tabelados, clima sub-húmido caracterizado por uma HR mínima diária média aproximadamente de 45% e uma  $U_2$  aproximadamente de  $2 \text{ m s}^{-1}$ , é necessário proceder ao ajustamento dos valores (Allen *et al.*, 1998). Atualmente, como já foi referido, tem sido utilizada a DR como ferramenta para modelar os  $K_c$  a partir dos índices de vegetação (Pereira *et al.*, 2015; Segovia-Cardozo *et al.*, 2019; Toureiro *et al.*, 2017).

#### 2.2.1.2. Evapotranspiração de referência

Uma das definições mais utilizadas de Evapotranspiração de Referência ( $ET_o$ ) é a adotada por Allen *et al.* (1998): “taxa de ET de uma superfície extensa, coberta de relva verde de altura uniforme de 8 a 15 cm de altura, com crescimento ativo, cobrindo completamente o solo e sem falta de água”.

Muhammad Adnan (2020) refere que a equação adaptada pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) para calcular a  $ET_o$  a partir da equação PM (FAO-PM), o método dos coeficientes culturais, foi classificada como sendo o método mais preciso e com menos erros, apesar de requerer uma grande quantidade de informação para ser aplicado.



Mehdizadeh (2017) aponta como vantagens a grande aplicabilidade numa grande variabilidade de condições climáticas sem que seja necessária calibração local.

A FAO-PM (Eq. 2.2) permite obter resultados semelhantes aos observados na medição da ET de cobertos de relva por ter uma base física sólida e por incorporar tanto parâmetros fisiológicos como aerodinâmicos (que regulam o processo evapotranspirativo), permitindo, assim, considerar o efeito das variáveis climáticas na ET da cultura de referência (Pereira, 2004), e, como as características aerodinâmicas e de superfície dos cobertos de relva são das mais bem estudadas, podem ser facilmente representadas pela equação PM (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (2.2)$$

onde  $ET_0$  é a ET de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ ),  $R_n$  a radiação líquida á superfície da cultura ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $G$  a densidade do fluxo de calor do solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $T$  a média da temperatura do ar a 2 m altura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $U_2$  a velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $(e_a - e_d)$  o déficit da pressão de vapor medido a 2 m de altura (kPa),  $\Delta$  o declive da curva de pressão de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), 900 o coeficiente para a cultura de referência ( $\text{kJ}^{-1} \text{kg K}$ ), resultante da conversão de segundos para dias e de coeficientes devidos à substituição das variáveis da densidade média do ar ( $\rho$ ), do calor específico do ar a pressão constante ( $c_p$ ), e da resistência de aerodinâmica ( $r_a$ ), como dado em Allen *et al.* (1998), 0,34 o coeficiente de vento para a cultura de referencia, resultante da razão  $r_s/r_a$  (ou seja  $70/208 = 0,34$ ), e 0,408 valor para  $1/\lambda$  com  $\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ .

Os métodos de cálculo de cada componente da Equação 2.2 são descritos em Allen *et al.* (1998). As variáveis meteorológicas referidas devem ser observadas, de acordo com Pereira (2004) em estações meteorológicas padronizadas, sobretudo sobre relvados extensos sem carência de água, sem obstáculos (árvores, casa ou muros, etc.), na direção do vento dominante e em ambiente não advectivo (ou seja, em que não ocorra o efeito oásis, em que os fluxos de calor sensível de terrenos secos que rodeiam as estações contribuem para a energia disponível para a ET pelo copado vegetal que ocupa o solo da estação).

### 2.2.2. Balanço hídrico

A realização do balanço hídrico (BH) é fundamental para decisões de condução da rega, ou seja, decisões de quanto e quando regar. Representa o balanço, para um determinado período,

entre as entradas e as saídas de água do perfil do solo explorado pelas raízes (reservatório), considerando-se, em cada momento, o armazenamento ou a reserva útil de água no solo (Figura 2.2). A Rega ou dotação útil ( $R_g$ ) de rega, é, assim, calculada em função das características do solo, das condições climáticas e da cultura, sobretudo do seu estado de desenvolvimento.

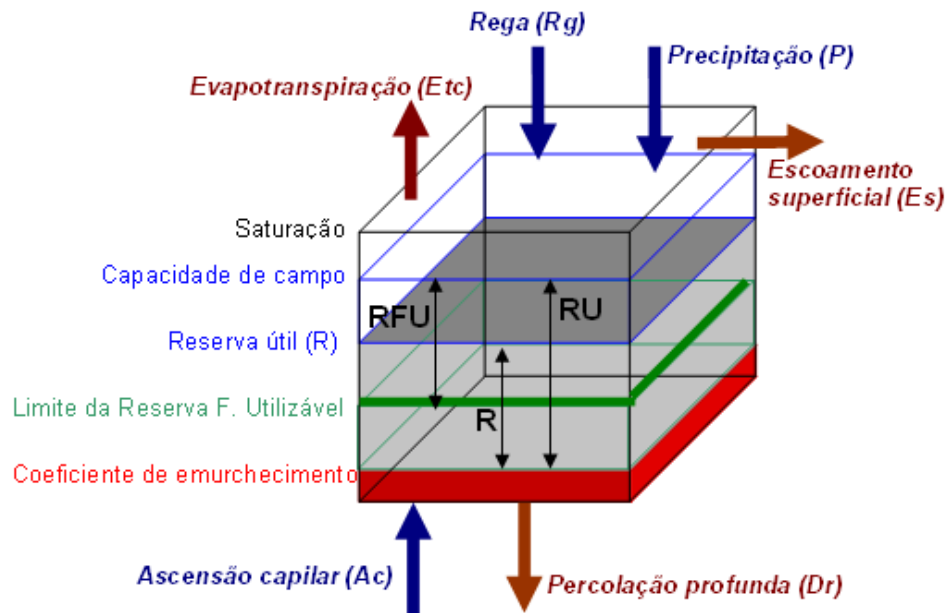


Figura 2.2. Esquema do reservatório do solo onde estão apresentadas as variáveis do balanço hídrico e as 4 zonas de como é dividido o reservatório: uma zona de saturação em que a água não é imediatamente utilizável (acima da CC), uma zona de conforto hídrico (entre CC e LRFU), uma zona de carência hídrica (entre o LRFU e CE) e uma zona onde da água não utilizável. A variável  $R$  indica a reserva útil do solo num determinado dia (Teixeira, 2021).

O BH, para um intervalo de tempo  $\Delta t$  (dias) e para uma camada de solo de espessura  $\Delta z$  (m), que corresponde à zona de enraizamento, pode ser descrito pela Equação 2.3 (Pereira, 2004):

$$(\Delta S + \Delta V) = (P + R_g + AC) - (Es + Dr + ET_c) \quad (2.3)$$

onde:  $R_g$  e  $P$  representam entradas de água com a rega e a precipitação, respetivamente;  $AC$  a entrada de água por ascensão capilar;  $ET_c$  a perda água pela transpiração das plantas e pela evaporação a partir do solo;  $Dr$  e  $Es$  a perda de água por drenagem profunda e por escoamento superficial, respetivamente;  $\Delta V$  representa a variação do armazenamento da água no solo e  $\Delta S$  representa o incremento de água incorporadas nas plantas (ou seja, a variação do conteúdo em água nas plantas), que normalmente tem um valor insignificante no conjunto das trocas totais. Todas as variáveis são expressas em volume por área sendo vulgar exprimi-las em milímetros acumulados para o intervalo  $\Delta t$ .

A capacidade do reservatório ou o armazenamento de água no solo, depende das características do solo, do teor de água à capacidade de campo (CC), do teor de água no coeficiente de emurchecimento (CE) e ainda da profundidade radicular (Zr), que define a profundidade do reservatório. A quantidade de água que é possível armazenar e que está disponível para as plantas denomina-se reserva utilizável do solo (RU, mm), representado pela Equação 2.4 (Pereira, 2004).

$$RU = (\theta_{v\ CC} - \theta_{v\ CE}) Zr.10 \quad (2.4)$$

sendo  $\theta_v$  a fração volúmica de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) e Zr a profundidade radicular (cm).

A reserva de água que é facilmente utilizada pelas plantas na zona das raízes denomina-se reserva facilmente utilizável (RFU, mm), sendo dado pela Equação 2.5 (Pereira, 2004):

$$RFU = RU p \quad (2.5)$$

em que  $p$  corresponde à fração da RU que pode ser utilizada da zona das raízes sem que a planta entre em stress hídrico.

Foram, ao longo do tempo, realizados trabalhos com o objetivo de determinar a necessidades de rega das culturas através de ferramentas informáticas em que aplicam modelos de BH do solo, dos quais que destaca o *SIMDualK<sub>C</sub>* de Rolim *et al.* (2007), o *CROPWAT* de Surendran *et al.* (2015), o *PILOTE* de Khaledin *et al.* (2013), o *IrrigRotation* de Rolim & Teixeira (2008) e ainda o *ISAREG* de Teixeira & Pereira (1992) (Vilar, 2015). Estas ferramentas diferem nas condições iniciais e nos objetivos para que foram desenvolvidos. Neste trabalho é utilizado o modelo *ISAREG*, que é brevemente descrito na secção seguinte.

### 2.2.3. Modelo ISAREG

Os modelos de simulação do BH, quando bem calibrados, são ferramentas eficientes e precisas para obter as frequências das necessidades de rega, para suportar a evolução nas práticas da gestão de rega e para reconhecer o impacto do stress hídrico no terreno, bem como para otimizar a poupança de água e orientar práticas ambientais (Popova *et al.*, 2006).

O modelo *ISAREG* de Teixeira & Pereira (1992), de acordo com Fortes *et al.* (2005), foi muito utilizado em várias partes do mundo e é adequado para avaliar a programação corrente da rega, seleccionar a programação da rega mais apropriada para diferentes culturas e computadorizar as necessidades culturais de rega usando séries temporais climáticas. Exemplos dessas aplicações

para culturas de inverno e verão são apresentados em Oweis *et al.* (2003) e Zairi *et al.* (2003) para a região mediterrânea e Liu *et al.* (2000) e em Campos *et al.* (2003) para culturas regadas no norte da China (Fortes *et al.*, 2005).

O ISAREG foi desenvolvido a partir do procedimento proposto por Doorenbos & Pruitt (1977) e Allen *et al.* (1998) para simular o BH no solo tendo em conta a ascensão capilar e a percolação ou drenagem profunda da água para fora da zona radicular (Pereira *et al.*, 2003). O modelo está descrito detalhadamente por Pereira *et al.* (2003) e na Figura 2.3 é apresentado o esquema genérico do programa retirado do seu manual.

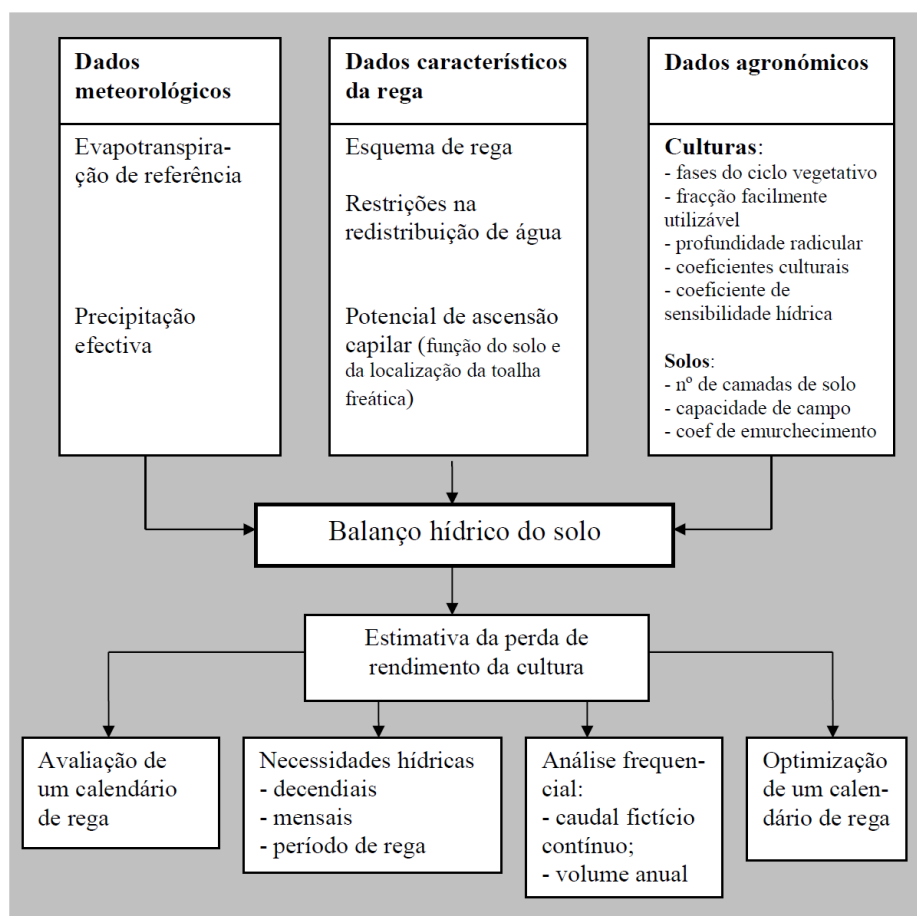


Figura 2.3. Esquema genérico do programa ISAREG (Teixeira, 2021).

A presente versão do modelo ISAREG calcula a  $ET_o$  usando o método Penman-Monteith, e calcula os parâmetros de cultura necessários utilizando o método FAO atualizada (Allen *et al.*, 1998). Os cálculos podem ser executados para intervalos de tempo diários, decendiais ou mensais (Teixeira, 2021). O modelo pode ser utilizado para simular diferentes esquemas de rega: 1) visando o rendimento máximo; 2) fixando a oportunidade e quantidade de rega; 3)

fixando os dias em que se realiza a rega; 4) utilizando um calendário ótimo de regas com um volume fixo; 5) sem rega; 6) o cálculo das necessidades globais de rega.

O modelo pode considerar restrições na disponibilidade de água para rega de vários modos: (a) indisponibilidade de água em determinados períodos; (b) limite na dotação de rega disponível para todo o ciclo de rega; e (c) limite na dotação de rega disponível durante períodos selecionados (Pereira *et al.*, 2003).

Para apoiar as decisões dos utilizadores, na seleção do calendário de regas mais adequado, o modelo usa uma relação linear simplificada entre a perda de rendimento relativa e o déficit de evapotranspiração sazonal relativo, conforme proposto por Doorenbos & Kassam (1979) e Stewart *et al.* (1976), usando um fator de resposta de produtividade específico da cultura *K<sub>y</sub>*.

#### 2.2.4. Eficiência de rega

Tal como referido anteriormente, após o cálculo das necessidades hídricas ( $ET_c$ ) para cada cultura, o balanço hídrico do solo na zona explorada pelas raízes é utilizado para a determinação das dotações uteis de rega, também designadas de necessidades líquidas de rega (NLR) bem como do intervalo entre regas. As necessidades de rega (NR) correspondem às NLR, afetadas pela eficiência de aplicação do sistema de rega na parcela ( $\epsilon_r$ ). As necessidades globais de rega (NGR) de um perímetro de rega, correspondem ao somatório das necessidades de rega de todas as parcelas do perímetro, como mostra a Equação 2.6 (Pereira, 2004):

$$NGR = \sum_{i=1}^n \frac{NLR_i}{\epsilon_{r_i}} \quad (2.6)$$

em que  $n$  representa o número de culturas,  $\epsilon_r$  a eficiência de aplicação do sistema de rega expressa em fração e NLR as necessidades líquidas de água para rega de cada cultura calculadas pelo balanço hídrico do solo (mm).

No Quadro 2.1 apresenta-se a gama de valores esperados para a eficiência de aplicação do sistema de rega na parcela (Pereira, 2004).

Quadro 2.1. Valores indicativos para sistemas de rega bem projetados e bem mantidos das eficiências de aplicação (adaptado de Pedreira, 2004)

Sistemas de rega	Eficiências (%)
● Rega de gravidade com nivelamento de precisão	
– sulcos	65 – 85
– faixas	70 – 85
– canteiros	70 – 90
● Rega de gravidade tradicional	
– sulcos	40 – 70
– faixas	45 – 70
– canteiros	45 – 70
● Rega de arroz, canteiros em alagamento permanente	25 – 70*
● Rega por aspersão	
– sistema estacionários de cobertura total	65 – 85
– sistemas estacionários deslocáveis manualmente	65 – 80
– rampas com rodas	65 – 80
– aspersores canhão com enrolador ou com cabo	55 – 70
– rampas móveis, com pivot central	65 – 85
● microrrega (rega localizada)	
– gotejadores, $\approx 3$ emissoras por planta (pomares)	85 – 95
– gotejadores, $< 3$ emissoras por planta	80 – 90
– micro-aspersores e “bubbles” (pomares)	85 – 95
– linha contínua de emissores gota-a-gota	70 – 90
*os valores mais baixos referem-se a canteiros tradicionais, mal nivelados e sem adequado controlo da lâmina de água do canteiro, enquanto os mais altos se referem a canteiros de grandes dimensões, bem nivelados e com bom controlo da lâmina de água,	

### 2.3. Deteção Remota e os SIG como ferramentas de apoio nos estudos de regadio

No caso do regadio, a DR, conjugada com modelos de BH do solo e os SIG, permite estimar as NR sob diferentes cenários quanto à distribuição espacial e temporal das culturas, métodos e gestão da rega, restrições de água, etc., possibilitando, assim, uma gestão adequada dos recursos hídricos (Rosa, 2018; Singh, 2015; Mendes, 2013; Todorovic & Steduto, 2003; Chintapalli *et al.*, 2000; Maracchi *et al.*, 2000).

### 2.3.1. Detecção remota

#### 2.3.1.1. Conceito e evolução

De acordo com Rocha & Sousa (2007), DR é a ciência, a arte ou o conjunto de técnicas, que possibilita, através da análise e medição da radiação eletromagnética (RE) refletida ou emitida por uma superfície e adquirida por sensores, obter dados sobre objetos, áreas ou fenómenos, sem que sejam necessários o contacto material entre o sistema observado e o observador. Os objetos à superfície da terra têm uma forma específica de emitir ou refletir RE, podendo assim serem distinguidos e caracterizados. Deste modo para adquirir dados geográficos e avaliar a sua dinâmica espacial com DR, é necessária a existência de uma fonte emissora de energia, um objeto e um sensor (Rocha & Sousa, 2007).

Resumidamente, Sousa & Silva (2011) descrevem o processo de aquisição de imagens a jusante da receção da radiação pelo sensor, nas seguintes etapas: transmissão, receção e processamento (que corresponde à transmissão da radiação registada pelo sensor, normalmente sob sinal elétrico, para uma estação que recebe e processa os dados para uma imagem), interpretação e análise (em que é interpretada a imagem processada de forma visual e ou digital, com o objetivo de extrair informação sobre o objeto iluminado) e aplicação (em que é aplicada a informação obtida de forma a resolver um problema).

#### 2.3.1.2. Tipos de sensores utilizados em Detecção Remota

Os sensores utilizados em DR são dispositivos que medem e registam energia eletromagnética, instalados em plataformas aerotransportadas (tais como aviões, helicópteros ou veículos não tripulados) e cosmotransportadas (satélites) (Figura 2.4a), podendo ser ativos ou passivos (Figura 2.4b) (Lechner *et al.*, 2020).

Os sensores ativos emitem um sinal eletromagnético (pulso) e depois medem e registam o tempo que demoram a receber a radiação refletida desse pulso. As vantagens destes sensores são a possibilidade de operar à noite e o facto de não serem afetados pela atmosfera, conseguindo penetrá-la. Exemplos deste tipo de sensores são o *LiDAR (Light Detection And Ranging)* que emite um pulso laser (RE com características muito específicas e normalmente na região do infravermelho próximo) e os que normalmente são designados como *RADAR (Radio Detection And Ranging)*, que é o caso do sensor *SAR (Synthetic Aperture Radar)* que

emite um pulso eletromagnético na região das ondas radio ou das microondas (Lechner *et al.*, 2020; Sousa & Silva, 2011)

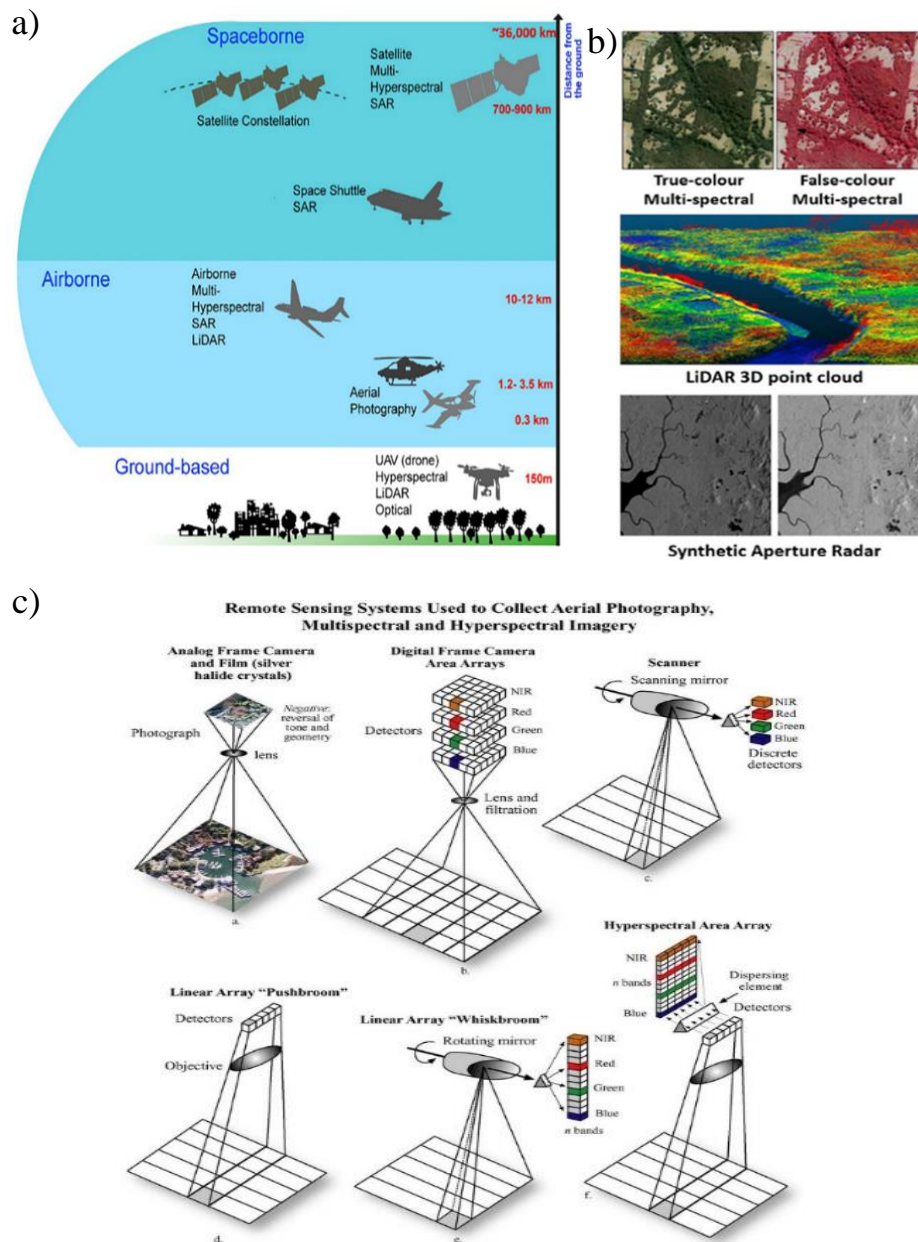


Figura 2.4. a) Plataforma e respectivos sensores comumente usados na detecção remota; b) representação dos dados obtidos por alguns desses sensores (Lechner *et al.*, 2020); c) seis tipos de sistemas de DR, comparando a geometria interna do sensor (resolução espectral) com a relação espacial entre a plataforma e o solo (resolução espacial) (Mendes, 2013)(Schuckman & Dutton, 2009).

Os sensores passivos dependem de uma fonte externa de energia, normalmente o Sol (Ashraf *et al.*, 2011) e são classificados como sensores térmicos ou óticos. Os sensores térmicos são sensores que detetam a radiação emitida no infravermelho (IR) térmico através de detetores



sensíveis ao contacto direto com os fótons emitidos pela radiação térmica. Os sensores óticos têm um desenho e aplicação semelhante a uma câmara digital, excetuando a possibilidade de recolher dados para além da região do visível do espectro eletromagnético (IR refletido próximo e médio e no IR emitido ou térmico), podendo ser divididos em sensores multiespectrais ou hiperespectrais (Lechner *et al.*, 2020), consoante o número de bandas espectrais, que são intervalos de onda específicos para classificar a RE (Vilar, 2015).

Estes sensores passivos dependem da radiação refletida do sol ou da radiação térmica emitida, sofrendo efeitos de difusão e absorção quando interagem com a atmosfera ou de radiação refletida de terrenos adjacentes, sendo a energia recebida pelo sensor afetada pela presença de nuvens e pelas características da superfície, não permitindo a utilização noturna (Lechner *et al.*, 2020)

A função básica dos sensores a bordo de um satélite é coletar informação da radiação ao longo de um caminho (órbita); os dados por cada sensor (Figura 2.4c) podem ser descritos em termos de: 1) resolução espacial refere-se à área da superfície observada para um campo instantâneo de observação, que é a menor área que um sensor consegue observar distintamente, também designada como tamanho do pixel do sensor; 2) resolução temporal, que é a frequência com que cada sensor observa o mesmo ponto na superfície; 3) resolução espectral, que é o número e largura das bandas espectrais presentes num sensor; 4) resolução radiométrica, que é o número de níveis em que um sinal elétrico do sensor pode ser dividido, sendo que quanto maior for esta resolução mais sensível é o sensor para detetar pequenas diferenças de energia refletida ou emitida. Nas imagens a resolução radiométrica é representada pelo número de tons de cinzento distinguíveis entre o preto e o branco (Sousa & Silva, 2011). Relativamente à resolução espectral, a sua forma mais simples é quando o sensor é composto por uma só banda, em que a imagem desse sensor é semelhante a uma fotografia a preto e branco (escala de cinzentos), e as imagens multi e hiperespectrais consistem em várias bandas, que podem ser exibidas uma de cada vez como uma imagem na escala de cinzentos ou com três bandas combinadas ao mesmo tempo como uma imagem de cor composta (Ashraf *et al.*, 2011).

#### 2.3.1.3. Algumas aplicações na área da rega

As técnicas de DR são utilizadas há vários anos e as potencialidades da sua utilização têm vindo a ser afirmadas, não na gestão direta da rega, mas na obtenção de estimativas das necessidades hídricas. Estas destinam-se a serem introduzidas em modelos do BH (Barker *et al.*, 2018; D'Urso

*et al.*, 2010; Dari *et al.*, 2020; Melton *et al.*, 2012; Rosa, 2018), permitindo melhorar a quantificação da água despendida na rega, caracterizando os estados de desenvolvimento das culturas e reduzindo os custos económicos e ambientais (Vilar, 2015)

Tanto Rosa (2018) como Vilar (2015) referem que a DR permite obter informações espaciais sobre as propriedades físicas e características dos cobertos vegetais a partir de medições da RE. Melton *et al.* (2012) acrescentam que identificar variações na cobertura da cultura pode identificar problemas sanitários, variações na textura do solo ou irregularidades nos sistemas de rega. D'Urso (2010) afirma que a DR é particularmente adequada para cartografar culturas e áreas regadas com uma precisão satisfatória e uma boa relação custo-eficiência.

As variáveis medidas a partir de satélites ou outros sensores remotos possibilitam diferentes aproximações para estimar a ET a partir da DR. Os métodos baseados no balanço energético à superfície da terra derivam o fluxo de calor sensível por meio da observação da reflectância de superfície que determina o fluxo de radiação líquida e a temperatura radiométrica da superfície resultante da observação das bandas térmicas do espectro eletromagnético (EE). Nas aproximações baseadas na introdução direta dos produtos obtidos por DR na equação de PM, introduzem-se os valores do índice de LAI, de  $h$  e do  $\alpha$  da superfície, para traduzir os parâmetros da copa das culturas relacionados com propriedades da superfície, tais como a  $r_a$  e  $r_s$  do copado, e a  $R_n$  (Calera *et al.*, 2017). Por último, encontram-se os métodos baseados na reflectância dos  $K_c$  (Calera *et al.*, 2017; D'Urso *et al.*, 2010), abordados mais pormenorizadamente de seguida por serem os utilizados no presente estudo.

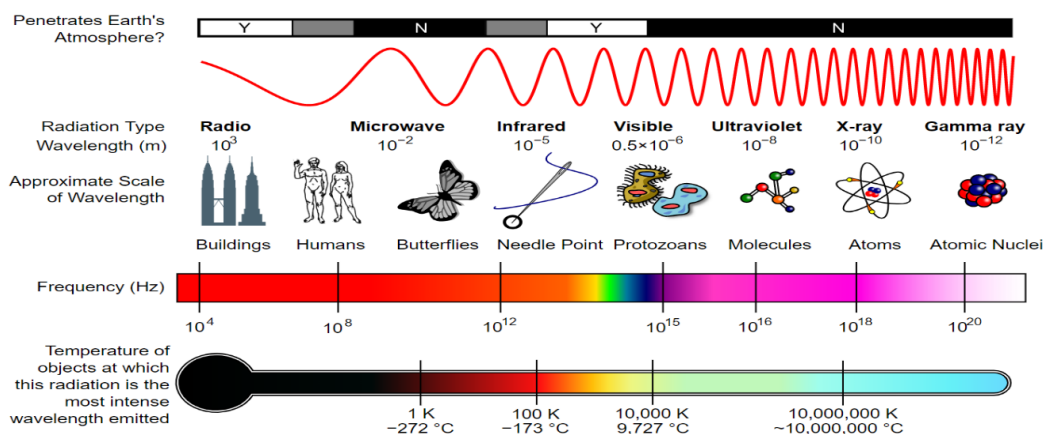
Autores como Pôças (2020), Alface *et al.* (2019), Barker *et al.* (2018), Rosa (2018), Calera *et al.* (2017), Toureiro *et al.* (2017), Melton *et al.* (2012), D'Urso *et al.* (2010), Ahmad *et al.* (2009) e D'Urso & Belmonte (2006), referem relação directa entre a variação espacial e temporal do  $K_c$  e a variação espacial e temporal de vários índices de vegetação (IV) obtidos a partir da análise de imagens de DR ao longo do ciclo cultural. De acordo com D'Urso *et al.* (2010), o valor de  $K_c$  é fortemente influenciado pelo comportamento espectral dos copados observados, já que este valor se relaciona com o próprio desenvolvimento da copa e da  $f_c$  da vegetação. Uma vez que essas características da vegetação estão bem correlacionadas com as reflectâncias espectrais, é possível estabelecer a correlação entre a observação remota multiespectral do crescimento uniforme das culturas e o correspondente valor de  $K_c$ . Uma das principais vantagens desta abordagem é o facto de os valores de  $K_c$  não dependerem da data e

densidade da plantação, mas da cobertura efetiva da cultura. Por outro lado, estes valores de  $K_c$  são sensíveis à variabilidade de uma mesma cultura devido às práticas culturais (D'Urso & Belmonte, 2006).

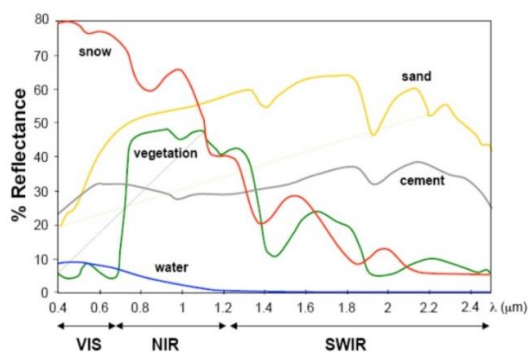
#### 2.3.1.4. Resposta espectral da vegetação à detecção remota

O princípio subjacente reside no facto de a RE incidente interagir com os pigmentos, ar intercelular e água presentes na folha (Figura 2.5).

a)



b)



c)

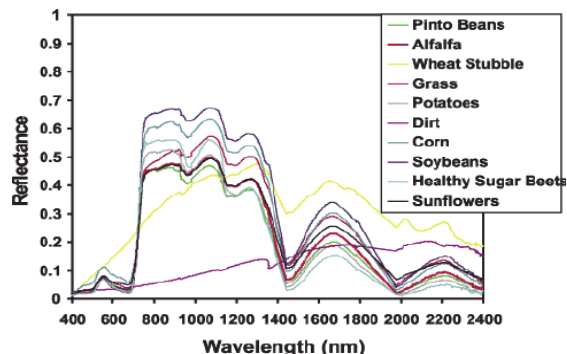


Figura 2.5. a) Espectro da radiação eletromagnética (Texas, 2014); b) curvas de reflectância espectral para diferentes superfícies (Pereira, 2018); c) curvas de reflectância espectral da vegetação para diferentes culturas (Ashraf *et al.*, 2011).

A quantidade de energia refletida pela folha varia no comprimento de onda e na região do EE (Pôças *et al.*, 2020), sendo que tipicamente o padrão espectral da reflectância da folha (Figura 2.5b) é caracterizado por um baixo valor na região do visível e um alto valor na região do IR próximo (NIR) (Pôças *et al.*, 2020). Os pigmentos da folha são responsáveis por uma forte absorção da radiação incidente na região do visível do EE (Figura 2.5a), reduzindo, assim, o

valor da reflectância na mesma região. Contrariamente, nas camadas internas da folha, compostas por células e por espaço intercelular preenchido com ar, ocorrem trocas de oxigénio e dióxido de carbono associado à fotossíntese e à respiração, responsáveis pelos valores altos de radiação refletida na região do NIR no EE ( Pôças *et al.*, 2020). Na região do IR, as ondas de curto comprimento são absorvidas devido à presença de água líquida no interior da folha, fazendo variar os valores da reflectância nessa região consoante o conteúdo em água dentro da folha (Pôças *et al.*, 2020). Apesar de seguirem um padrão similar, as folhas de diferentes culturas agrícolas exibem diferentes padrões da resposta espectral (Figura 2.5c), como resultado das características morfológicas e fisiológicas de cada espécie (Pôças *et al.*, 2020).

#### 2.3.1.5. Índices de vegetação

Dados obtidos por DR, sob a forma de IV, que são combinações matemáticas de duas ou mais bandas do EE (Pôças *et al.*, 2020), são considerados uma alternativa para representar o estágio atual de crescimento e o estado das culturas. Esta aplicação resulta do facto de que muitos IV são indicadores da abundância relativa da vegetação verde e, portanto, da radiação absorvida e da biomassa verde (Pôças *et al.*, 2020). A utilização de IV é vantajosa por serem fáceis e simples de interpretar, o que justifica um uso generalizado para avaliar um largo conjunto de parâmetros biofísicos tais como o  $K_c$ . Além disso, permitem avaliar a dinâmica da vegetação ao longo do tempo e espaço, indicando, assim, as variações temporais e espaciais na estrutura da vegetação e nos parâmetros biofísicos, e, conseqüentemente, facilitando a sua aplicação na monitorização da agricultura, incluindo aspetos relacionados com a gestão da rega (Pôças *et al.*, 2020). Contudo, a maior crítica apontada à relação do  $K_c$  com os IV é o facto que a sua variabilidade depende das condições experimentais (tipo de cultura, gestão de rega e condições climáticas) e a linearidade dessa relação depende do tipo de IV que é utilizado (Pôças *et al.*, 2020). De acordo com os mesmos autores, vários IV foram desenvolvidos, não só para avaliar a estrutura do copado, mas também para avaliar propriedades fisiológicas (por exemplo, eficiência do uso da radiação luminosa ou condições de stress das culturas) e bioquímicas (tais como conteúdo em pigmentos). No entanto, para o propósito desta dissertação, focar-se-ão os IV que se relacionam com os parâmetros estruturais da vegetação. Entre eles, o mais usado é o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), traduzido pela seguinte Equação 2.7 (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})} \quad (2.7)$$

em que  $\rho_{\text{NIR}}$  representa a reflectância na banda do infravermelho próximo (adimensional) e  $\rho_{\text{red}}$  a reflectância na banda do vermelho (adimensional) na região do visível do EE.

As relações empíricas entre o NDVI e o  $K_c$  ( $K_c$ \_NDVI) são muito usadas devido à sua sensibilidade na presença de pigmentos que participam no processo de fotossíntese (Alface *et al.*, 2019), à simples e fácil aplicação (Alface *et al.*, 2019; D'Urso *et al.*, 2010), por ser adequado para aplicações operativas em tempo real (D'Urso *et al.*, 2010) e para detectar de forma rápida e eficiente variações na vegetação, como mostra a Figura 2.6b (Alface *et al.*, 2019). Esta relação é possível graças à assinatura espectral das diferentes culturas, sendo que a vegetação saudável mostra um contraste evidente entre a região do vermelho e a região do NIR (Figura 2.6a) no EE (Alface *et al.*, 2019).

Por outro lado, esta relação é muito criticada porque é baseada numa avaliação subjetiva do desenvolvimento das culturas no terreno e, como tal, não pode ser validada extensivamente em diferentes tipos de culturas (D'Urso *et al.*, 2010). É alvo de crítica ainda porque o NDVI apresenta alguma instabilidade sob a variação do solo, das condições atmosféricas, da quantidade de biomassa que pode levar à saturação do IV (Pôças *et al.*, 2020); depende ainda do ângulo e da geometria da radiação recebida pelo sol e a informação radiométrica é muito limitada, não sendo, portanto, capaz de detectar muitos dos padrões da superfície que podem afetar o comportamento da reflectância. Estes aspetos tornam necessárias as calibrações para cada cultura no local e no sensor, aumentando o tempo e o custo em programas intensivos de medição do terreno (D'Urso *et al.*, 2010).

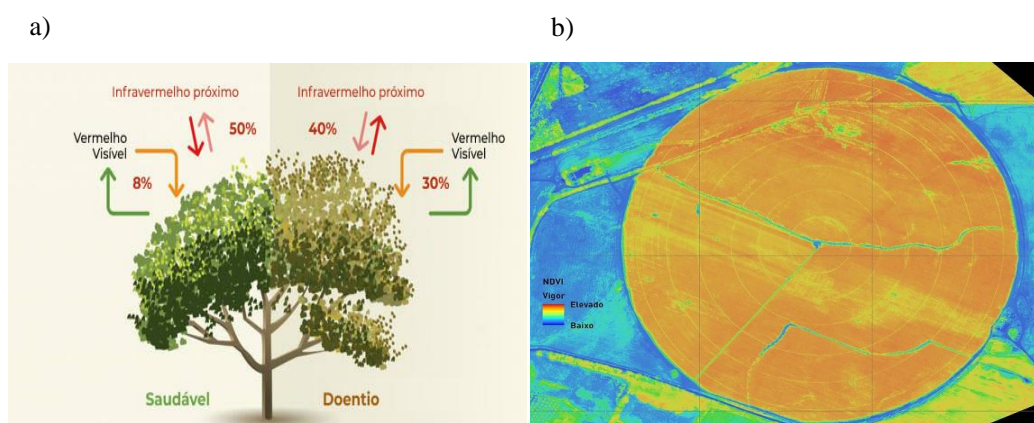


Figura 2.6. a) Relação das reflectâncias nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo entre uma planta saudável (maior vigor vegetativo) e uma planta doente ou em fim de vida (EOS, 2020) b) Imagem de NDVI em tempo real de uma parcela de milho (terraDrone, 2019).

### 2.3.2. Aplicação de sistemas de Informação Geográfica na área da rega

Uma gestão eficiente da água e das áreas regadas requer uma compreensão abrangente da distribuição espacial de variáveis tais como o clima, as propriedades do solo, as culturas, a disponibilidade e os sistemas de distribuição de água e as práticas de gestão. Grande parte destas variáveis tem uma distribuição complexa, tanto temporal quanto espacialmente. As várias técnicas de interpolação existentes nos SIG, são úteis para a análise ou manipulação dos dados espaciais e para gerar mapas (Figura 2.7) de necessidades de rega, dos métodos/sistemas de rega, da dotação máxima de rega, do défice e do excesso de rega, distribuídos espacialmente, facilitando a transferência de informação entre os vários intervenientes (Acharya *et al.*, 2016; Allani *et al.*, 2018; A. Pandey & Mogarekar, 2021).

Muitos dos trabalhos realizados em regadio, utilizando SIG, de acordo com Pandey *et al.* (2021), concentraram-se na criação de sistemas de decisão e suporte para a gestão da água, tais como o de Rao *et al.* (2007), que formulou um SIG em rede para gerir o Programa de Reserva de Conservação do USDA, o de Paz *et al.* (2007), que criou um SIG para o apoio à decisão de rega baseado no ENSO (padrão climático: *El Niño-Southern Oscillation*), o IDSS-C (sistema integrado de apoio à decisão para obtenção de consenso)

criado por Giordano *et al.* (2007), o SDSS (sistemas de apoio à decisão espacial), de Alrayess e Ulke (2017), e de Acharya *et al.* (2016), que desenvolveram uma interface gráfica de utilizador para gerar mapas relacionados à gestão da rega em *Sidholi Distributary of Upper Ganga Canal System* (India). Todorovic & Steduto (2003), utilizaram dados espaciais climáticos e de solo a partir de camadas pseudomatrixiais, em que o formato corresponde ao tipo vetorial, mas os dados encontram-se organizados em células de pixel. Este modelo permitiu criar cenários de rega com o objetivo de escolher os padrões culturais mais apropriados, estimar

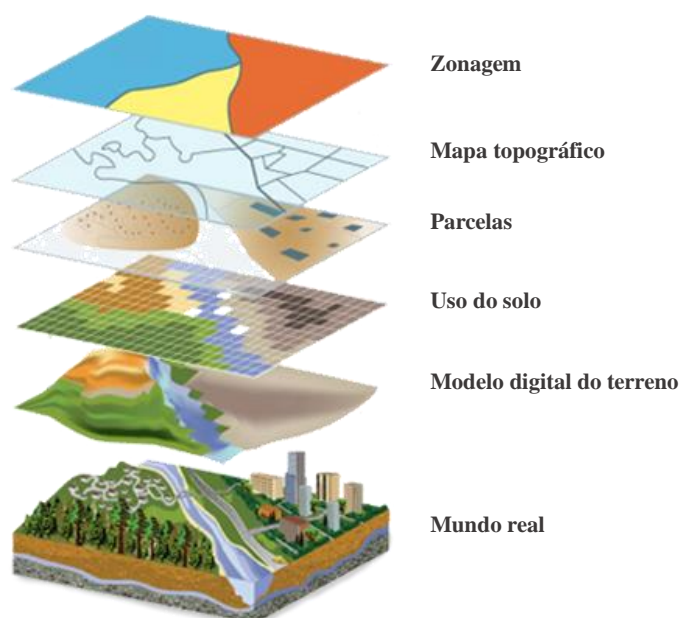


Figura 2.7. Exemplo de uma operação típica na utilização de SIG (adaptado de ShaleTrak, 2017)

as suas necessidades de rega e calcular o correspondente défice ou excesso de rega, facilitando assim o uso dos resultados obtidos a partir desses cenários de modo a melhorar as estratégias na escolha das culturas e na programação da rega de acordo com a escolha das culturas ou parcelas a ser regadas, quando e em que quantidade. Já Shitu *et al.* (2018) identificaram um modelo desenvolvido por Robson *et al.* (2003), o software desenvolvido por Georgoussis *et al.* (2009) e o sistema criado por Georgoussis *et al.* (2009). Os primeiros utilizam os SIG para definir o fornecimento e a distribuição periódica de água em arrozais durante a época húmida e seca, com base na procura de água, e desenvolveram um programa computacional em SIG, baseado numa interface de utilizador, para monitorizar a rega com base no abastecimento de água e abastecimento total de água a partir do balanço hídrico periódico numa base semanal. O software de Georgoussis *et al.* (2009), de livre acesso, é baseado em SIG para controlar a programação de rega na região de Tessalónica na Grécia, enquanto o sistema desenvolvido por Mohd *et al.* (2014), SWAMP (*Soil water management for paddies*), é um sistema geoespacial em rede de suporte à decisão (DSS).

Em Portugal, Rosa (2018) conecta o modelo de simulação do BH do solo, SIMDualKc, com um software de SIG, o ArcMap, permitindo estimar a distribuição espacial das variáveis do modelo do BH, assim como os valores acumulados destas variáveis ao nível do projeto de rega ou de um sector. Em 2013, Mendes desenvolveu uma aplicação SIG, *GISClimReg*, para o apoio à gestão da rega, de modo a permitir combinar bases de dados georreferenciados com modelos de simulação, tendo também como objetivo realizar estudos regionais dos impactos das alterações climáticas sobre o regadio. Fortes *et al.* (2005) desenvolve o GISAREG que é um modelo de simulação na programação da rega baseado em SIG, em que integra o modelo ISAREG e um programa auxiliar KCISA, responsável por criar dados de cultura apropriados para introdução no modelo ISAREG, usando o recente método da FAO, publicada em Allen *et al.* (1998), para a evapotranspiração cultural. O principal interesse do GISAREG reside na capacidade do modelo de simular calendários de rega alternativos em relação a diferentes níveis de stresse hídrico permitido pela cultura, bem como a várias restrições na disponibilidade de água, tendo em atenção a distribuição espacial dos dados de entrada.

### 3. Materiais e Métodos

No presente Capítulo é apresentada uma descrição da zona de estudo, dos dados recolhidos e dos métodos e ferramentas utilizados para execução dos objetivos propostos na dissertação. Na Figura 3.1 apresenta-se o fluxograma com um resumo dos métodos adotados, apresentando-se a versão completa no Anexo I. Os procedimentos utilizados consistiram na aplicação de métodos de deteção remota (DR) para determinação do índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI), de modo a obter as datas de início das sucessivas fases de desenvolvimento das culturas presentes no Perímetro de Rega do Lucefecit (PRL). Procedeu-se, também, à aplicação de um modelo de balanço hídrico (BH), para calcular as necessidades de rega (NR) de cada cultura consoante o tipo de solo e o sistema de rega utilizado. Os trabalhos foram integrados numa plataforma de sistema de informação geográfica (SIG), que permitiu (i) organizar a informação em diferentes camadas de acordo com a sua natureza, (ii) obter as unidades homogéneas de análise (UHA), caracterizadas por solo-cultura uniformes, (iii) efetuar a espacialização das NR anuais e (iv) obter as necessidades globais de rega (NGR) anuais e de ponta do Perímetro de Rega do Lucefecit.

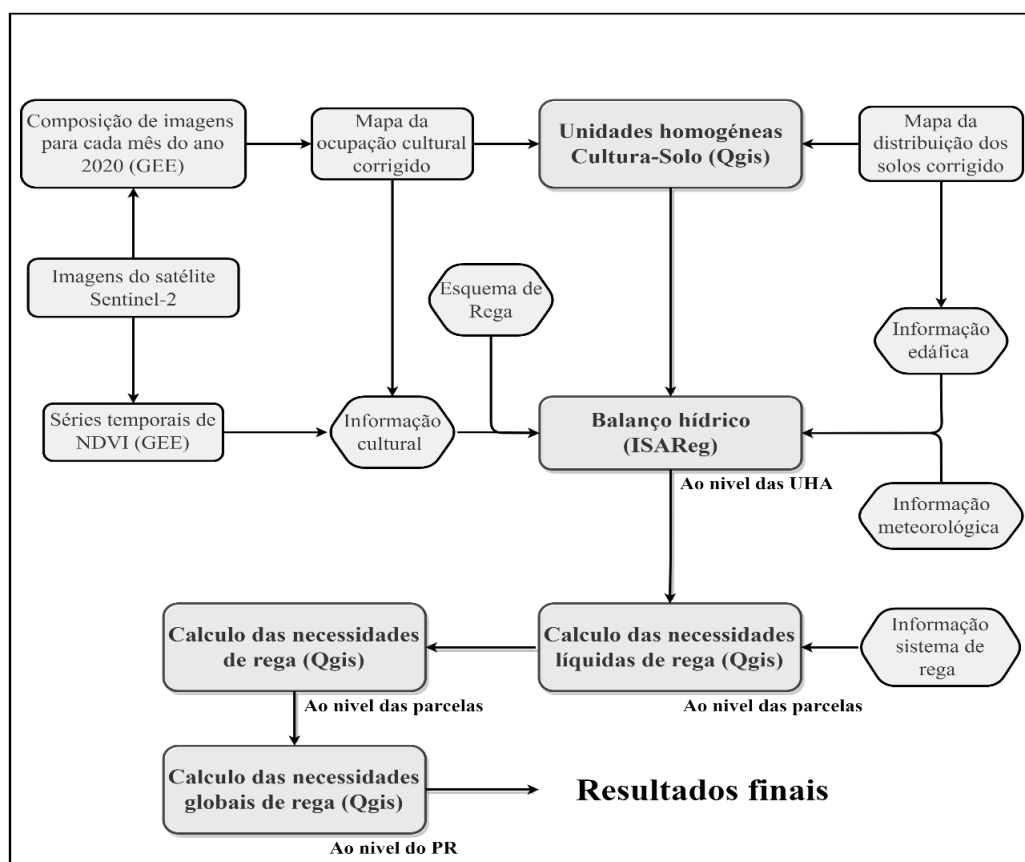


Figura 3.1. Fluxograma simplificado dos métodos utilizados.



### 3.1. Caracterização da região em estudo

#### 3.1.1. Localização

A área de estudo (Figura 3.2) corresponde ao Perímetro de Rega do Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit (AHL) gerido pela associação de beneficiários do Lucefecit (ABL). Localiza-se na região do Alentejo, no concelho de Alandroal, pertencente ao distrito de Évora, entre os paralelos  $38^{\circ}38'38''$  N e  $38^{\circ}35'0''$  N e os meridianos  $7^{\circ}25'4''$  W e  $7^{\circ}22'2''$  W. O projeto de regadio do PRL foi executado em duas fases, entre 1977 e 1995, com objetivo de fornecer água para agricultura a partir da albufeira da barragem do Lucefecit, na bacia hidrográfica do rio Guadiana, mais precisamente, na linha de água da ribeira do Lucefecit (DGADR, 2016). O PRL apresenta uma área explorada de cerca de 1175 ha, que se distribui pelas freguesias Terena, Santiago Maior, Capelins e União das Freguesias de Alandroal (Nossa Senhora da Conceição), São Brás dos Matos (Mina do Bugalho) e Juromenha (Nossa Senhora do Loreto).

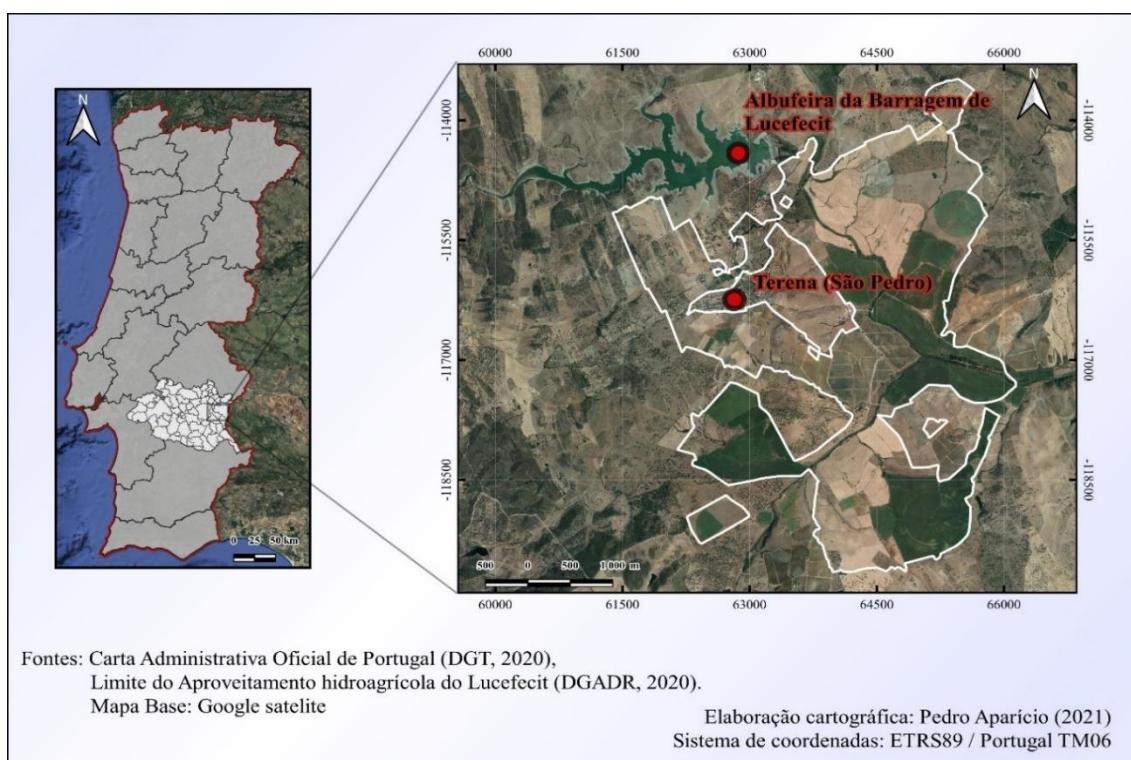


Figura 3.2. a) Localização de área de estudo em Portugal e na bacia hidrográfica do rio Guadiana; b) limites do PRL.

### 3.1.2. Principais infraestruturas do Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit

O AHL é constituído por várias infraestruturas (DGADR, 2016), que, seguidamente, são brevemente descritas (Figura 3.3).

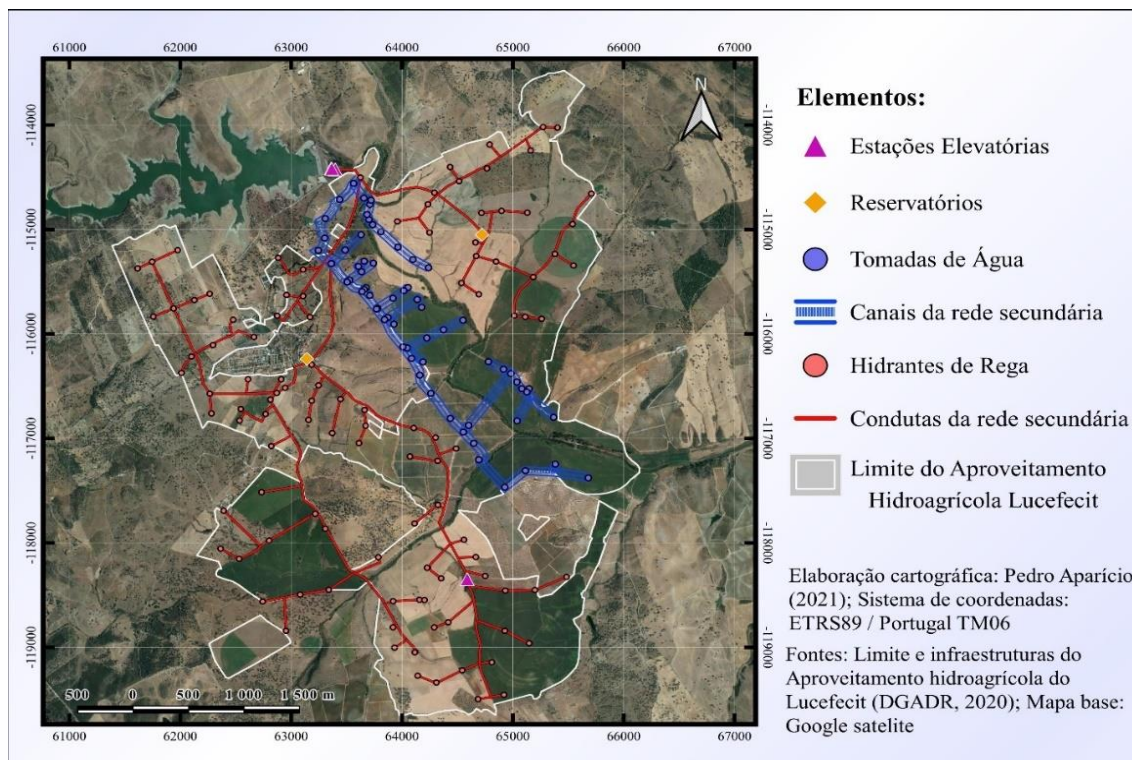


Figura 3.3. Mapa da localização das estações elevatórias, reservatórios, condutas, canais, hidrantes e tomadas existentes no Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit (ABL, 2021).

#### 3.1.2.1. Barragem do Lucefecit

O projeto da barragem (Figura 3.4) foi feito em 1976, para uma área a regar de 700 ha. A barragem foi construída, na ribeira de Lucefecit, em aterro através de dois diques tendo uma altura de 23 m. A cota do coroamento é 185 m e a cota de pleno armazenamento é 182 m. A albufeira apresenta uma capacidade útil de 9 625 000 m<sup>3</sup> (DGADR, 2014, 2016).



Figura 3.4. Barragem do Lucefecit: Fotos dos descarregadores de cheia, coroamento e do paramento a montante (lado esquerdo) e da tomada de água (lado direito), retirado de DGADR (2014).

Pode observar-se nas Figura 3.5 a evolução média anual, entre 2001 e 2020, do volume armazenado e da cota do espelho de água da albufeira do Lucefecit. Em média, entre 2001 e 2020 a albufeira nunca alcançou a cota máxima de armazenamento, tendo o consumo agrícola correspondido quase à totalidade da diminuição do volume armazenado.

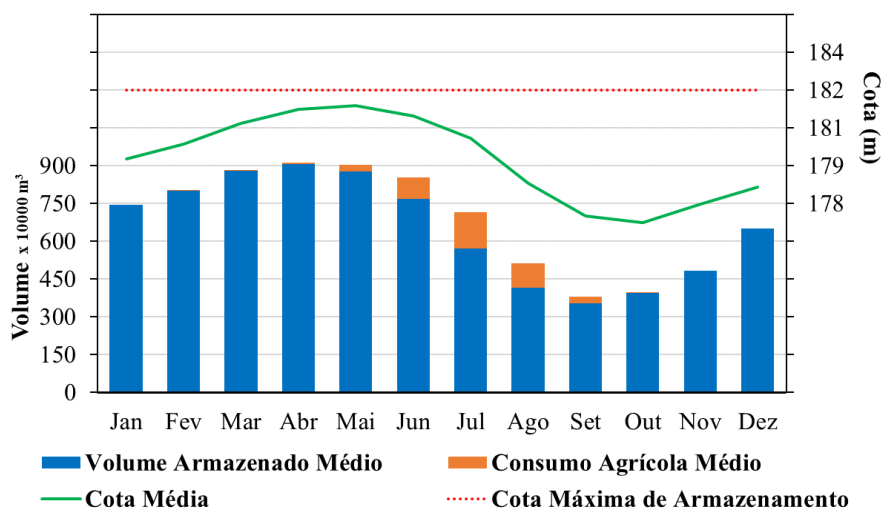


Figura 3.5. Volume mensal armazenado na albufeira do Lucefecit (médias de 2001 a 2020), volumes mensais consumidos pela atividade agrícola no AHL (médias de 2001-2009) e cotas médias mensais atingidas na barragem do Lucefecit entre 2001 e 2020 (adaptado de SNIRH, 2021).

### 3.1.2.2. Estações elevatórias

Foram construídas duas estações elevatórias, com o objetivo de pressurizar a rede de alta pressão (Figura 3.3). A estação de bombagem principal foi concebida para o caudal de  $1153 \text{ L s}^{-1}$ , sendo a altura manométrica de 260 m, o que corresponde a uma pressão de 944 kPa. A água é bombeada diretamente para o sistema de condutas, existindo dois tanques hidropneumáticos para compensar os ciclos de funcionamento da bomba e para proteger a estação de bombagem e a rede de rega do golpe de ariete. Para garantir a pressão mínima necessária (cerca de 450 kPa) nos hidrantes localizados nas condições mais desfavoráveis, uma estação de bombagem de reforço, com altura manométrica 281 m, serve 14 hidrantes localizados num ramo terminal (Figura 3.3). O número de hidrantes é de 107 e de 204 o de canais, com descargas entre  $10$  a  $280 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , sendo os hidrantes equipados com válvulas reguladoras de pressão (Calejo *et al.*, 2005).

### 3.1.2.3. Reservatórios

Para além da albufeira do Lucefecit, existem dois reservatórios intermédios unidireccionais (Figura 3.3) com o volume de  $75 \text{ m}^3$ , com a função de armazenamento de água na rede de

distribuição sob pressão, permitindo assim manter uma determinada cota piezométrica na rede e dar resposta a picos pontuais de procura a jusante (Cunha, 2018).

#### 3.1.2.4. Rede de rega primária e secundária

A rede primária de rega, com origem na barragem, é formada por um canal a céu aberto, com um comprimento de 3 500 m (Figura 3.3). A rede secundária de rega (Figuras 3.3 e 3.6) é constituída por um sistema de abastecimento de água misto com condutas por gravidade, derivadas da rede primária, com cerca de 6 500 m de comprimento, permitindo explorar uma área de 211 ha e por condutas sob pressão, derivadas das estações elevatórias, com cerca de 36 000 m de comprimento, permitindo explorar uma área de 964 ha (DGADR, 2014, 2016).

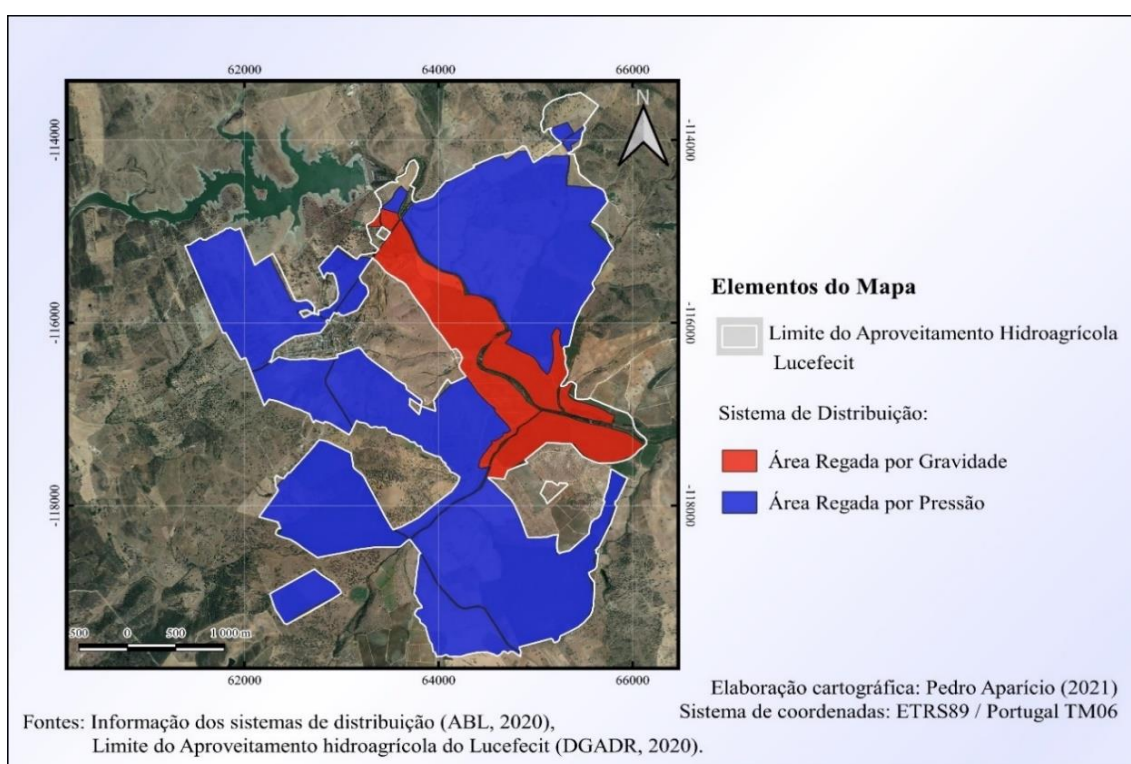


Figura 3.6. Mapa da distribuição espacial da rede secundária.

A distribuição de água às parcelas agrícolas exploradas agrícolas é realizada segundo um sistema rígido em rotação, para as parcelas alimentadas por gravidade, e um sistema flexível a pedido, para as parcelas alimentadas sob pressão (ABL, 2021). Às primeiras é atribuída uma dotação máxima de água por regante e por hectare, estando o controlo (abertura e fecho das tomadas de água) sob a responsabilidade da ABL.

Os sistemas rígidos de distribuição são caracterizados por eficiências baixas de transporte, distribuição e uso da água, baixa comodidade para o regante, fraca flexibilidade da rega e

facilidade de operação da rede. Nos sistemas a pedido, os regantes podem utilizar a água quando, como e durante o tempo que quiserem, permitindo o uso da água à medida das necessidades das culturas, sendo, por isso, caracterizados por boa eficiência do uso da água, elevada comodidade para a regante e excelente flexibilidade da rega (Oliveira, 2011).

### 3.1.2.5. Rede terciária

A diversidade e a frequência relativa das tipologias da rede terciária presentes no PRL estão representadas no diagrama circular na Figura 3.7. A correspondente distribuição espacial apresenta-se na Figura 3.8.

De acordo com os dados fornecidos pela ABL para o ano de 2020, o sistema de rega predominante é o sistema de aspersão fixa com cobertura total,

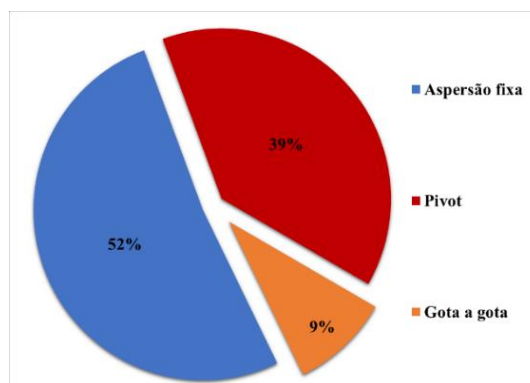


Figura 3.7. Tipologia e frequência relativa dos sistemas de rega presentes no PRL.

representado 52% da área regada, enquanto o sistema de aspersão por rampa pivotante é responsável por 39%, restando 9% onde é utilizada rega localizada por gota-a-gota.

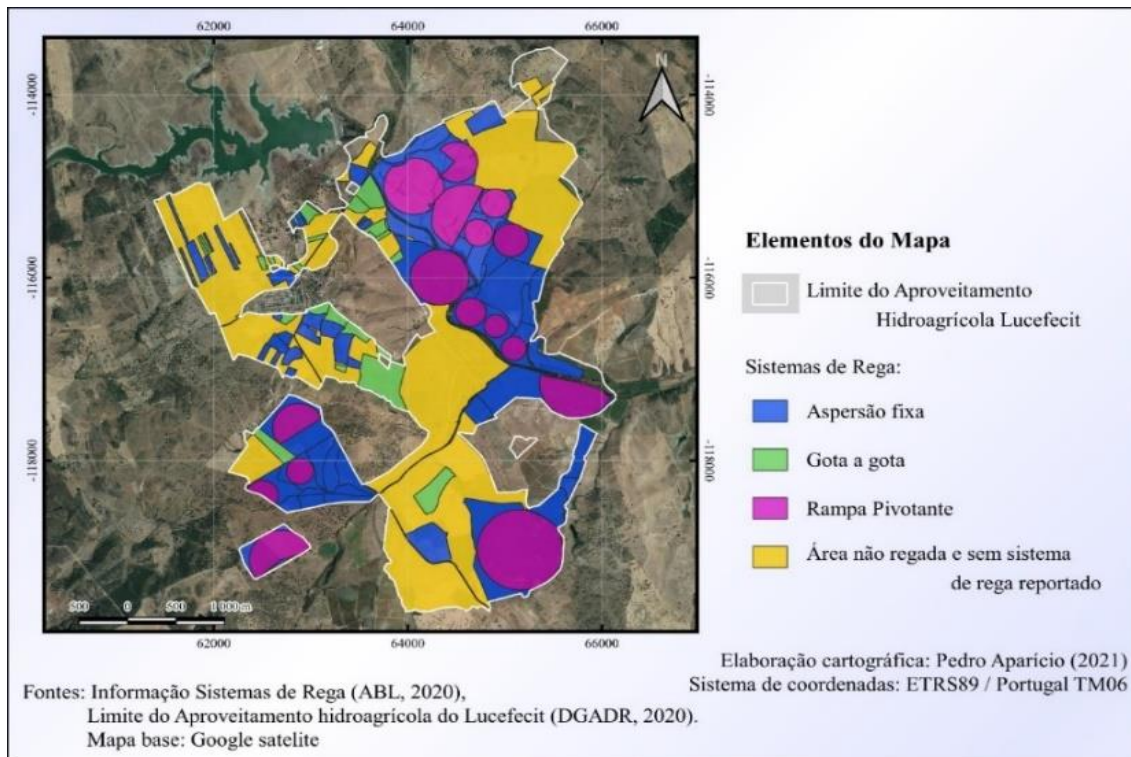


Figura 3.8. Mapa da distribuição espacial dos sistemas de rega por parcela.

### 3.1.3. Caracterização climática

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região em estudo é temperado mediterrânico com verão quente e seco (Csa) (Beck *et al.*, 2018).

De acordo com o método de Thiessen (Figura 3.9), a estação meteorológica do Redondo (coordenadas: Lat 38,649800° (38°38'59,28"N) / Long -7,548007° (7°32'52,82"O)) tem uma área de influência que abrange o AHL. Esta estação automática foi instalada no final de 2001 e é gerida pelo COTR. Os valores mensais da precipitação e da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>, método FAO Penman-Monteith) entre 2002 e 2020 são apresentadas na Figura 3.10.



Figura 3.9. Localização das estações meteorológicas nas proximidades do local de estudo e áreas de influência (método de Thiessen) (COTR, 2021).

Registou-se na estação meteorológica, entre 2002 e 2020, uma precipitação média anual de cerca 504 mm. O deficit pluviométrico, estimado pela diferença entre evapotranspiração mensal e a precipitação, é maior no período de fevereiro a outubro, durante o qual as chuvas não atendem aos requisitos hídricos na área, sendo, por isso, imprescindível a rega.

No Anexo II são apresentadas as constantes meteorológicas referentes ao ano 2020.

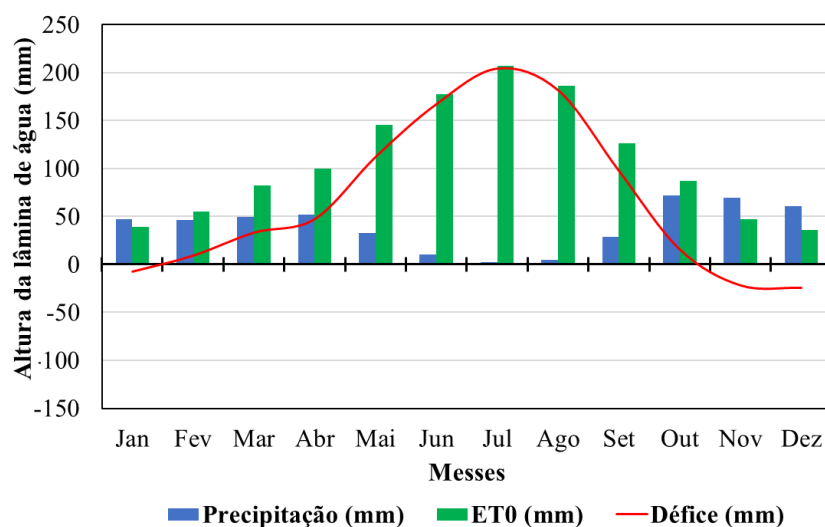


Figura 3.10. Médias mensais acumuladas da precipitação, da evapotranspiração e do déficit hídrico para o período de 2002 a 2020, obtidas pela estação meteorológica do Redondo (COTR, 2021)

### 3.1.4. Caracterização edáfica

Nas Figuras 3.11 e 3.12 apresentam a distribuição e a frequência relativa de cada classe de solo presente no PRL, de acordo com a carta de solos de Portugal.

As famílias de solo com maior representatividade (com cerca de 86% da área total) são: Solos Argiluvitados Pouco Insaturados - Solos Mediterrânicos, Vermelhos ou Amarelos, de Materiais Não Calcários, Normais, de "rañas" ou depósitos afins (Sr, 34%); Solos Argiluvitados Pouco Insaturados - Solos Mediterrânicos, Pardos, de Materiais Não Calcários, Normais, de xistos ou grauvaques (Px, 25%);

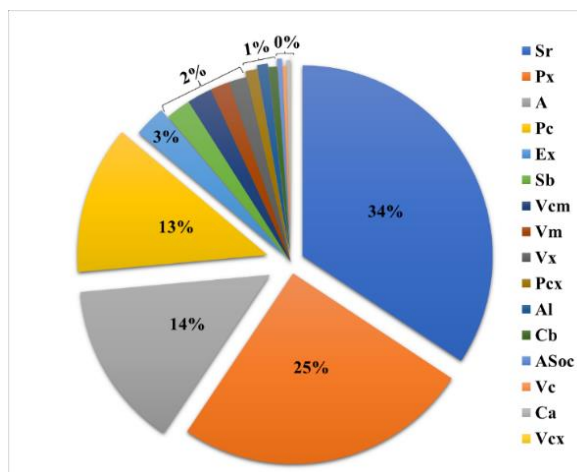


Figura 3.11. Frequência relativa de cada solo presente no PRL

Solos Incipientes - Aluviossolos Modernos, Não Calcários, de textura mediana (A, 14%) e os Solos Calcários, Pardos dos Climas de Regime Xérico, Normais, de calcários não compactos (Pc, 13%). Os restantes solos acumulados representam cerca de 13 % da área total, a descrição de cada família de solos, encontram-se em Cardoso (1965).

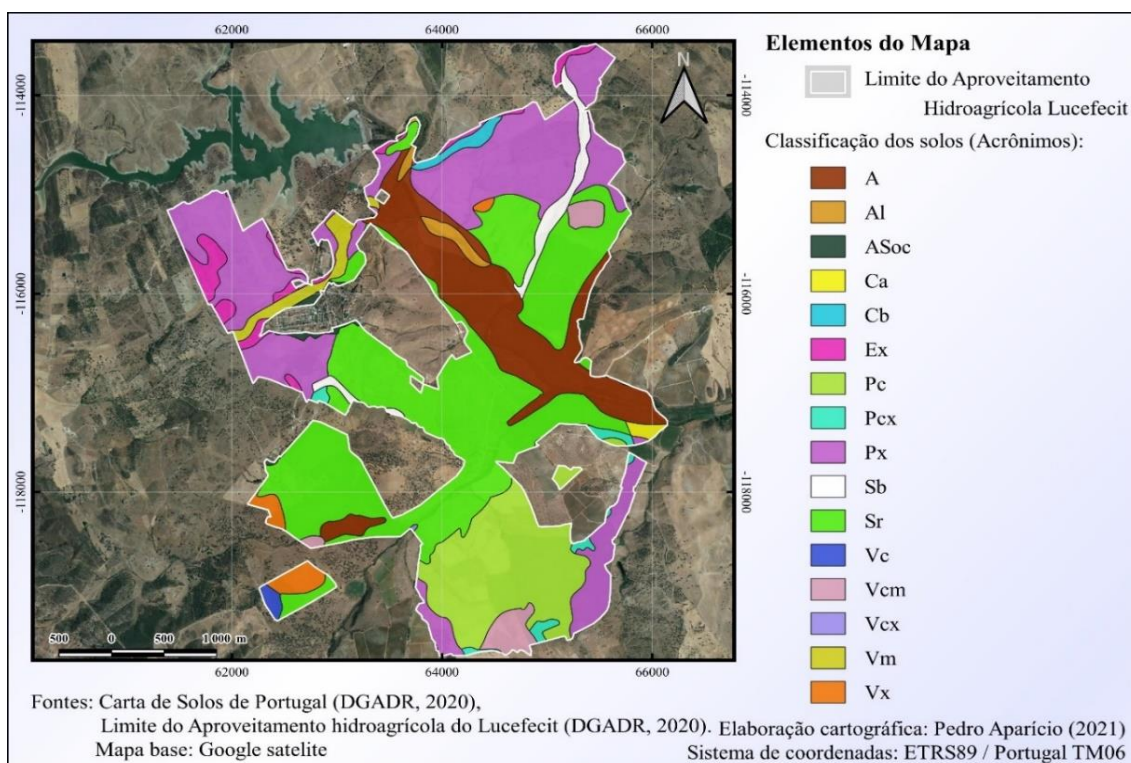


Figura 3.12. Mapa da distribuição e classificação dos solos presentes no PRL.

### 3.1.5. Ocupação cultural

No ano de 2020, 45,5% da área total beneficiada não foi regada (1175 ha) (Figura 3.13), possivelmente por se terem instalado culturas de sequeiro, serem parcelas em pousio e/ou em abandono. Os restantes 54,5% foram regados, com i) culturas anuais (22,0% milho, 13,4% trigo, 4,0% cevada, 3,7% sogo e 4,0%: hortas, meloa, ervilha,

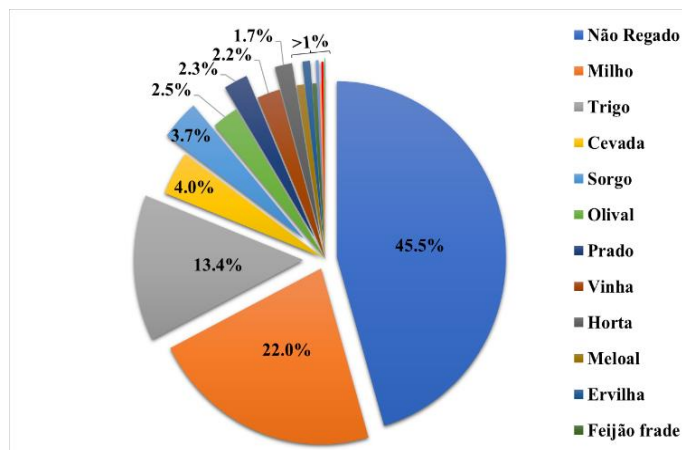


Figura 3.13. Frequência relativa da área ocupada por cada cultura regada do PRL e da área não regada.

feijão frade, luzerna), ii) jardins, iii) desconhece-se a cultura; iv) culturas perenes (2,5% de olival, 2,2% de vinha, 2,5% de prado e pastagem e 0,04% de pomar).

A Figura 3.14 apresenta ao nível da parcela as culturas regadas em 2020, tal como as parcelas não regadas beneficiadas pelo PRL (ABL,2021).

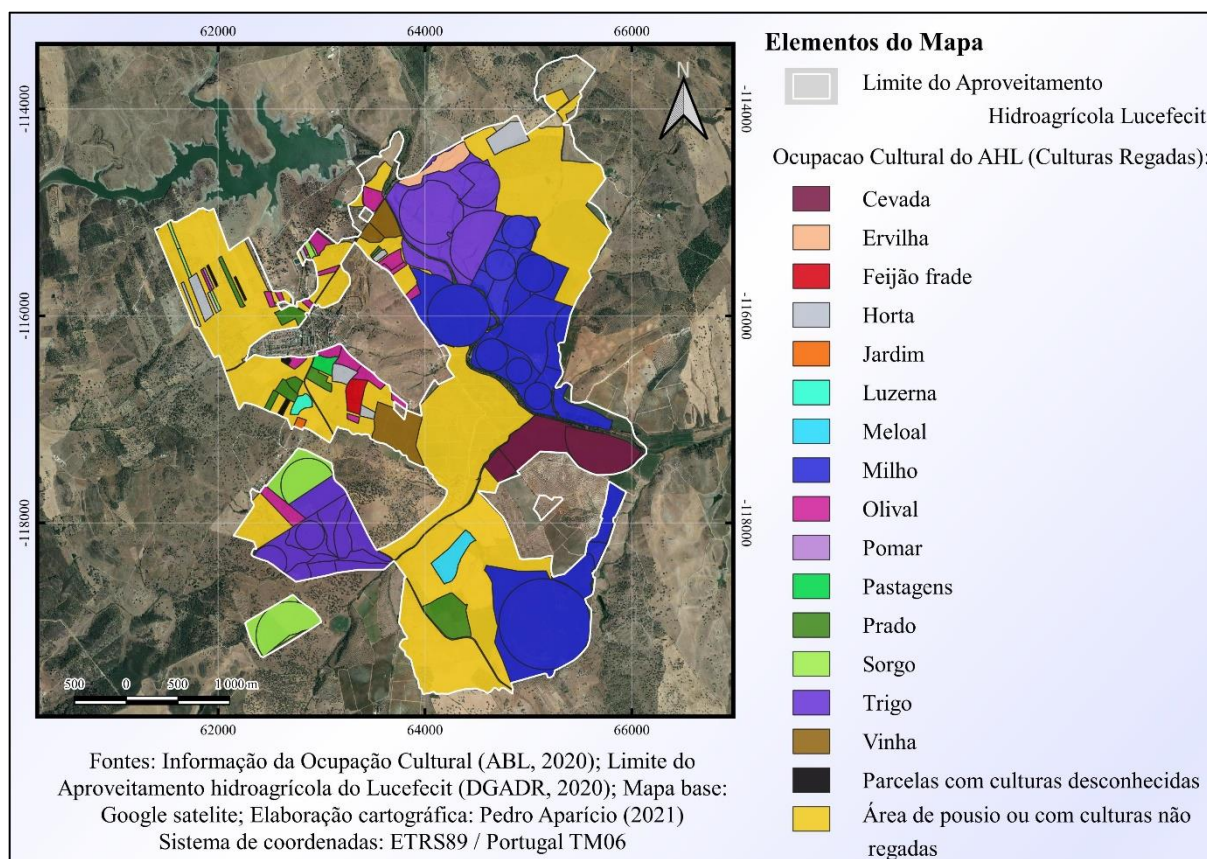


Figura 3.14. Mapa da ocupação cultural do PRL.



### 3.2. Origens dos dados

As imagens de satélite utilizadas foram adquiridas pelo sensor Multiespectral (*MultiSpectral Instrument*) a bordo do satélite Sentinel-2 (A e B), lançado em junho de 2015. As imagens obtidas pelo satélite são de nível 2A, caracterizados por uma dimensão fixada em 100 km x 100 km, georreferenciada no Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) World Geodetic System 1984/*Universal Transverse Mercator* (WGS84/UTM). Incluem uma classificação e correção atmosférica aplicados às imagens do topo da atmosfera de nível 1C, de forma que as refletâncias das imagens do nível 2A fossem corrigidas para “*Bottom Of Atmosphere*” (SUHET, 2015). A descrição do sensor multiespectral utilizado a bordo do satélite Sentinel-2 encontra-se em SUHET (2015).

As imagens utilizadas estão disponíveis no sítio da internet da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), <https://earthengine.google.com/> e constituem a serie temporal correspondente a todo o ano de 2020, compreendendo datas de aquisição de janeiro a dezembro. Destinaram-se a criar mapas com o NDVI, de forma a obter amostras de NDVI para cada cultura, caracterizar o estado vegetativo de cada cultura na sua data de aquisição e, conseqüentemente, obter as datas de início das várias fases de desenvolvimento. Foram utilizadas as bandas do azul, verde e vermelho da região do visível e a banda da região do infravermelho, a infravermelho próximo (NIR).

A informação meteorológica necessária para o estudo foi fornecida pelo COTR. Inclui os dados meteorológicos da década de 2001 a 2021 da estação meteorológica do Redondo, distrito de Évora, concelho do Redondo, com as coordenadas Latitude 38,649800° (38°38'59,28"Norte) / Longitude -7,548007° (7°32'52,82"Oeste) e com uma altitude 300 m. Foram utilizadas as seguintes variáveis meteorológicas: humidade relativa do ar mínima (%) e a velocidade média do vento ( $m s^{-1}$ ), para correção dos valores dos coeficientes culturais ( $K_c$ ) tabelados por Allen *et al.* (1998); a precipitação diária (mm) e evapotranspiração de referência diária (mm), para a estimativa das necessidades hídricas e de rega através do modelo do BH do solo.

A informação relativa aos solos existentes no PRL foi fornecida pela Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural (DGADR), correspondendo à carta de solos de Portugal (CSP), folhas com o número 451 e 452. A CSP foi fornecida em formato vetorial do tipo polígono (*shapefile ESRI®* à escala de 1:25 000) e encontra-se georreferenciada no SRC *Datum* Lisboa, elipsóide de referência internacional (ou *Hayford*), com projeção cartográfica Gauss-Krüger. Cobre uma área de 16x10 km<sup>2</sup> e apresenta as famílias dos solos e respetivas fases

(classificação do SROA - Serviço de Reconhecimento e Desenvolvimento Agrário). Esta informação destinou-se à obtenção das UHA e das características hidráulicas de cada unidade para realizar a simulação do BH do solo.

Foi também utilizada a Carta Administrativa de Portugal, versão de 2020 (CAOP2020), disponibilizada pela DGT (Direção Geral do Território) em formato vetorial do tipo polígono (ficheiro em formato *shapefile*), com uma escala de 1:25 000 e com o Sistema de Coordenada Projetadas, *European Terrestrial Reference System 1989/Portugal*- Transversa de Mercator 2006 (ETRS89/Portugal TM06), contendo informação sobre os limites oficiais dos distritos, concelhos e freguesias, que serviu para localizar o PRL.

Foi fornecida pela ABL informação diversa, que permitiu elaborar camadas em formato vetorial do tipo polígono (*shapefiles*) com a distribuição espacial das parcelas, das culturas e dos sistemas de rega. A ABL forneceu também informação sobre os consumos de água por hidrante e por parcela, o caudal fictício contínuo ( $q_f$ ) de projeto do PRL e camadas vetoriais (*shapefiles*) com localização geoespacial dos limites do perímetro e das diferentes infraestruturas existentes no PRL.

### **3.3. Métodos para tratamento da informação**

#### 3.3.1. Tratamento das camadas base de informação

##### 3.3.1.1. Informação edáfica

Para tratamento da informação edáfica, aplicou-se o método apresentado no Anexo III. Numa primeira fase, foi necessário estruturar e organizar a informação proveniente das camadas originais. A informação, disponibilizada em duas camadas vetoriais (carta de solos nº451 e 452) de modo a coincidir com toda a área do PRL, corresponde às classes de solos (atributo: cod1) que maior expressão têm numa determinada unidade de terreno, área ocupada e seu perímetro e correspondentes metadados. Selecionou-se apenas a informação pertinente (Area, cod1 e Label\_Manc, referindo-se esta última à forma como cada mancha/unidade de solo é constituída juntamente com a sua proporção) e criou-se uma única camada vetorial com a informação dos solos restringida à área do PRL (Mapa de solos PRL).

A camada utilizada para restringir a informação da camada solos foi a camada vetorial do limite do PRL, após correção em virtude de não coincidência com os limites naturais das parcelas (exemplo na Figura 3.15).

A imagem utilizada para efetuar a correção foi obtida do Web Map Services do Google Earth ambiente *Quantum GIS (QGIS)*. Os dados foram tratados de modo a não perder definição dos pixels (escala espacial) quando se diminui a escala de observação, revelando-se uma excelente ferramenta para trabalhar com grande precisão. Neste trabalho, a imagem da Google utilizada corresponde ao ano de 2017 e é automaticamente reprojeta para o SRC do projeto SIG.

Numa segunda fase, foi necessário selecionar e estruturar a informação que seria utilizada para modelar as necessidades de rega do perímetro. Como mostram as Figuras 3.11 e 3.12 é grande a diversidade de classes e mais de 80% da área do perímetro é classificada pelas seguintes quatro classes, com representatividade decrescente: Sr, Px, A, Pc.

Por essa razão, obteve-se, por interpolação, uma nova camada, em que estas quatro classes abrangem a área total do perímetro. O critério utilizado foi o de que os objetos geométricos (polígono vetorial) das classes de menor expressão seriam aglutinados pelos objetos geométricos das classes de maior expressão pela



Figura 3.15. Exemplo da correção do perímetro regado. A linha vermelha corresponde à delimitação original e a linha verde corresponde à correção efetuada.

aproximação da sua localização. Como não foi possível encontrar uma ferramenta digital que fizesse este processo automaticamente, e, pela pequena frequência das classes de menor expressão, foi preciso realizar o procedimento de forma manual, caso a caso.

Assim, criou-se um atributo chamado “Apoio” com o objetivo de colocar em cada objeto geométrico a sua classe respetiva, sem considerar a existência de fases que caracterizam condições específicas de formação dos solos. Um segundo atributo foi criado, denominado “Campo”, com os mesmos valores do atributo anterior, permitindo, assim, alterar manualmente a classificação dos objetos geométricos das classes de menor representação para uma das classes de maior representação, de modo a não perder as sequências de passos.

Na Figura 3.16 encontra-se um enxerto da tabela de atributos da camada Mapa de solos PRL em que é possível observar-se três situações distintas de edição e definição das classes e os dois atributos criados.

Por último, realizou-se uma agregação pelo atributo “Campo” com o objetivo de obter a representação total da distribuição espacial de cada uma das quatro classes representando a área total do PRL.

Solos — Features Total: 93, Filtered: 93, Selected: 0

fid	COD1	Apoio	Campo
1	163 A	A	A
2	257 Sr	Sr	Sr
3	248 A	A	A
4	166 Px(d)	Px	Px
5	608 Sr(p)	Sr	Sr
6	59 Ex	Ex	Px
7	174 Vm	Vm	Px
8	441 Vx(p)	Vx	Px
9	155 Al(j)	Al	A
10	156 Sr(p)	Sr	Sr
11	162 Px(d)	Px	Px

Figura 3.16. Atributos da camada mapa de solos ABL

Na Figura 3.17 encontra-se um exemplo das camadas original e final, obtida pelo método de localização e depois de a informação ter sido agregada, na Figura 3.18 as frequências relativas dos solos com maior representatividade no PRL após o método de aglutinação por localização.

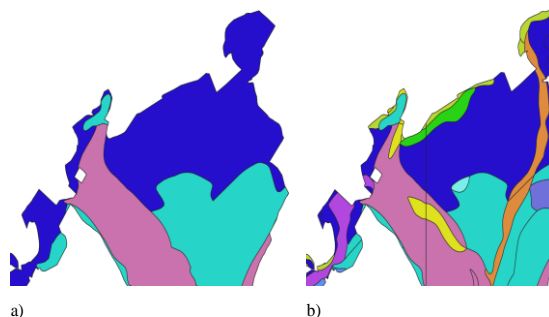


Figura 3.17. Exemplo do resultado quando aplicado o método de aglutinação por localização: a) camada depois da aplicação do método e agregada; b) camada antes da aplicação do método. Verifica-se, por exemplo, que o objeto geométrico com a classe representada a amarelo foi aglutinado ao objeto contínuo da classe representada a rosa, ou que o objeto da classe representada a verde foi aglutinado pela classe representada a azul escuro.

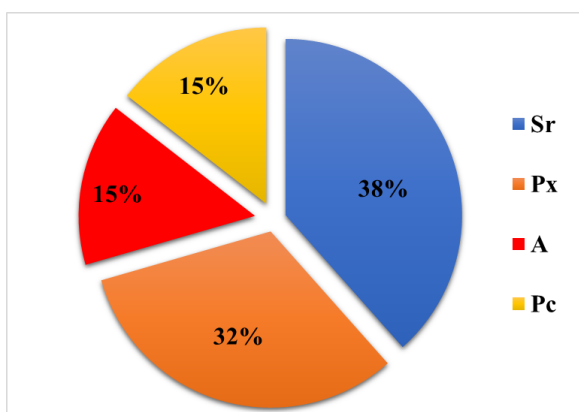


Figura 3.18. Nova frequência relativa da ocupação das famílias de solos presente no PRL

Na Figura 3.19 é apresentado o mapa da distribuição espacial desses solos, que será utilizado como uma camada base de informação.

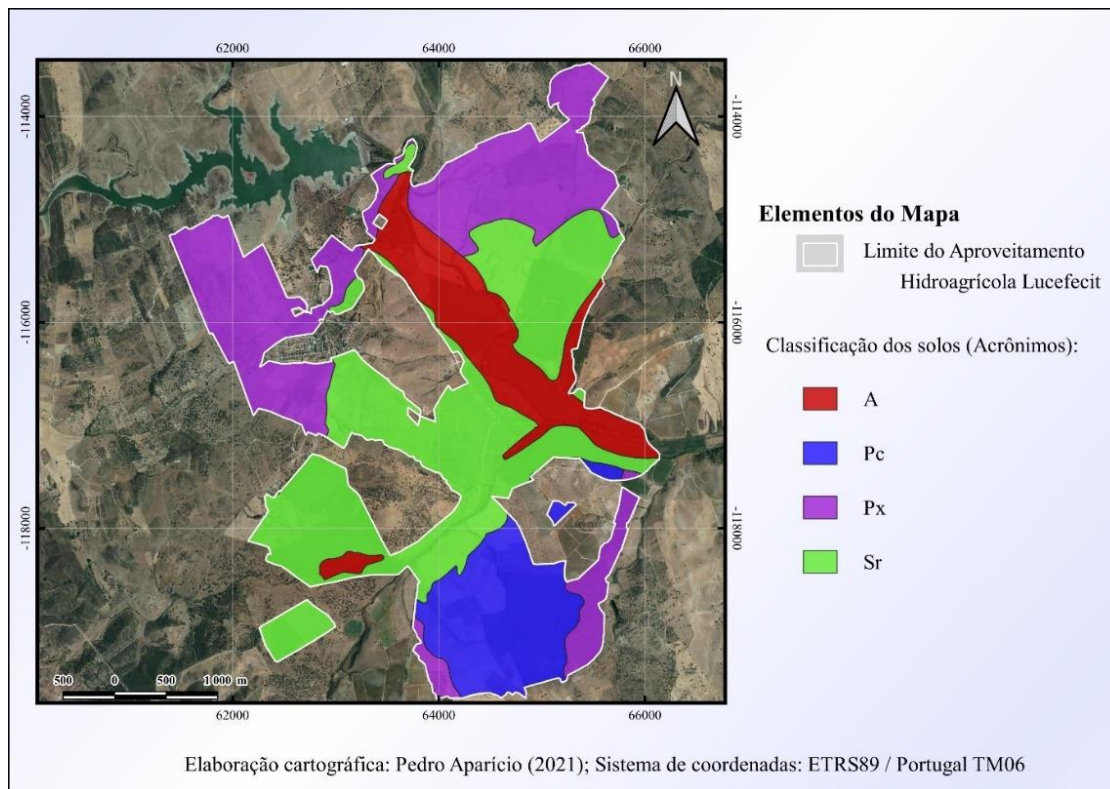


Figura 3.19. Mapa da distribuição espacial das classes de solos utilizadas na modelação.

### 3.3.1.2. Ocupação cultural

Na informação original sobre a ocupação cultural, existem parcelas regadas em que a área instalada reportada à ABL é significativamente menor que a área real da parcela, ou em que os serviços desconhecem a cultura instalada ou, ainda, em que a área da parcela tem uma dimensão muito reduzida (Anexo IV).

Deste modo, seria muito difícil retirar séries temporais de NDVI sem interferências de parcelas vizinhas ou da superfície não ocupada pela cultura (exemplo da Figura 3.20). Então, decidiu-se descartar essas parcelas, que representam 2,61 % da área total do perímetro, na modelação das necessidades de rega globais do PRL.

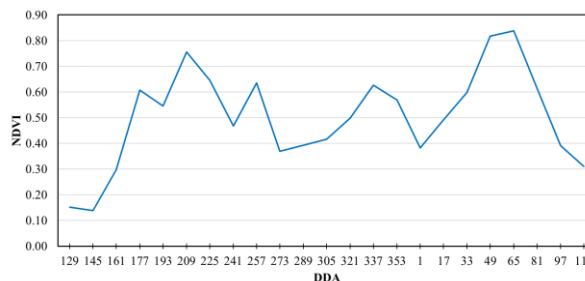


Figura 3.20. Serie temporal de NDVI; exemplo para uma parcela da cultura da Luzerna ( — ).

Outra alteração efetuada aos dados culturais originais, consistiu no agrupamento das culturas que têm ciclos vegetativos semelhantes e que iriam produzir séries temporais de NDVI análogas. Deste modo, reduziu-se o número de modelações sem se introduzir um erro considerável no cálculo das necessidades globais de rega. Assim, optou-se por agrupar as culturas do trigo e cevada na classe de cereais de outono-inverno (O-I) e as culturas de prado e pastagens numa classe designada de “pastagens”.

A Figura 3.21 mostra a frequência relativa da área ocupada por classe de cultura utilizadas na modelação e a frequência relativa da área não regada e das parcelas descartadas. Na Figura 3.22 é apresentado o mapa da distribuição espacial das classes de cultura, da área não regada e da área descartada na modelação

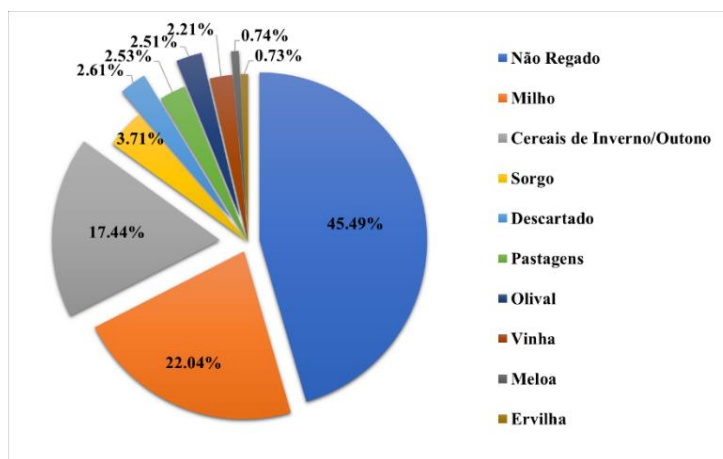


Figura 3.21. Frequência relativa da ocupação das classes culturais no PRL.

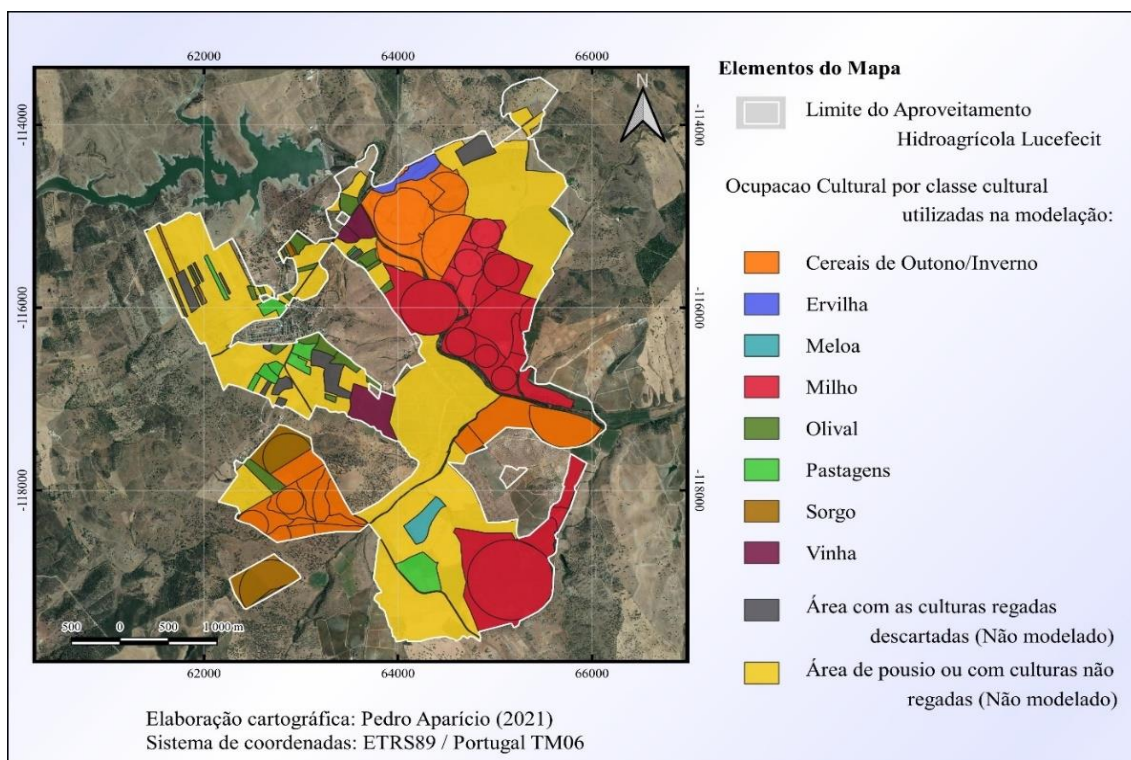


Figura 3.22. Mapa da distribuição espacial das classes de cultura utilizadas na modelação das necessidades de rega.

Posteriormente, a informação para a modelação das necessidades de rega foi estruturada do seguinte modo:

- Numa camada vetorial (“mapa das classes de culturas PRL agregado”) com a informação agregada por classe cultural, que, quando sobreposta à camada vetorial da distribuição absoluta das principais classes de solos, permite definir as UHA cultura-solo utilizadas para modelação das necessidades de rega;
- Em várias camadas vetoriais, consistindo cada uma, nas parcelas (objetos geométricos) correspondentes a cada classe cultural, com o objetivo identificar as parcelas que são mais representativas em termos de área e editá-las de forma a eliminar a influência da superfície que não sejam a superfície da cultura no valor de NDVI de forma a obter-se o padrão de NDVI de cada classe cultural.

Como referido no ponto 3.2. a ABL forneceu informação dos consumos por parcela no ano em estudo (2020), que foi comparada com as NR anuais modeladas por cada classe de cultura. Como essa informação está organizada por parcelas e se desconhecem os consumos registados de algumas parcelas regadas que foram utilizadas na modelação, foi necessário: i) seleccionar todas as parcelas regadas com a mesma classe cultural; ii) realizar o somatório das suas áreas e dos seus consumos, iii) dividir o volume acumulado consumido, pela área total ocupada por essas parcelas regadas de uma mesma classe cultural obtendo-se, assim os consumos de cada classe cultural em milímetros. O resultado é apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Consumos registados nos hidrantes (ABL, 2020) por classe de cultura nas parcelas consideradas neste estudo e nas parcelas descartadas

<b>Classes de cultura</b>	<b>Consumos (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área correspondente (ha)</b>	<b>Consumos (mm)</b>
Cereais O-I	102236	139,0	73,5
Ervilha	2664	8,8	30,3
Meloa	37315	8,9	418,5
Milho	2354655	246,7	954,4
Olival	22359	27,4	81,5
Pastagens	118090	27,6	427,6
Sorgo	229788	43,4	529,3
Vinha	44737	20,3	220,4
<b>Total das parcelas consideradas neste estudo</b>	<b>2911844</b>	<b>522,2</b>	<b>557,6</b>
Parcelas descartadas	24449	31,5	77,7
<b>Total das parcelas com consumos do PRL</b>	<b>2936293</b>	<b>553,7</b>	<b>530,3</b>

### 3.3.2. Unidades homogêneas de análise cultura-solo para modelação

A definição das UHA cultura-solo tem como objetivo definir o número de simulações do BH, visto que as necessidades líquidas de rega (NLR) variam com a cultura, o tipo de solo e as variáveis meteorológicas. Para a obtenção das UHA cultura-solo, utilizou-se o procedimento apresentado no Anexo V.

O procedimento consistiu na sobreposição das camadas (classe cultural e solos) e na aplicação do método de análise espacial intersecção que devolve uma camada vetorial preservando os atributos das duas camadas originais. Neste caso, como a camada do solo (obtida no ponto 3.3.1.1) coincidia com toda a área da camada das culturas (obtida no ponto anterior), obteve-se uma camada com 22 objetos geométricos estando definidos para cada um, uma cultura e uma família de solo.

### 3.3.3. Caracterização dos parâmetros culturais para a modelação

#### 3.3.3.1. Identificação das parcelas mais representativas de cada classe cultural

Esta fase foi executada em ambiente QGIS, tendo sido criado um projeto com SCR ETRS89/PT-TM06, sistema oficial adotado em Portugal para dados georreferenciados.

Foram utilizadas como dados de entrada as camadas vetoriais de objeto geométrico do tipo polígono (formato *.shp*) correspondentes ao parcelamento de cada classe de cultura do PRL obtidas no ponto 3.3.1.2 e as camadas do tipo matriciais (formato *tiff*) definidas com o SCR de projeto (reprojetadas), correspondendo às imagens de satélites mensais para o ano de 2020.

As imagens de satélite foram obtidas a partir das bases de dados da plataforma GEE. Esta plataforma fornece catálogos públicos, de uso grátis, de dados geoespaciais, tais como imagens de satélite de alta-definição, e permitiu a extração e manipulação das imagens segundo o método descrito no Anexo VI, com recurso ao editor de código *JavaScript* de utilização aberta (Anexo VII). O código utilizado está disponível no Anexo VIIIa.

Como se observa no Anexo VI, foi utilizada toda a coleção de imagens do Sentinel-2 (A e B constituída por 10 139 143 imagens obtidas desde o dia 28 março de 2017 a 29 de maio de 2021 e que cobrem todo o globo entre as latitudes 56° Sul e 83° Norte) (GEE, 2021; SUHET, 2015). Uma vez que elevado número de imagens não correspondiam ao local de estudo (PRL) nem ao período de estudo (2020), foi necessário reduzir a coleção utilizando filtros de região e data.



Foram também retiradas as imagens que continham mais de 20% de pixels cobertos por nuvens, ficando, assim, a coleção reduzida a 76 imagens. Aplicou-se uma máscara de nuvens à coleção reduzida, a partir da função *mask clouds*, usando a banda QA do Sentinel-2 facultada no conjunto de dados, com o objetivo da eliminação dos restantes pixels que informavam a presença de nuvens e sombra.

No passo seguinte foi novamente reduzida a coleção, mas desta vez sem perda de informação, de modo a facilitar a exportação e o tratamento dos dados. O processamento utilizado foi baseado no método de composição intra-anual por união e redução para coleção de imagens, apresentado nos guias e tutoriais da plataforma GEE. Utilizou-se uma escala temporal mensal (composição intra-mensal) e utilizou-se a média como função agregadora das imagens, tendo em conta que os valores que se afastam da normalidade são válidos no estudo temporal e não podem ser descartados. O procedimento resultou na criação de uma imagem para cada mês do ano em estudo, na qual cada pixel representa a média de todos pixels correspondentes a todas as imagens previamente filtradas, datadas com o mesmo mês. Assim, foi reduzida a coleção para 12 imagens.

Por fim, antes da extração, realizou-se a cartografia de todas as imagens da coleção com recurso à Equação 2.7. Criou-se uma banda que foi acrescentada aos metadados das imagens, contendo a informação do valor de NDVI para cada pixel de cada imagem da coleção. Desta forma foi possível extrair 12 imagens no SCR WGS84/UTM contendo todas as bandas espectrais originais, mais uma banda adicional correspondente ao NDVI

Para a construção das parcelas de amostragem, procedeu-se à sobreposição de cada camada construída para cada classe cultural, sobre cada uma das camadas matriciais representadas pelas imagens de satélite obtidas, alternando os parâmetros de visualização entre a banda NDVI e a cor verdadeira, de modo a confirmar a correta correspondência entre os objetos geométricos das camadas de cada cultura com os padrões correspondentes de NDVI nas imagens de satélite. Os parâmetros de visualização para as imagens de NDVI foram definidos com o tipo banda única de cor falsa para a banda do NDVI, permitindo interpolar linearmente os valores de NDVI com uma escala de cores. Deste modo, quando um valor de pixel é pequeno é representado por uma cor avermelhada indicando um valor de NDVI baixo, ou seja, pouco ou nenhum vigor vegetativo. Por outro lado, quando o valor do pixel é grande é representado por uma cor verde, indicando um valor de NDVI alto, ou seja, representando uma cobertura vegetal com grande

vigor vegetativo, sendo os valores intermédios representados entre a cor laranja e amarela. Foram estabelecidos os seguintes critérios hierarquizados para definir os padrões de NDVI (Figura 3.23) para analisar o processo de validação da informação cultural:

- Padrões com valores altos de NDVI nos meses mais secos são indicativos da presença de culturas regadas;
- Padrões de NDVI constantes, ou com pouca variação ao longo do ano, são indicativos de culturas perenes ou de pastagens permanentes regadas;
- Padrões de NDVI com valores altos numa certa altura do ano e onde é possível identificar um aumento gradual desse valor no início do desenvolvimento da cultura e o oposto no final do ciclo da cultura são indicativos de culturas anuais.

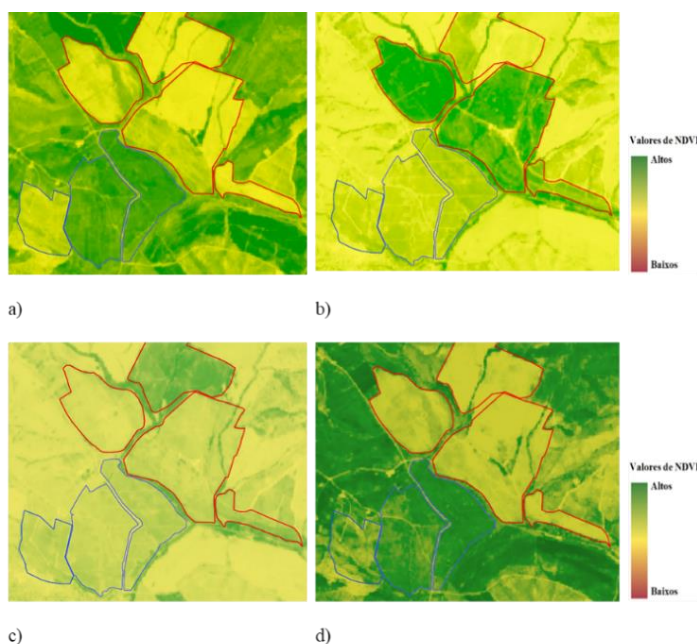


Figura 3.23. Exemplo da evolução ao longo do ano de 2020 dos padrões de NDVI das culturas a partir das imagens de satélite. A linha azul delimita as áreas de culturas perenes e a linha vermelha as áreas de culturas anuais. As imagens correspondem aos meses de fevereiro (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d).

Por exemplo, para as parcelas da cultura do milho nesta região é esperado, para o mês abril, que os valores de NDVI sejam muito baixos (cor amarelada) devido à preparação do terreno e à sementeira. Por outro lado, espera-se que, nos meses de maio e junho, se observe uma evolução do NDVI (cor verde claro para cor verde escuro), correspondendo ao período de desenvolvimento da cultura e que, nos meses de julho e agosto, se observem os valores mais altos de NDVI, correspondentes ao desenvolvimento máximo da cultura. Finalmente, no mês de setembro e outubro, devem voltar a existir valores baixos de NDVI devido à senescência e à colheita da cultura

- Tanto para as culturas anuais como para as perenes, a comparação entre valores de NDVI na fase de desenvolvimento máximo da cultura indica diferenças na densidade da superfície vegetal, reduzindo o valor de NDVI devido à sensibilidade que este tem ao solo nu. Isto permite confirmar, no caso de culturas perenes, a presença de um sistema intensivo ou

extensivo ou de uma pastagem regada e, no caso das culturas anuais, distinguir entre uma cultura com um compasso mais ou menos afastado, como é o caso, por exemplo, de uma parcela de milho e de uma parcela com uma cultura hortícola no sistema de condução com camalhões;

- No caso particular das culturas cerealíferas de outono/inverno, o critério adotado foi o de encontrar áreas com padrões de NDVI muito baixo em alturas do ano que corresponderiam à sementeira do cereal (outubro/novembro). Nestas, são esperados padrões com o NDVI alto devido à presença de vegetação natural e padrões de NDVI também baixos em alturas do ano que corresponderiam à colheita (março/abril). Neste caso, essas áreas não poderiam coincidir com áreas em que se iria semear ou plantar culturas de verão porque a colheita do cereal ocorre numa altura posterior à da instalação das culturas de verão.

Por último, a partir de ferramentas de edição vetorial ajustaram-se os limites ou subdividiram-se as parcelas de cada classe cultural, de modo a evitar a contaminação do índice NDVI pela presença de outras superfícies que não a superfície da cultura, tais como a de estradas, linhas de água, solo nu na cabeceira e/ou manchas de outras culturas ou de vegetação natural (Figura 3.24).

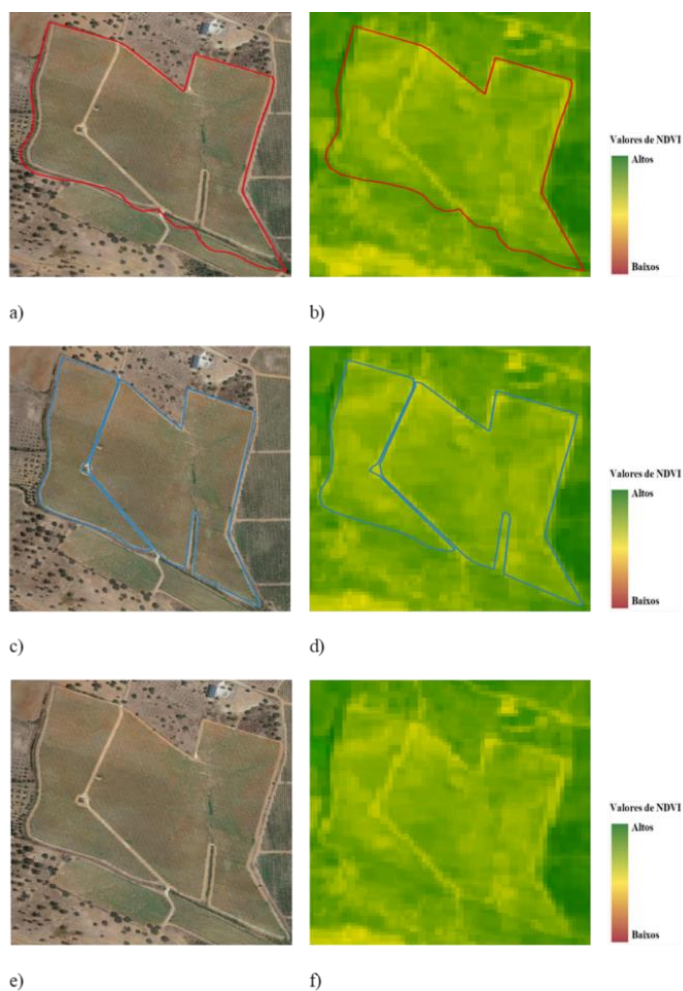


Figura 3.24. Exemplo do ajuste realizado na obtenção das parcelas de amostra do NDVI para a cultura da vinha. A linha vermelha corresponde ao limite da parcela dos dados originais e a linha azul aos limites das parcelas de amostra do NDVI. As imagens a), c) e e) pertencem ao Google e as imagens b), d) e f) às imagens de satélite obtidas com o parâmetro de visualização com a banda NDVI para o mês maio.

### 3.3.3.2. Obtenção das séries temporais de NDVI

O tratamento e o formato da informação proveniente das imagens de satélite para a construção das curvas dos Kc são diferentes das imagens obtidas para selecionar as parcelas representativas para obter o padrão de NDVI para cada classe cultural. É pretendida a obtenção do valor médio do índice NDVI para cada parcela (polígono) de cada classe cultura criando-se uma serie temporal, permitindo apresentar os dados em gráfico, caracterizando o comportamento do NDVI ao longo do ano e identificando as datas iniciais, bem como a duração das diferentes fases fenológicas para cada classe cultura (inicial, desenvolvimento, médio e final) para posteriormente estimar os valores de Kc para cada uma das fases a partir de fórmulas empíricas que relacionam o NDVI e o Kc , ou adotando os valores presentes na publicação de Allen *et al.* (1998) ou noutra fonte bibliográfica.

A informação foi obtida individualmente para cada classe cultural, a partir das bases de dados da plataforma GEE com um método semelhante à apresentada no ponto 3.3.3.2., mas com diferença nos dados de entrada relativos à região, no método de compilação da composição, no objetivo final e no formato de saída dos dados (Anexo VI). No Anexo VIIIb está disponível o código utilizado.

Os dados de entrada importados para a plataforma GEE para definir a região de estudo foram as camadas vetoriais em formato *shapefile* construídas no ponto 3.3.1.2 relativas ao limite das parcelas representativas selecionadas para todas as classes culturais em estudo.

O método de composição utilizado para produzir as series temporais de NDVI foi o método de composição inter-anual por filtragem e redução, conforme descrito nos guias e tutoriais do GEE. Este consistiu na redução da coleção das imagens do Sentinel-2 (A e B), depois de ter sido realizada uma filtragem semelhante à descrita no ponto 3.3.2.3, desta vez para a obtenção de uma coleção com 23 imagens, cada uma caracterizada pela média de todas as imagens existentes em cada conjunto de 16 dias do ano de 2020. Organizou-se a informação deste modo para não tonar o processamento e posterior tratamento dos dados muito pesado, sem que com isto viesse a perder-se informação importante, e caracterizar a evolução do NDVI para cada cultura ao longo do ano em estudo. Fixou-se o período de 16 dias do ano (DDA) por ter a duração mínima possível com maior número de imagens (não existindo imagens disponíveis no período correspondente entre 21 de março e 05 de abril de 2020 e entre 15 a 30 de outubro de 2020).

A plataforma GEE permite obter dados no formato pretendido para esta fase do estudo mediante a construção de gráficos na própria plataforma e extração da sua tabela de valores. Aqui, definiu-se o parâmetro da variável de interesse e o objetivo deste ponto, por meio da escolha da mediana como fator aglutinador dos valores de NDVI em cada parcela, uma vez que a mediana comparada com a média não é influenciada por valores muito distantes da tendência central e assim alcança-se um valor de NDVI para cada parcela que melhor descreve um valor real.

### 3.3.3.3. Estimação dos valores e determinação das curvas de Coeficiente Cultural simples

Após a extração dos ficheiros obtidos no ponto anterior, em formato de tabela, os mesmos foram introduzidos no programa Microsoft *Excel*. Preencheram-se os valores em falta (resultado da falta de imagens num conjunto de 16 dias para algumas parcelas, mas que existiram para as restantes parcelas de uma mesma classe cultural) para garantir dados temporalmente contínuos. Esse preenchimento foi efetuado por meio de uma interpolação linear no tempo, considerando a imagem média do período anterior com a imagem média do período seguinte.

Assim, foi possível contruir os gráficos representando o comportamento da curva de NDVI para cada parcela de cada cultura ao longo do ano, permitindo comparar as curvas entre si.

Por fim, procedeu-se à determinação das datas iniciais e finais de cada fase fenológica para cada classe cultural e ao cálculo das suas durações em dias. Este processo foi realizado a partir da análise da curva da serie temporal do NDVI para uma parcela média de cada classe cultural, representando a média de todos os valores de NDVI de cada parcela para o mesmo conjunto de 16 dias. Desta forma, foi possível registar as datas que marcam a transição entre os diferentes períodos fenológicos.

Depois de definidas as datas e a duração das fases fenológicas, foi necessário definir os valores de Kc para cada uma das fases. Para isto, converteram-se os valores de NDVI obtidos para cada classe cultural, a partir das equações empíricas mais utilizadas na bibliografia e apresentadas no Quadro 3.2, com o objetivo de comparar e validar os seus valores a partir dos valores de Kc tabelados na publicação de Allen *et al.* (1998) e de maneira a decidir qual a relação empírica que melhor se adequava a cada cultura.

Para os valores de Kc obtidos a partir da publicação de Allen *et al.* (1998) foi necessário efetuar um ajustamento para o clima da área em estudo, como referido no ponto 2.2.1.2. da revisão

bibliográfica). No Anexo XI é apresentado um quadro com as equações e os critérios para esse ajustamento.

Quadro 3.2. Relação entre NDVI e Kc apresentados em estudos de referência (adaptado de Toureiro *et al.*, 2017)

<b>Relação</b>	<b>Referência</b>
$K_c = 1,15 \text{ NDVI} + 0,17$	González-Piqueras (2006)
$K_c = 1,25 \text{ NDVI} + 0,2$	Calera-Belmonte <i>et al.</i> (2005)
$K_c = 0,918 \text{ NDVI} + 0,303$	Toureiro <i>et al.</i> (2017)

No caso particular da cultura do olival, foi necessário comparar os valores de Kc obtidos a partir das equações apresentadas no Quadro 3.2 com os valores obtidos e publicados por Pastor & Orgaz (1994) (retirados de Rojas *et al.*, 1996), uma vez que o comportamento de uma curva típica de Kc para o olival num clima árido ou semiárido é significativamente diferente da de um clima húmido ou sub-húmido devido ao mecanismo de fecho dos estomas que a oliveira apresenta nos meses mais secos de forma a reduzir a transpiração e, consequentemente, a atividade fotossintética. Os valores de Kc publicados por Pastor & Orgaz (1994), apresentados no Quadro 3.3, correspondem aos valores de Kc para cada mês do ciclo anual do olival que foram obtidos para um olival de 15 anos de variedade picual em que a percentagem de cobertura do solo era superior a 60%, tendo sido necessário adaptar esses valores a uma escala temporal a cada 16 dias e ajustar os seus valores com um coeficiente de redução do Kc a partir da fração de cobertura do solo ( $K_r$ ) obtido a partir da Figura 3.25. Não tendo sido possível obter uma percentagem de cobertura média de todas as parcelas de olival a partir de métodos remotos, foi necessário repetir as simulações do ISAREG, alterando os valores de Kc ajustados pelo coeficiente  $K_r$  até encontrar uma combinação que obtivesse valores das NR anuais aproximados ao consumo fornecido pela ABL.

Quadro 3.3. Valores de Kc para o olival apresentados por Pastor & Orgaz (1994) (retirados de Rojas *et al.*, 1996)

<b>Meses</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
<b>Kc</b>	0,5	0,5	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,45	0,55	0,6	0,65	0,5

Por último, foram criados gráficos para todas as culturas com as series temporais dos  $K_c$  calculados e com os  $K_c$  obtidos na bibliografia de forma a facilitar a análise e futura escolha. Para a serie temporal do  $K_c$  obtido a partir da publicação de Allen *et al.* (1998) os valores em falta, correspondentes à fase de desenvolvimento e senescência, foram calculados por meio de uma interpolação linear.

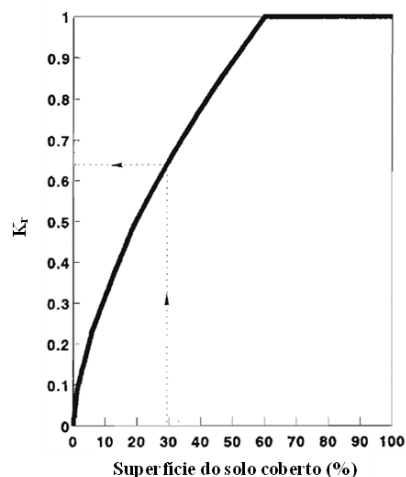


Figura 3.25. Valores de  $K_r$  de acordo com a percentagem da cobertura do solo (Rojas *et al.*, 1996).

#### 3.3.4. Modelação das necessidades de rega líquidas anuais e de ponta

Para a modelação das NLR anuais e de ponta foi utilizado o modelo ISAREG, seguindo o esquema apresentado na Figura 2.3.

Este procedimento consistiu na introdução de três níveis de informação de base - meteorológicas, agronómica e características da rega - cada um deles com a informação em formato de ficheiros ASCII (tipo ou extensão .txt).

Os dados meteorológicos foram divididos em dois ficheiros, um para os valores diários (mm/dia) de evapotranspiração de referência, com o código “\_ET0”, e outro com os valores diários (mm/dia) de precipitação para o ano em estudo, com o código “\_PRE”.

Os dados agronómicos foram compilados em ficheiros individuais de definição das características de cada cultura (parâmetros culturais, com o código “\_CUL” em todos ficheiros culturais) e para cada tipo de solos (parâmetros pedológicos, com o código “\_SOL”, em todos os ficheiros de solos).

Nos parâmetros culturais foi contruído para cada classe cultural um ficheiro contendo: 1) a data de sementeira, as fases do ciclo vegetativo, os dias após a sementeira para o início de cada fase do ciclo vegetativo e o coeficiente cultural, obtidos no ponto 3.3.3.3; 2) a profundidade do sistema radicular para cada fase do ciclo vegetativo, em que os valores da profundidade máxima das raízes foram retirados em Allen *et al.* (1998), correspondendo, no caso das culturas perenes,

a todas as fases do ciclo, e para as culturas anuais à profundidade nas fases média, senescência e final, sendo que para a fase inicial foi definido um valor entre 0,05 a 0,1 m que coincide com as profundidade da sementeira normalmente utilizadas para estas culturas e para a fase de desenvolvimento o valor foi obtido por regressão lineal entre o valor na fase inicial e o valor na fase média e estabelecido o valor correspondente ao dia do início da fase de desenvolvimento; 3) a fração facilmente utilizável, que corresponde ao défice permissível de água no solo ( $p$ ) foi retirada de Allen *et al.* (1998).

Para cada tipo de solo, foi construído um ficheiro contendo o número, a profundidade ( $Z$ , m) e os valores do teor de água no solo à capacidade de campo ( $\theta_{v\ CC}$ , %) e do coeficiente de emurchecimento ( $\theta_{v\ CE}$ , %) permanente, expressos em percentagem de volume para cada camada de solo, sendo que, no caso desta dissertação, não se justifica considerar as diferentes camadas de cada solo, considerando-se, assim, as características médias do perfil. Estes dados foram retirados de Cardoso (1965) e Rawls *et al.* (1982).

No Quadro 3.4 estão apresentados os dados médios do perfil recolhidos do  $\theta_{v\ CC}$ , do valor da profundidade do perfil e do  $\theta_{v\ CE}$ , para cada classe de solo utilizada na modelação.

Quadro 3.4. Características dos solos presentes no PRL, obtidas e utilizadas na modelação, em que  $Z$  significa a profundidade do perfil e  $\theta_v$  o teor volumétrico de água no solo à capacidade de campo (CC) e na capacidade de emurchecimento (CE).

Classe de Solo	Z (m)	$\theta_{v\ CC}$ (%)	$\theta_{v\ CE}$ (%)
<b>Pc</b>	1	24,94	9,55
<b>A</b>	1,3	21,5	11,05
<b>Px</b>	0,6	32,59	11,21
<b>Sr</b>	0,75	16,79	6,07

Quanto aos dados das características de rega, foi necessário fornecer ao programa a informação do momento em que se devia efetuar a rega e do seu volume, tendo em atenção a possível existência de restrições de água e considerando a hipótese de se verificar ascensão capilar.

Como o objetivo principal desta dissertação é estimar as NGR de todo o PRL e não foram consideradas as restrições de água para a rega ou a calendarização e volume de rega dos regantes associados à ABL. Foi necessário definir ficheiros de esquema de rega (cada um com o código “\_ESQ”) com o objetivo de calcular as NGR para cada cultura. Para as classes culturais que visam a máxima produção, como é, por exemplo o caso do milho, foi selecionado o esquema de rega do modelo ISAREG, “Necessidades globais de rega” que calcula as necessidades

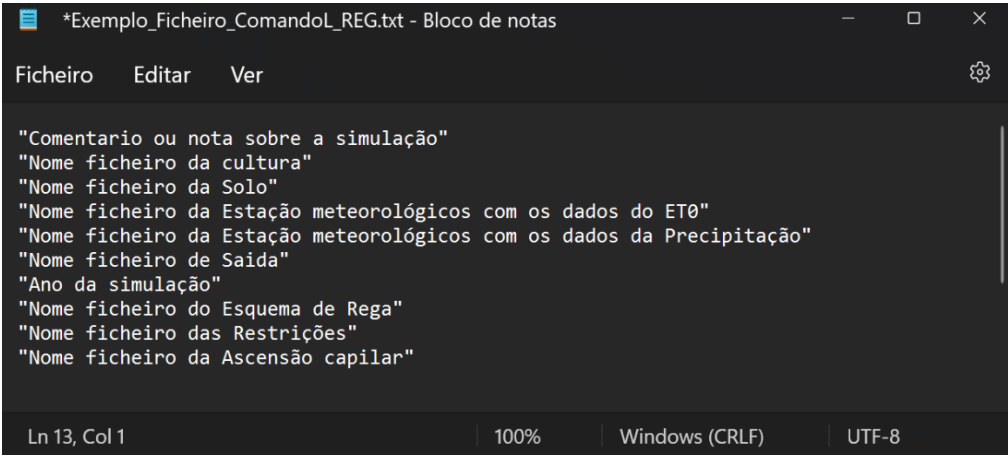


teóricas de rega de uma cultura independentemente da forma como a água é fornecida, ou seja, calcular as NR anuais de cada cultura de modo a garantir a disponibilidade de água no solo necessária para que a planta se mantenha em condições ótimas de desenvolvimento. Deste modo, para este esquema de rega o programa solicita apenas informação sobre as condições iniciais de água no solo.

Contudo, para as classes de cultura onde é normalmente utilizada a rega deficitária ou que na sua serie temporal média de NDVI indicava a existência de stress hídrico, foi necessário obter esquemas de rega por meio de um método iterativo, com o objetivo de encontrar o melhor ajustamento do BH do solo ao stress hídrico indicado pelas séries temporais do NDVI para as diversas culturas. Para que isto fosse possível, foi necessário alterar o tipo de esquema de rega de forma a, ao invés de se obterem as NLR anuais independentemente do modo como a água é fornecida à cultura, simular as NLR anuais de rega fixando a oportunidade e a quantidade da rega. A diferença em relação ao esquema de rega anteriormente referido é que, desta forma, não só se define a condição inicial do solo, ou seja, o nível de preenchimento da reserva útil (RU, %) do solo, como também é necessário definir o nº de dias em que se termina a rega antes da colheita, a oportunidade de rega (o momento em que a rega deverá ser desencadeada, ou seja, o coeficiente de stress que é a relação entre a evapotranspiração de referencia e a cultural), e a quantidade de rega a aplicar (o momento em que se termina a rega). Assim, foi necessário repetir as simulações do modelo do BH, a partir do modelo do ISAREG, alterando os níveis de stress para o início da rega e da percentagem da RU para o término da rega, até encontrar uma combinação que obtivesse valores das NR anuais aproximados ao consumo fornecido pela ABL, tendo como objetivo ajustar o BH do solo ao stress hídrico analisado pelas séries temporais do NDVI para as diversas culturas.

A modelação da rega no ISAREG pode ser realizada a partir da seleção individual dos ficheiros anteriormente definidos dentro do próprio programa ou a partir de um ficheiro de comando. Neste caso a opção utilizada foi a partir de um ficheiro de comando (.txt) (Figura 3.26) que é um ficheiro que se destina a armazenar os nomes dos ficheiros de dados necessários para executar o programa, permitindo repetir a simulação de forma automatizada sem ser necessária a sua seleção manualmente dentro do programa, bastando alterar o nome do ficheiros no ficheiro de comando, desde que estes ficheiros se encontrem na mesma localização e pedir ao programa para o correr e assim simular a rega automaticamente.

O programa fornece os resultados em ficheiros de formato “.txt” que tiveram de ser importados em ambiente Excel de forma a fazer corresponder a cada UHA cultura-solo a sua necessidade líquida para todo o ciclo, bem como para o período de ponta (mês de julho), de modo a criar uma tabela que, quando guardada em formato “.txt”, possibilitou a introdução no programa Qgis e, assim, a união desta informação a cada objeto geométrico (UHA cultura-solo).



```
*Exemplo_Ficheiro_ComandoL_REG.txt - Bloco de notas
Ficheiro  Editar  Ver

"Comentario ou nota sobre a simulacão"
"Nome ficheiro da cultura"
"Nome ficheiro da Solo"
"Nome ficheiro da Estacão meteorológicos com os dados do ET0"
"Nome ficheiro da Estacão meteorológicos com os dados da Precipitacão"
"Nome ficheiro de Saida"
"Ano da simulacão"
"Nome ficheiro do Esquema de Rega"
"Nome ficheiro das Restricões"
"Nome ficheiro da Ascensão capilar"

Ln 13, Col 1    100%    Windows (CRLF)    UTF-8
```

Figura 3.26. Exemplo de um ficheiro de comando.

Para confirmar os valores obtidos, foi efetuada para cada UHA cultura-solo uma simulacão, aplicando o processamento anteriormente referido para 20 anos, entre 2001 e 2020, de modo a obter o valor médio da NLR. Confrontaram-se ainda os valores obtidos das NR para o ano de 2020 com os dados climáticos médios mensais do mesmo ano de modo a verificar e justificar valores atípicos.

### 3.3.5. Mapa das necessidades de rega por parcela

Para obter as NGR anuais e de ponta para o PRL, foi necessário calcular as NR anuais e de ponta de cada parcela, compostas por diferentes UHA. Para tal, foi necessário calcular as NLR anuais e de ponta de cada parcela (objeto geométrico) que correspondem à média ponderada das NLR anuais e de ponta das UHA cultura-solo, obtidas no ponto anterior. O procedimento dos dados para obter as NLR, NR e NGR anuais é o mesmo para obter as de ponta (referente ao mês de julho) por isso apenas se apresentam-se para as primeiras.

Como é possível observar-se pelo Anexo IX, todo o procedimento realizado em ambiente Qgis e, numa primeira fase, foi necessário organizar a informação geográfica de forma a obter uma camada de informação contendo, para cada parcela agrícola do mapa da ocupação cultural do PRL (camada “Mapa das classes culturais PRL”), a informação das diferentes classes de solos

obtidas no ponto 3.3.1.1. Isto permitiu fazer a correspondência entre os valores obtidos pela simulação das NLR das UHA cultura-solo e cada objeto geométrico da nova camada vetorial (camada: “UHA cultura-solo”). De seguida, foi necessário exportar essa camada vetorial para outra camada, de modo a não perder a informação proveniente da união realizada e mantendo cada objeto geométrico a representar uma cultura e uma classe de solo. Por outras palavras, quando numa parcela existia mais do que uma classe de solo, no campo que a identifica (“Id\_Parcela\_Modelar”) o seu valor foi considerado o mesmo, possibilitando calcular para cada parcela a proporção de cada classe de solo a partir de um novo atributo, “Representação\_AreaTotal”, criado pela ferramenta calculadora de atributos no Qgis, pelo qual se dividiu a área da UHA (atributo: “Area\_UHA (ha)”) pela área total da parcela (atributo: “Área\_Parcela (ha)”), obtendo-se, deste modo, quando multiplicado pela NLR da respetiva UHA, a NLR daquela UHA para uma parcela específica. Como a informação obtida se referia a cada UHA e o objetivo era calcular as NLR por parcela, foi necessário criar um outro atributo fazendo coincidir o valor da necessidade líquida de cada parcela ao valor de cada um dos seus objetos geométricos. Este processo foi realizado na ferramenta “calculadora de atributos” do Qgis, que permitiu somar os valores da NLR de cada UHA quando pertencem à mesma parcela, ou seja, quando o valor no atributo “Id\_Parcela\_Modelar” é o mesmo, e, assim, através da ferramenta vetorial “agregar”, obter uma nova camada (“Mapa das necessidades líquidas de rega 2020”) com a informação das NLR em milímetros por parcela.

A segunda fase teve como objetivo calcular a NR para cada parcela, unindo-se, para isso, à camada anteriormente criada uma camada de texto, do tipo tabela de atributos, contendo a informação das eficiências médias dos diferentes tipos de sistemas de rega, obtidos pela média dos valores presentes em Pereira (2004), apresentados no Quadro 2.1. Como ocorreu na primeira fase, foi necessário exportar essa camada vetorial para outra camada (“Mapa das necessidades de rega final 2020”) de forma a guardar a informação, permitindo, a partir da ferramenta calculadora de atributos do QGIS criar um campo onde foram calculadas as NR em milímetros a partir das NLR (mm) a dividir pela eficiência de rega respetiva em fração.

Por último, foram utilizados vários processos e criadas algumas camadas intermédias, com o objetivo de organizar a informação, tal como os processos que foram utilizados para eliminar informação não pertinente ou alterar a nomenclatura da mesma ou ainda na criação de novos atributos que permitiram organizar a informação de modo a permitir novos processos.

### 3.3.6. Necessidades globais de rega e caudal fictício

Para obtenção dos valores das NGR por classe cultural e para todo o PRL exportou-se a camada das NR (anuais e do período de ponta) por parcela, obtidas no ponto anterior, e importou-se para Excel de modo a facilitar o tratamento e a organização da informação.

A partir de tabelas dinâmicas foi possível somar as NR, em metros cúbicos, por cultura, e converter esses valores em milímetros (a partir da mesma equação apresentada no diagrama no Anexo IX quando se converteu as NR de metros cúbicos para milímetros por parcela) utilizando a área correspondente de cada classe cultural. As NGR do perímetro, foram obtidas pelo somatório das NR correspondentes em metros cúbicos e convertidos em milímetros, utilizando a mesma equação referida anteriormente, desta vez com a área total do PRL, exceto para o período de ponta, no qual se retiraram as áreas das classes culturais em que os seus ciclos não coincidem com o mês de maior consumo, que é normalmente considerado ao nível do projeto de rega, para a região de estudo, o mês de julho.

Aproveitou-se a informação sobre o  $q_f$  utilizado no dimensionamento do PRL, calculado em 1989 pela empresa Prosistemas ( $0,84 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ), e dos consumos por classe de cultura, fornecida pela ABL, para avaliar a evolução do padrão de utilização da água e a adequação do dimensionamento para a realidade atual, inclusive na adaptação às alterações climáticas.

Para tal foi necessário ainda obter a informação sobre o  $q_f$  de ponta para o período de 2001 a 2020 considerando apenas as classes culturais da época de primavera verão correspondente ao ano em estudo e para um ano com uma probabilidade de não excedência de 81% (equivalendo a um período de retorno de 5,3 anos). Estes dados foram retirados dos ficheiros simulados das NRL para cada UHA cultura-solo para uma serie temporal de 20 anos em  $\text{L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , nos quais se realiza a análise de frequência das séries das necessidades anuais e do  $q_f$ , tendo sido processados de forma semelhante ao apresentado para o cálculo das NRG de ponta por classe cultural e para todo o PRL.

## 4. Análise e discussão de resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados intermédios que alimentaram o balanço hídrico do solo (BH) por meio da utilização do modelo ISAREG e que incluem as unidades homogêneas de análise (UHA) cultura-solo e as camadas de informação com parâmetros culturais, pedológicos e relativos aos sistemas de rega. Apresentam-se seguidamente os resultados obtidos para responder aos objetivos da dissertação, que são as necessidades de rega (NR) por cultura e as necessidades globais de rega (NGR) do Perímetro de Rega do Lucefecit (PRL).

### 4.1. Unidades homogêneas de análise

São apresentadas no Quadro 4.1 as UHA obtidas seguindo o método apresentada no ponto 3.3.2 e na Figura 4.1 a sua distribuição espacial na área em estudo.

Quadro 4.1. UHA obtidas para modelação

UHA		Área		UHA		Área	
Nº	cultura-solo	ha	% área total	Nº	cultura-solo	ha	% área total
1	<b>Cereais *-A</b>	42,0	6,7%	12	<b>Milho-A</b>	85,834	13,7%
2	<b>Cereais *-Pc</b>	4,1	0,7%	13	<b>Milho-Pc</b>	61,39	9,8%
3	<b>Cereais *-Px</b>	54,2	8,6%	14	<b>Milho-Px</b>	41,3	6,6%
4	<b>Cereais *-Sr</b>	110,2	17,6%	15	<b>Milho-Sr</b>	77,7	12,4%
5	<b>Ervilha-Px</b>	8,8	1,4%	16	<b>Vinha-A</b>	9,0	1,4%
6	<b>Pastagens-A</b>	0,4	0,1%	17	<b>Vinha -Sr</b>	17,7	2,8%
7	<b>Pastagens-Pc</b>	13,1	2,1%	18	<b>Sorgo-Px</b>	3,5	0,6%
8	<b>Pastagens-Px</b>	12,9	2,1%	19	<b>Sorgo-Sr</b>	41,4	6,6%
9	<b>Pastagens-Sr</b>	4,182	0,7%	20	<b>Olival-A</b>	6,8	1,1%
10	<b>Meloa-Pc</b>	5,3	0,8%	21	<b>Olival-Px</b>	8,4	1,3%
11	<b>Meloa-Sr</b>	3,6	0,6%	22	<b>Olival-Sr</b>	15,1	2,4%

\*As classes de cereais correspondem as classes de cereais outono-inverno

Foram efetuadas inicialmente 22 simulações do BH, uma para cada UHA. As combinações cultura-solo com maior expressão no PRL são cereais outono-inverno-Sr (solos argiluvitados pouco insaturados, mediterrânicos vermelhos ou amarelos de materiais não calcários) com 17,6% da área total; milho-A (solos incipientes de textura mediana) com 13,7% da área total e milho-Sr com 12,4% da área total.

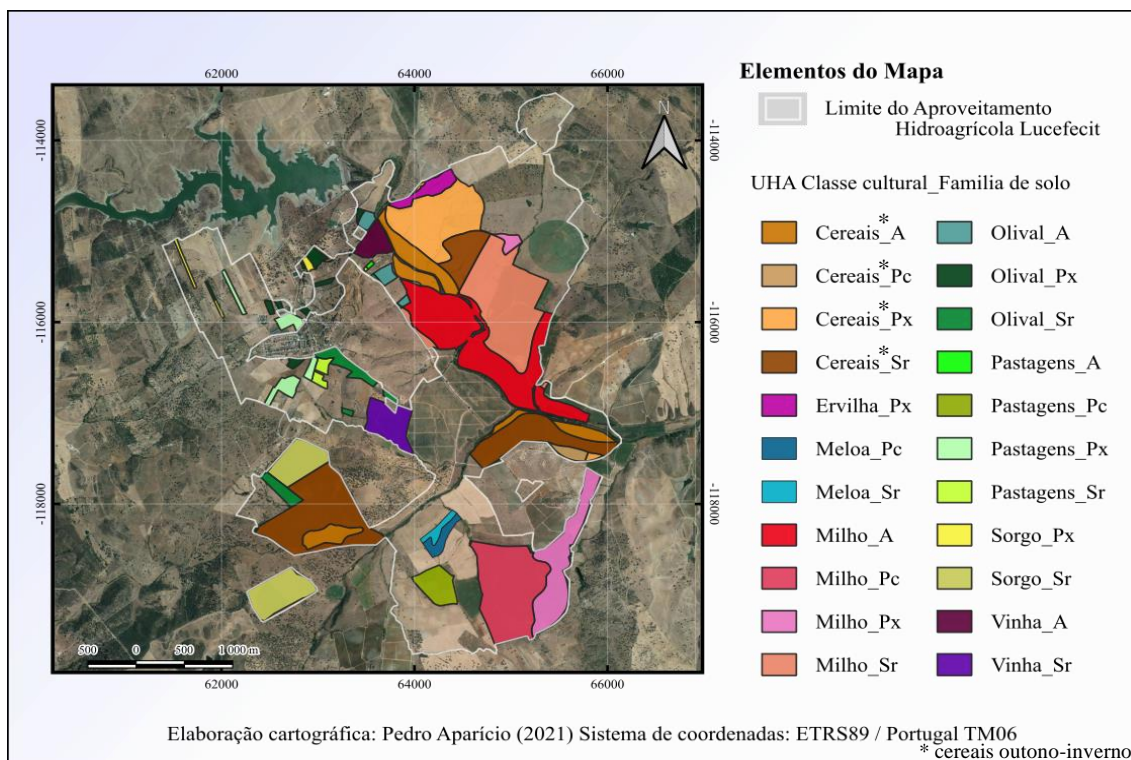


Figura 4.1. Mapa da distribuição espacial das Unidades Homogêneas de Análise (UHA) cultura-solo.

## 4.2. Caracterização fenológica das culturas

### 4.2.1. Determinação das parcelas médias e das curvas de Kc

Na Figura 4.2 são apresentados os perfis temporais do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) ao longo do ano, para cada parcela de cada classe cultural e o comportamento médio do NDVI (perfil temporal médio) de cada uma das classes, exceto para a classe da ervilha, uma vez que esta ocupa apenas uma parcela. Na Figura 4.3 são comparados, para cada cultura, os perfis temporais médios e as curvas de Kc obtidas adotando o método descrito em Allen *et al.* (1998).

É possível constatar-se pela Figura 4.2 a importância de se obter um resultado para uma média de parcelas, com objetivo de caracterizar o comportamento temporal do NDVI para cada classe de cultura, reduzindo-se a variabilidade em cada cultura. É de notar que os comportamentos

temporais das curvas de cada parcela não são idênticos, embora apresentem um comportamento semelhante. Isto acontece porque cada parcela de uma mesma classe é influenciada de maneira diferente por fatores bióticos, abióticos, variedade cultural, decisões do agricultor, tais como a data de sementeira, ou/e por técnicas culturais (práticas agrícolas) diferentes, o que afeta o tipo e as características do coberto vegetal e ainda a sua catividade fotossintética.

É ainda possível observar outra variabilidade no NDVI entre parcelas de uma mesma classe, correspondente aos pontos de inflexão muito acentuados afastando-se do padrão expectável. A causa provável serão as interferências (ruído) do sinal recebido pelo satélite (como as radiações provenientes de outros objetos que não o objeto em estudo) e/ou pela presença de pixéis sem informação, resultado da aplicação da máscara de nuvens (efeito da atmosfera).

Na classe dos cereais de outono-inverno (O-I), por exemplo, no dia do ano (DDA) 1 (1 de janeiro de 2020), a curva de NDVI diminui atipicamente na maioria das parcelas, o que poderá ser explicado por um período normal de dormência pela cultura devido a baixas temperaturas que faz a planta permanecer no estágio vegetativo durante o inverno, e não passa para o reprodutivo até que tenham decorrido um número suficiente de horas de frio, até que a duração do dia em relação à noite seja suficientemente longa, ou devido à inexistência de um número de pixéis considerável em todas as imagens desse período e nessas parcelas, diminuindo, assim, o valor médio de NDVI por parcela. Situação oposta verifica-se na classe do milho no DDA 49 (18 de fevereiro de 2020), em que se verifica um aumento do valor de NDVI em algumas parcelas, o que poderá ser explicado pelo ruído de sinal provocado por parcelas vizinhas ou por um aumento temporário de biomassa em zonas da parcela que normalmente não existe, por exemplo nas bordas da parcela ou nos caminhos.

Ainda pela análise da Figura 4.2 é possível confirmar e validar a distribuição cultural indicada pela ABL. Os resultados obtidos são coerentes com o comportamento fenológico de cada cultura e com o comportamento do perfil temporal médio de NDVI, depois de identificadas as regiões das curvas influenciadas pelas interferências anteriormente referidas.

A análise dos perfis temporais médios de NDVI de cada classe, apresentadas na Figura 4.3 permite definir as fases fenológicas das culturas. De modo a identificar o ciclo das culturas, utilizaram-se, como ponto de partida, os valores presentes em Allen *et al.* (1998) da duração das fases fenológicas e do período (mês) de sementeira ou plantação para regiões com um clima semelhante ao do local de estudo, valores ajustados de  $K_c$  para todas as fases fenológicas e

informação específica de cada cultura, obtida em bibliografia nacional, que foi posteriormente ajustado com a informação do perfil temporal de NDVI para cada classe cultural.

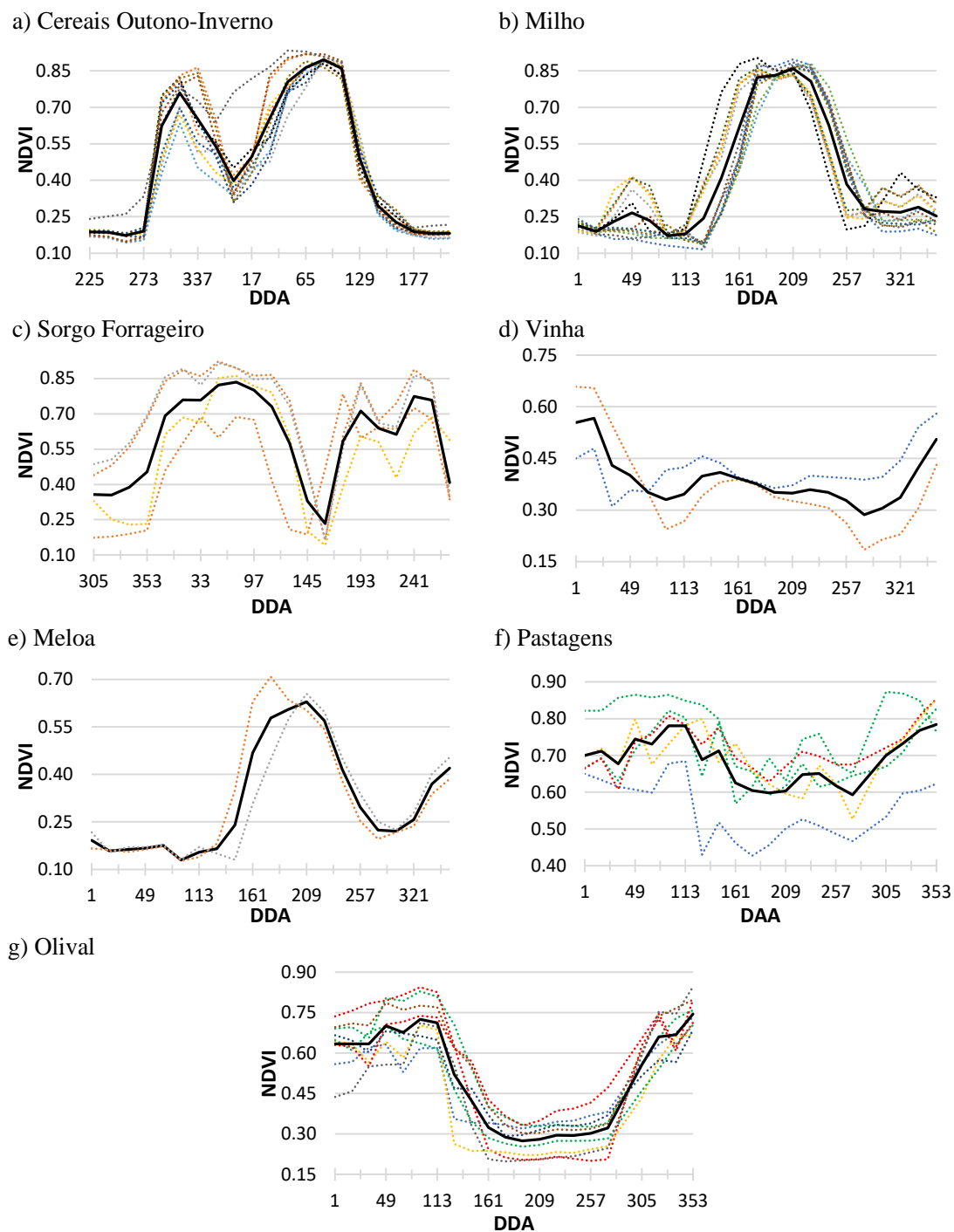


Figura 4.2. Series temporais de NDVI para cada parcela (linhas a tracejado) e para uma parcela média (linha contínua) para o ano 2020.

Na generalidade das classes de cultura, o comportamento do perfil temporal médio de NDVI é muito semelhante ao comportamento esperado de cada classe cultural para a época normal dos seus ciclos vegetativos, observando-se pequenas variações devido a fatores externos à cultura.



A fase inicial é caracterizada pelo momento em que é realizada a sementeira ou plantação, ou no início da fase ativa no caso das culturas perenes, sendo de esperar valores baixos e relativamente constantes de NDVI.

Por este motivo, considerou-se que, para todas as classes, a fase inicial seria definida em função do início da fase de desenvolvimento rápido (quando o perfil temporal médio de NDVI cresce rapidamente) mesmo que o perfil temporal médio de NDVI apresente alguma variação na parte inicial. Delimitaram-se assim, para o ano de 2020, as fases iniciais para: a classe do milho entre o dia 22 de abril a 8 de maio; a classe do sorgo entre 24 de maio até ao dia 9 de junho; a classe da vinha entre o dia 5 de março e 6 de abril; a classe da ervilha entre o dia 13 de setembro ao dia 29 de setembro; a classe da meloa entre o dia 22 de abril ao dia 8 de maio; a classe dos cereais O-I entre o dia 13 a 29 de setembro e para a classe das pastagens entre o dia 25 de junho e o dia 29 de setembro.

As fases de desenvolvimento rápido e de senescência foram caracterizadas, respetivamente, por um crescimento e um decréscimo acentuado do NDVI. Tal não se verificou para a fase de senescência da cultura da vinha (25 de junho a 29 de setembro de 2020) porque para esta cultura a fase mais longa corresponde à fase de senescência devido à maturação dos frutos e, como a duração esperada para esta fase não correspondia ao primeiro período de decréscimo do perfil temporal médio de NDVI (entre o DDA 145 a 193), provavelmente por ter existido algum fator de stress à cultura ou devido a uma possível efeito da atmosfera, decidiu-se respeitar os valores de referência de modo a alargar a fase média e considerar-se que a fase de senescência começaria uns dias atrasada, fazendo coincidir o seu período ao ponto do perfil temporal médio de NDVI com o valor mais baixo.

Um período com os valores máximos de NDVI relativamente constantes no perfil temporal médio de NDVI entre a fase de desenvolvimento rápido e a fase de senescência indicam o período intermédio, que é caracterizada pelo período onde as culturas alcançaram o seu crescimento máximo e direcionam a sua energia para a formação dos frutos (fase produtiva). Em algumas culturas não foi possível estabelecer um comportamento padrão para a fase média, devido às mesmas causas apontadas para variabilidade do NDVI. Por isso, assumiu-se a fase média para essas culturas entre o ponto onde a curva média de NDVI parou o seu crescimento e o ponto onde ocorreu o oposto, sendo que a variação entre esses dois pontos foi provocada

possivelmente por fatores de stress à cultura ou por fatores atmosféricos que influenciaram o sinal eletromagnético recebido pelo satélite.

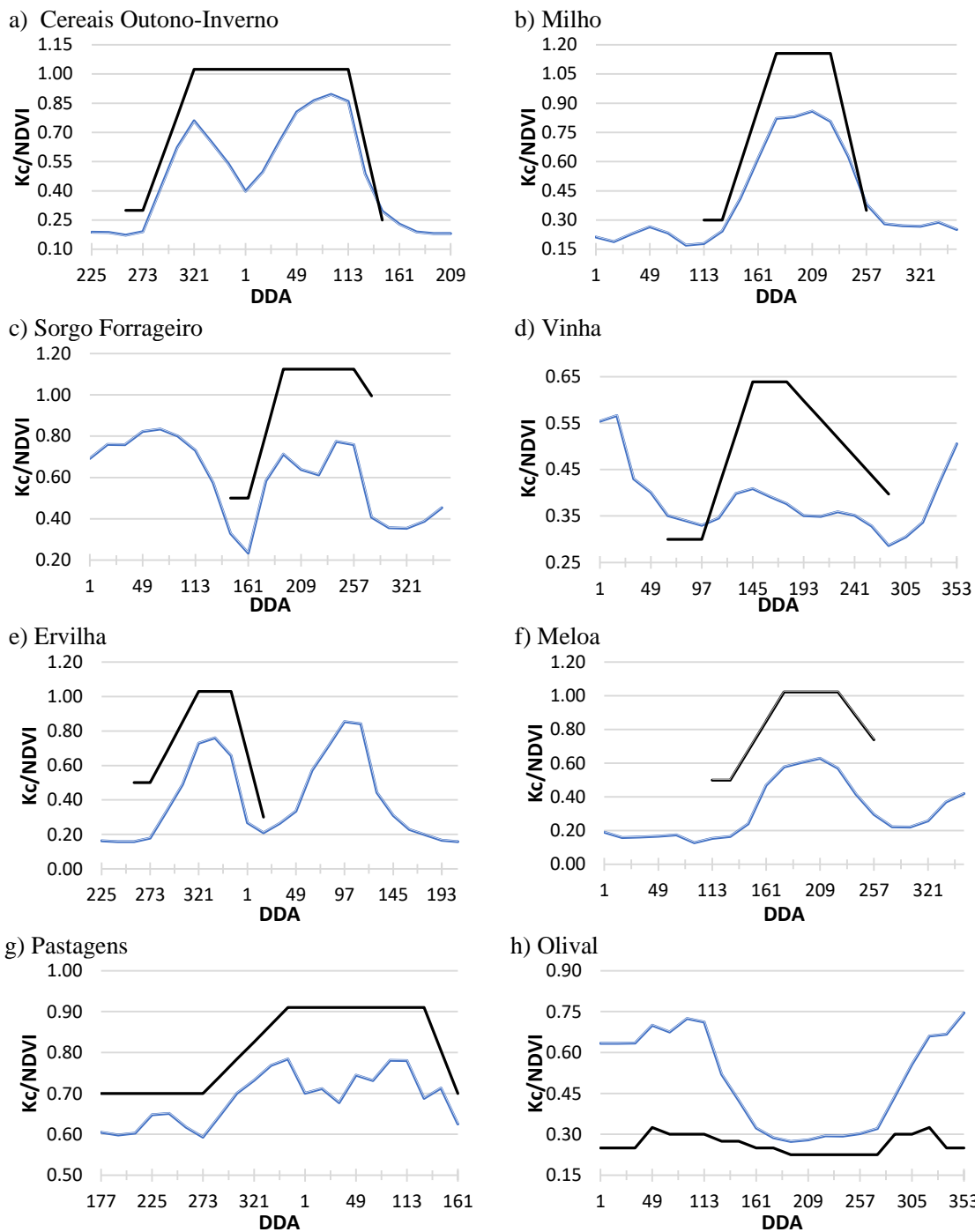


Figura 4.3. Serie temporal de NDVI da parcela média (—) e curva de Kc obtida pelo método FAO 56 ou Pastor (olival), para o ano 2020 (—).

Na classe dos cereais O-I a fase média foi considerada entre 16 de novembro a 22 de abril, na classe do milho entre 25 de junho e 12 de agosto, para o sorgo forrageiro entre o dia 11 de julho

ao dia 13 de setembro, para a vinha entre 24 de maio a 25 de junho, para a cultura da ervilha a fase média encontra-se entre o dia 16 de novembro ao dia 18 de dezembro, para a classe da meloa entre 25 de junho a 12 de agosto e para a classe das pastagens entre 18 de dezembro e 8 de maio.

O final do ciclo é definido pelo momento em que a colheita é realizada ou, no caso das culturas perenes, pelo momento em que a cultura entra em repouso vegetativo, que corresponde ao último dia da fase de senescência; 24 de maio para a classes dos cereais, 17 de janeiro para a classe da ervilha, dia 29 de setembro para as culturas do sorgo e vinha, 13 de setembro para a classe do milho e meloa e 9 de junho para a classe das pastagens.

Verifica-se na série temporal média do NDVI para a classe da ervilha a existência de duas curvas de desenvolvimento de biomassa, tendo-se optado inicialmente por realizar a simulação com a curva que inicia o seu ciclo no início do ano porque não foi fornecida informação sobre as datas de sementeira. Esta pareceu ser a opção mais lógica, apoiada pela data de sementeira apresentada na publicação em Allen *et al.* (1998) (março/abril) e pela informação recolhida em alguns catálogos de sementes (PIMACON, 2018; VIVAS, 2021), mas que não se refletiu na comparação entre os consumos e as NR simuladas (com uma diferença de 28,4 mm de NR simuladas a mais do consumo fornecido pela ABL). Assim sendo, decidiu-se repetir a simulação de forma a fazer corresponder à primeira curva da série temporal média do NDVI, visto que, de acordo com os mesmos catálogos de sementes (PIMACON, 2018; VIVAS, 2021) e o anuário agrícola de Alqueva 2020 (EDIA, 2020), a ervilha também pode ser semeada no início do outono para as condições climáticas da região do Alentejo. Os resultados obtidos serão apresentados no ponto 4.4.

As datas anteriormente estabelecidas para definir cada uns dos períodos fenológicos das classes culturais permitiram determinar as respetivas durações, substituindo os valores tabelados apresentados em Allen *et al.* (1998) que foram determinados para condições climáticas e práticas agrícolas utilizadas em várias regiões do globo, condições estas que poderão não corresponder exatamente às condições verificadas neste estudo.

O ciclo do olival não foi dividido em fases porque não se seguiu o método publicado em Allen *et al.* (1998), como explicado no ponto 3.3.3.3. Em vez disso, adotou-se o método publicado por Pastor & Orgaz (1994), através da qual se definiu um valor de Kc mensal ajustado ao primeiro dia de cada período de conjunto de imagens com o mês correspondente.

#### 4.2.2. Determinação dos valores de Kc para cada fase fenológica

Como referido no ponto 3.3.3.3, os valores de Kc obtidos a partir das equações apresentadas no Quadro 3.2 alimentadas com os NDVI adquiridos pelas imagens de satélite, foram comparados com os valores de Kc de referência apresentados em Allen *et al.* (1998), ajustados aos efeitos do clima e aos valores de Kc publicados por Pastor & Orgaz (1994) ajustados para uma percentagem média de cobertura do solo para a classe do olival (Figura 4.4).

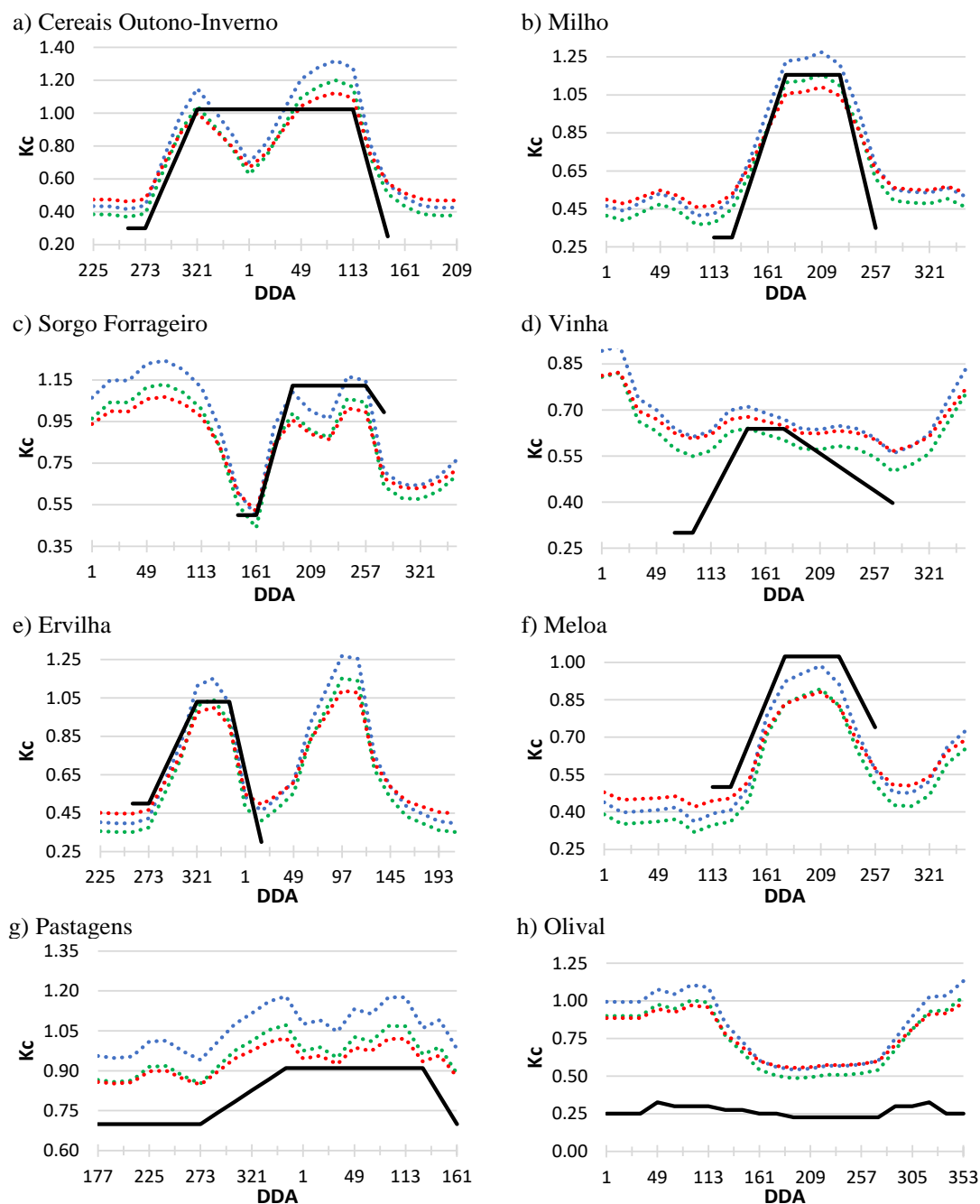


Figura 4.4. Curvas de Kc estimadas pelas equações empíricas da relação do NDVI com o Kc publicadas em Calera-Belmonte *et al.* (2005) (.....), González-Piqueras (2006) (.....) e Toureiro *et al.* (2017) (.....), e a curva de Kc obtida com os valores de Kc publicados em Allen *et al.* (1998) com as fases fenológicas obtidas na análise da curva do NDVI (—).

Pretendeu-se encontrar os valores de Kc que melhor se ajustavam de forma a caracterizar a evapotranspiração real de cada cultura. É possível constatar que, para as classes de cereais O-I e milho, os valores de Kc calculados pela equação apresentada por González-Piqueras (2006) são coerentes com os valores de Kc ajustados, embora existindo pequenas variações pontuais na fase média, no caso dos cereais O-I, e nas fases inicial e final, no caso do milho.

Para a classe da ervilha a equação apresentada por Calera-Belmonte *et al.* (2005) foi a que melhor se ajustou aos valores da curva de Kc da FAO na fase de desenvolvimento rápido e de senescência, enquanto para a fase média a equação que melhor se ajustou foi apresentada por González-Piqueras (2006), não existindo nenhuma equação que consiga ajustar-se na fase inicial e final da classe. Na classe do sogro a equação apresentada por Calera-Belmonte *et al.* (2005), apresentada no Quadro 3.2, ajustou-se bem à maioria das fases fenológicas, exceto na fase inicial e final, apesar de os seus valores não se afastarem muito dos ajustados. Nas classes da vinha, das pastagens e do olival todas as equações apresentadas sobrestimaram significativamente os valores de Kc de referência. Por último, na classe da meloa nenhum dos valores de Kc obtidos pelas equações ajustaram à curva dos Kc de referência, verificando-se uma tendência de subestimação dos valores de Kc.

A diferença entre os valores de Kc calculados e os tabelados é explicada por vários autores, tais como Calera *et al.* (2017), D'Urso *et al.* (2010), D'Urso & Caleira (2006), Huete *et al.* (2002, 1994), Huete (1988) (Pôças *et al.*, 2020) e Baret & Buis (2008) ( D'Urso *et al.*, 2010). Estes autores referem que a relação do NDVI com o Kc é baseada numa avaliação subjetiva do desenvolvimento das culturas no terreno, não podendo ser transposta de uma cultura para outra, sendo que o valor de NDVI é influenciado pela variação do solo, das condições atmosféricas, da biomassa, podendo o seu valor saturar com facilidade e ainda depender de vários fatores técnicos dos sensores presentes nos satélites.

Por outro lado, de acordo com Alface *et al.* (2019), o uso do NDVI é um método eficiente para diferenciar períodos distintos de culturas cultivadas, tendo sido utilizado em Rolim *et al.* (2019), utilizando imagens do satélite SPOT-5 TAKE-5, e em Vilar *et al.* (2015) utilizando imagens do satélite Landsat-8 para definir as durações das fases de desenvolvimento das culturas.

A utilização das equações empíricas necessitaria de um estudo estatístico com um maior número de amostras de modo a avaliar a validade do ajustamento para a região de estudo. Como não foi possível determinar um comportamento que permita extrair valores para os Kc de todas

as fases fenológicas de cada classe cultural, optou-se por usar os valores de  $K_c$  tabelados ajustados para o clima do local. Estes, quando corrigidos aos efeitos do clima, continuam a ser os mais utilizados para este tipo de estudo, confirmando a validade do método e facilitando os processos seguintes.

#### 4.2.3. Resultados da fenologia das culturas

Os quadros apresentados nos Anexos Xa e Xb, resumem os resultados relativos às culturas e à sua fenologia, que foram posteriormente utilizados para a estimação das NR com recurso ao modelo *ISAReg*.

Como referido no ponto 3.3.3.3., os valores de  $K_c$  da fase intermédia e final retirados em Allen *et al.* (1998) tiveram de ser ajustados para as condições climatéricas locais (Anexo Xa). Verificou-se uma diminuição do valor de  $K_c$  para a fase média em todas as classes ao passo que na fase final só se verificou essa diminuição para as culturas em que o  $K_c$  tabelado era superior a 0,45, como era o caso das classes do sorgo, da vinha, das pastagens e da meloa.

Para o caso específico do olival verificou-se a partir do método iterativo referido no ponto 3.3.3.3. que o valor de coeficiente que correlaciona o  $K_c$  com a fração de cobertura do solo coberta pela vegetação ( $K_r$ ) que melhor se ajusta a um  $K_c$  real é de 0.5, correspondendo, em média a um valor de cobertura do solo dos olivais existente no PRL de 30%. No Anexo Xb encontram-se os valores de  $K_c$  ajustados pelo método de Pastor & Orgaz (1994).

Na Figura 4.5 apresentam-se as curvas de Kc finais, para todas as classes culturais.

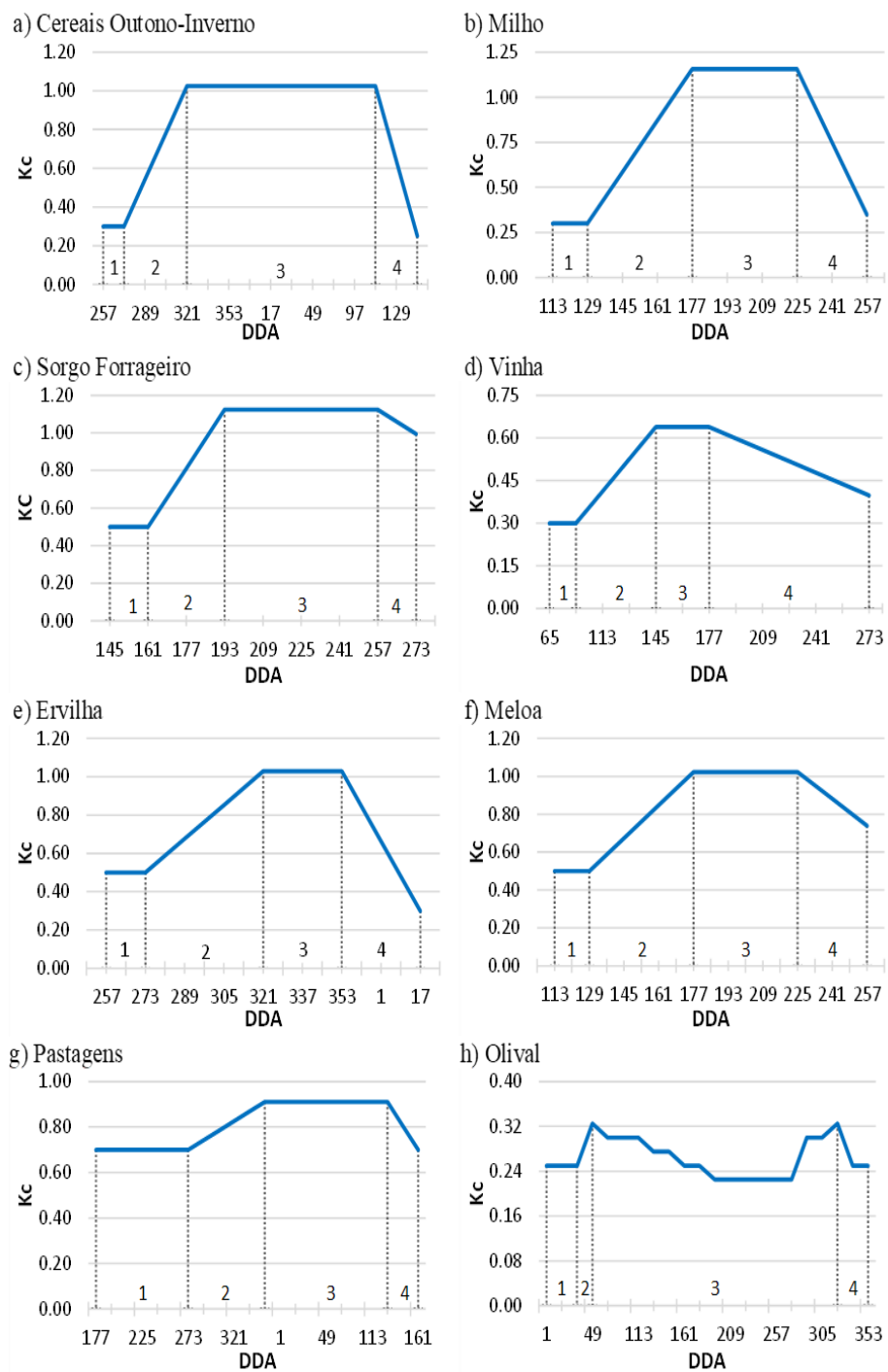


Figura 4.5. Curvas de Kc com valores tabelados (—) e com a representação das várias fases de desenvolvimento: 1 – Inicial; 2 – Desenvolvimento rápido; 3 – período intermédio; 4 – senescência).

### 4.3. Esquemas de rega utilizados na modelação

Ao analisar os gráficos da série temporal média do NDVI, apresentados na Figura 4.3, observa-se uma diminuição do NDVI durante a fase média da cultura do sorgo, na fase de senescência na cultura da vinha e nas fases inicial e média da pastagem, indicando a provável ocorrência de stress hídrico nesses períodos. Na cultura de vinha é normal utilizar a rega deficitária como estratégia de condução da rega, que consiste na aplicação de quantidades de água inferiores ao consumo necessário pela planta, ao longo de todo o ciclo vegetativo ou apenas em determinados períodos, com o objetivo de alcançar um equilíbrio entre produção e qualidade (Castro & Verdial, 2011).

Assim sendo, foram obtidos vários ficheiros de esquema de rega. Para a classe cultural das pastagens, esse ficheiro foi obtido com 90% para a condição inicial do solo por se considerar o início do ciclo no início do ano, considerando o nível de preenchimento da RU praticamente completo, nenhum dia antes da colheita para terminar a rega, início da rega em todas as fases da cultura quando o valor médio do coeficiente de stress ( $K_s$ ) alcançar 0,3, de forma a fornecer um stress hídrico elevado, como é indicado pela serie temporal do NDVI, e término da rega quando a percentagem da reserva útil alcançar os 50%.

Para a classe cultural da vinha, esse ficheiro foi obtido com 90% para a condição inicial do solo considerando a vinha como uma cultura que inicia o seu ciclo no final do inverno e no início da primavera, 15 dias antes da colheita para terminar a rega, porque é normalmente o período de tempo utilizado (entre a maturação do fruto e a colheita) para interromper a rega com o objetivo de melhorar a qualidade organolépticas do fruto, início da rega em todas as fases da cultura quando o valor médio do  $K_s$  0,4, provocando um stress hídrico elevado, e término da rega quando a percentagem da reserva útil alcançar os 45%.

O ficheiro obtido para a classe do sorgo é caracterizado com 90% para a condição inicial do solo, 15 dias antes da colheita para terminar a rega, porque é normalmente o período utilizado para a secagem do grão, início da rega em todas as fases da cultura quando o valor médio do  $K_s$  alcançar 0,5, e término da rega quando a percentagem da reserva útil alcançar os 50%.

Para a classe da meloa não se observou nenhuma diminuição do comportamento do NDVI, concluindo-se que a cultura não sofreu stress hídrico significativo, embora as NR simuladas obtidas para um esquema de rega em conforto sejam significativamente superiores aos consumos (253,6 mm), o que aponta para uma maior eficiência do sistema de rega realmente



utilizado e/ou para que tenha existido um ligeiro stress hídrico que não teve impacto na produção de biomassa da cultura e foi suficiente para diminuir o consumo. Optou-se, desta forma, por alterar a eficiência de rega de 0,85 para 0,95 e por um esquema de rega que induzisse um stress ligeiro de modo a fazer coincidir as NR simuladas com os consumos, tendo sido obtido um ficheiro com 90% para a condição inicial do solo, 15 dias antes da colheita para terminar a rega, início da rega em todas as fases da cultura quando o valor médio do  $K_s$  alcançar 0,7, de forma a fornecer um stress hídrico ligeiro, e término da rega quando a percentagem da reserva útil alcançar os 70%.

Relativamente às classes culturais em que não foi identificada alguma indicação de stress hídrico, foram adotados procedimentos diferentes: decidiu-se obter um esquema de rega de outono-inverno para as classes culturais com um ciclo de outono-inverno (cereais e ervilha), em que no início do ciclo ou na sementeira o solo tende a encontrar-se com um pequeno armazenamento de água, definindo-se, por isso, um nível de preenchimento da reserva útil (%) na zona inicial do solo e nas restantes camadas de 50%; já para as classes culturais com um ciclo de primavera-verão (milho e olival), obteve-se um esquema de rega de primavera-verão, sendo que no início do ciclo ou na sementeira o solo tende a encontrar-se no máximo, ou quase, da sua capacidade devido à época de maior precipitação, o que levou à definição de um nível de preenchimento da reserva útil (%) na zona inicial do solo e nas restantes camadas de 90%.

Não foram impostas restrições de água para a rega nem foi considerada a ascensão capilar para nenhum dos esquemas de rega.

#### 4.4. Necessidades de rega para o PRL

##### 4.4.1. Necessidades de rega líquidas para cada UHA cultura-solo

Os resultados obtidos das simulações efetuadas a partir do modelo ISAREG são apresentadas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2. Necessidades de rega líquidas (NRL) anuais modeladas para 2020 e médias do período 2001 a 2020.

UHA		NRL modeladas (mm ano <sup>-1</sup> )		UHA		NRL modeladas (mm ano <sup>-1</sup> )	
Nº	cultura-solo	Anuais 2020	Médias 2001-2020	Nº	cultura-solo	Anuais 2020	Médias 2001-2020
1	<b>Cereais *-A</b>	15,0	51,4	12	<b>Milho-A</b>	577,0	624,9
2	<b>Cereais *-Pc</b>	4,0	39,5	13	<b>Milho-Pc</b>	547,0	599,5
3	<b>Cereais *-Px</b>	4,0	43,5	14	<b>Milho-Px</b>	558,0	610,0
4	<b>Cereais *-Sr</b>	24,0	58,6	15	<b>Milho-Sr</b>	587,0	633,9
5	<b>Ervilha-Px</b>	24,1	66,5	16	<b>Vinha-A</b>	170,4	191,7
6	<b>Pastagens-A</b>	280,7	394,4	17	<b>Vinha -Sr</b>	181,2	201,0
7	<b>Pastagens-Pc</b>	246,4	372,2	18	<b>Sorgo-Px</b>	357,7	372,5
8	<b>Pastagens-Px</b>	245,9	364,3	19	<b>Sorgo-Sr</b>	343,3	383,8
9	<b>Pastagens-Sr</b>	288,3	391,4	20	<b>Olival-A</b>	64,0	178,9
10	<b>Meloa-Pc</b>	429,5	470,1	21	<b>Olival-Px</b>	61,0	176,6
11	<b>Meloa-Sr</b>	431,4	482,0	22	<b>Olival-Sr</b>	89,0	202,7

\*As classes de cereais correspondem as classes de cereais outono-inverno

Com base na informação apresentada na Figura 3.10 e na Figura 4.6 é possível concluir que os valores das NLR anuais das classe culturais dos cereais O-I, ervilha, pastagens e olival em 2020 se afastam significativamente dos valores médios das ultimas duas década (2001-2020) devido ao efeito do clima que se fez sentir em 2020, ano em que, se verifica um aumento da precipitação (P) nos meses de março, abril, setembro, novembro e dezembro, apesar de ter existido uma ligeira diminuição da P nos meses de fevereiro e outubro, em comparação com os valores médios da série meteorológica dos últimos 18 anos. Consequentemente, esta variação da precipitação é inversamente proporcional à variação do deficit entre a P e a evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), justificando-se, deste modo, a baixa NR nas culturas com ciclos vegetativos que coincidem nos períodos de menor deficit. É o caso das classes dos cereais O-I, que iniciaram os seus ciclos em meados de setembro e terminaram a sua fase

produtiva em finais de abril, e o caso da cultura da ervilha em que o seu ciclo ocorreu entre os meses de setembro e janeiro.

A variação dos valores para o olival e as pastagens pode ser explicada pelo seu ciclo anual, em que a P verificada na época húmida permitiu às culturas reduzir as NLR anual e, consequentemente, o stress hídrico. Para as restantes classes culturais, verifica-se uma ligeira variação dos valores das NLR anuais porque no ano de 2020 a estação seca não foi muito diferente da estação média da série meteorológica dos últimos 18 anos. Verifica-se, ainda, um ligeiro aumento do défice no pico da estação seca, mas que é compensada pela P que se fez sentir em fevereiro e outubro, diminuindo ligeiramente as NLR anuais.

A variação dos valores dentro de uma mesma cultura é devida às diferentes capacidades de retenção de água de cada classe de solo, variando, assim, a sua capacidade de satisfazer as NLR das culturas, que depende da quantidade de água armazenada no solo. Nos Anexos XIIa, XIIb e XIIc é apresentado graficamente a evolução do BH do solo, obtido a partir do modelo ISAREG para todas as culturas no ano em estudo.

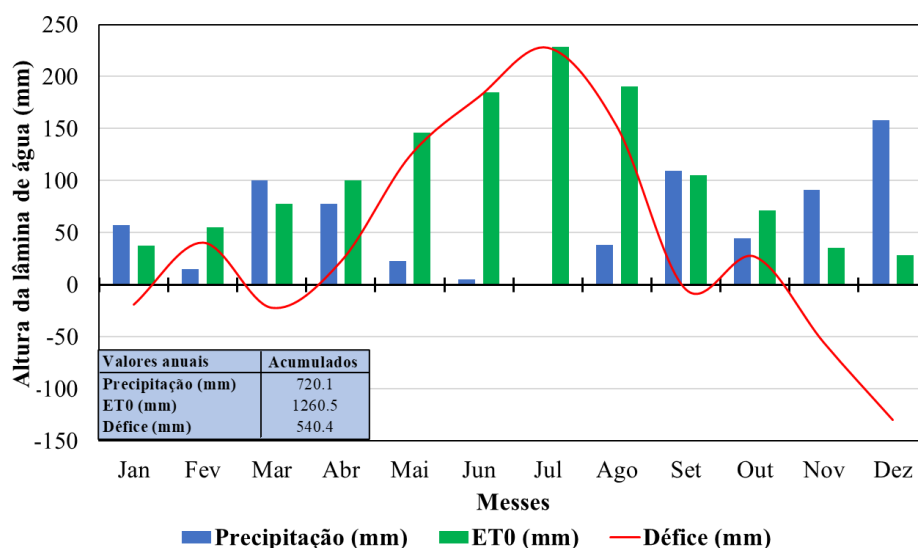


Figura 4.6. Dados acumulados mensais e anual, e dados médios anual da precipitação, da evapotranspiração e do déficit hídrico para o ano de 2020, obtidas pela estação meteorológica do Redondo (COTR, 2021).

#### 4.4.2. Necessidades de rega por classe cultural

A partir do método apresentado no ponto 3.3.4., foram obtidas as seguintes NLR anuais, calculadas para cada parcela, apresentadas nas Figuras 4.7 e 4.8.

Estes dados foram obtidos pela média ponderada das NLR anuais simuladas para cada UHA dentro da parcela, onde se obtiveram as NLR anuais por parcela, no entanto, como cada parcela é caracterizada por uma classe cultural, foram apresentados os valores obtidos por cada classe cultural. Todos os valores acumulados, apresentados na Figura 4.7, foram obtidos pelo somatório das NLR anuais em metros cúbicos, transformados depois em milímetros pela divisão das diferentes áreas em metros quadrados.

Verifica-se a partir da Figura 4.7 que a classe cultural do milho é a classe que maior quantidade de água para rega necessita, ligeiramente superior a 550 mm, seguido da classe da meloa com NLR anual superiores a 400 mm e do sorgo com NLR anual ligeiramente inferiores a 350 mm. No entanto, no que respeita às NLR anuais (Figura 4.8), observou-se que a classe da meloa, foi a quinta classe que gastou mais água, responsável por cerca de 2% das NLR anuais de todo o PRL, ficando atrás das classes do milho (com 80,1% das NLR anuais de todo o perímetro), sorgo, pastagens e vinha. Isto justifica-se pela área instalada desta classe, que é em média de apenas 24,2 hectares inferior à área instalada das classes do sorgo, pastagens, olival e vinha responsáveis por 18.1% das NLR anuais globais do PRL. Deste modo, pode concluir-se que a cultura da meloa, quando comparada com outras culturas, tem maior NLR anual, mas que no contexto do PRL é a sexta cultura que consome mais água da rega.

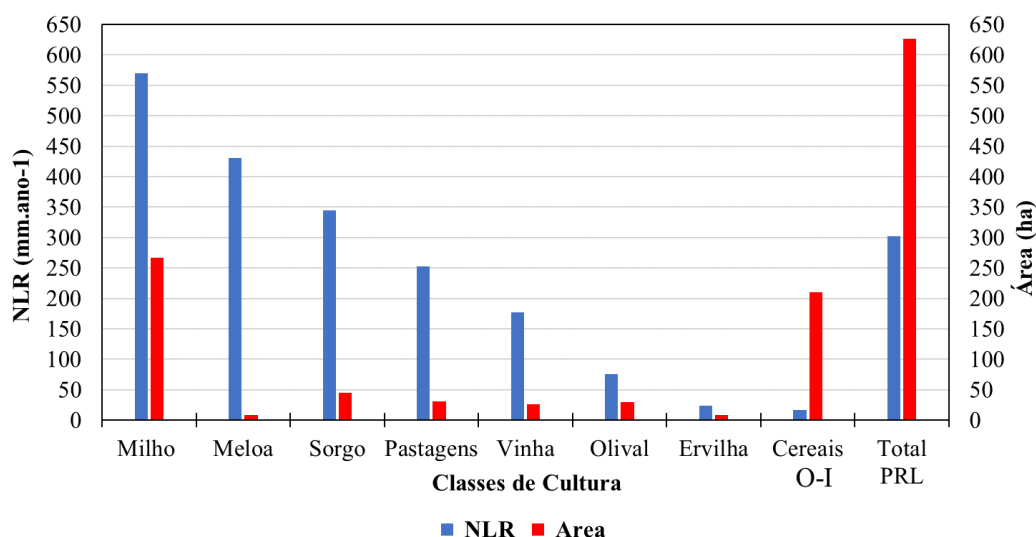


Figura 4.7. Relação entre as necessidades líquidas de rega (mm) simuladas e as áreas correspondentes para cada cultura no PRL.

Nas classes do sorgo, pastagens e vinha, verifica-se que as NLR anuais de rega são muito semelhantes entre si, e que as suas variações são acompanhadas pelas variações das suas áreas, como é possível comprovar-se pelo gráfico da Figura 4.8, sendo possível concluir que estas

culturas são muito semelhantes do ponto de vista da NRL e que a sua variação é coincidente com a expressão que cada classe ocupa na distribuição da área regada.

Para as restantes culturas obtiveram-se baixas NRL anuais, como seria de esperar, porque são culturas com ciclos coincidentes com a estação húmida e no caso específico do olival devido ao seu mecanismo natural de redução da transpiração, NRL.

As NRL anuais para o PRL no ano em estudo corresponderam aproximadamente a 302,3 mm, o que equivale a 1894743,1 m<sup>3</sup>, para uma área regada modelada de 626,8 hectares.

São apresentados na Figura 4.9 os valores simulados das NR anuais para cada cultura modelada do PRL. Os valores foram obtidos por aplicação das eficiências dos sistemas de rega aos valores das NRL anuais de cada parcela. Posteriormente, efetuou-se o somatório das NR anuais de todas as parcelas com a mesma cultura, tendo em consideração a área ocupada por cada cultura em cada parcela.

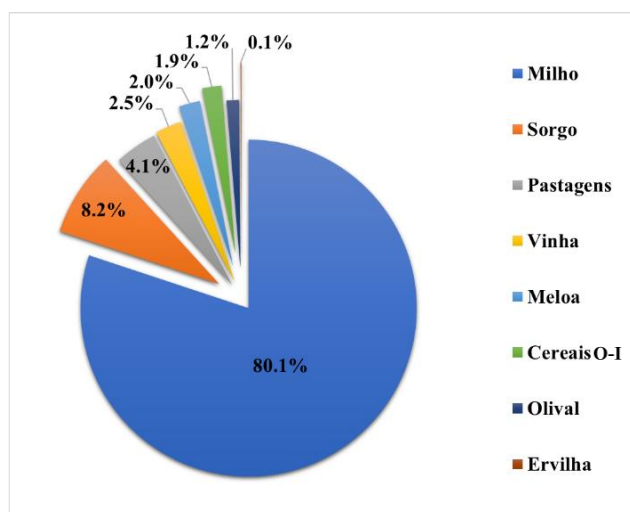


Figura 4.8. Consumos líquidos (m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>) de maior expressão no PRL

Estes valores acumulados obtidos por modelação, foram comparados com os consumos registados nos hidrantes fornecidos pela ABL, e também com os valores publicados no anuário agrícola de Alqueva 2020, que contém valores do ano médio de rega, em metros cúbicos por hectare, para as culturas instaladas no Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EFMA). O anuário agrícola apresenta, para as culturas dos cereais de outono-inverno e para a ervilha, valores NR anuais médios de 300 mm e de 225 mm, respetivamente.

A Figura 4.9 mostra que os valores modelados das NR anuais para a classe do milho são 20,4% inferiores aos consumos (194,4 mm). O valor coincide com o resultado do estudo realizado por Toureiro *et al.* (2017) para a cultura do milho em condições mediterrâneas e com os valores do ano médio apresentados no anuário agrícola da EDIA.

Na classe dos cereais O-I, as NR anuais simuladas apresentaram valores muito diferentes quando comparados com os consumos fornecidos, que foram 2,3 vezes superiores. Apesar da diferença, o valor modelado justifica-se para o ano em estudo, visto que durante o ciclo da cultura a P foi o dobro da  $ET_c$  (Figura 4.6).

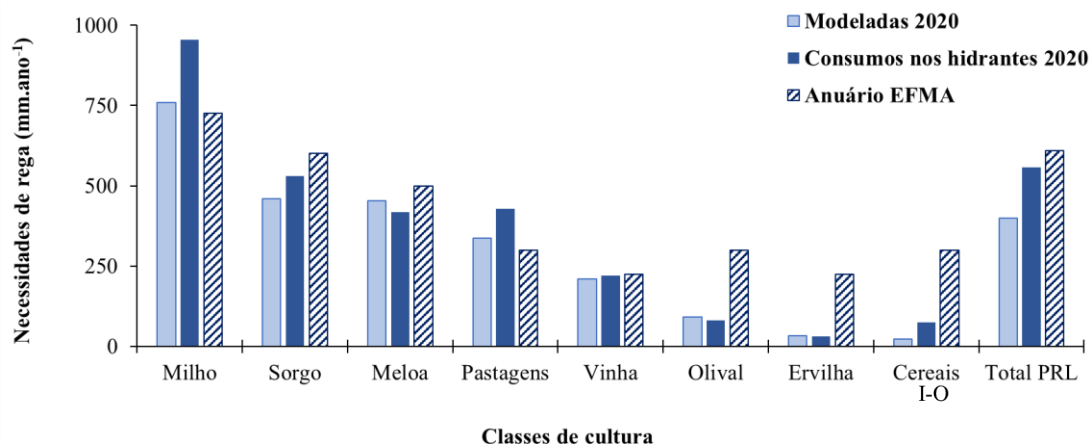


Figura 4.9. Necessidades de rega (NR) modeladas para cada classe cultural para o ano 2020, comparadas com os consumos nas bocas de rega correspondentes (ABL, 2020) e com os valores do ano médio de rega do anuário agrícola de Alqueva 2020 (EDIA, 2020).

Verifica-se para as classes culturais da meloa, da ervilha e do olival, que os valores das NR anuais simuladas se encontram acima dos valores consumidos no PRL no ano de 2020. Apesar desta situação, as diferenças entre os consumos e as NR anuais simuladas não são significativas: para a classe da meloa foi consumido 7,6% menos do que seria de esperar pela NR anual simulada, o que corresponde a uma diferença de menos 34,4 mm em 418,5 mm consumidos, enquanto para a classe da ervilha a diferença verificada (-1,8 mm de 30,3 mm consumidos) corresponde a um consumo 5,7% inferior às NR anuais simuladas e para a classe do olival verificou-se uma diferença do consumo de menos 9,5% em relação as NR anuais simuladas, correspondendo a menos de 8,6 mm em 81,5 mm consumidos. Verifica-se ainda, para a classe das pastagens, a mesma situação quando comparada com o anuário, em que foi simulado 36,5 mm a mais que os 300 mm indicados, correspondendo a um acréscimo 12,2% nas necessidades simuladas.

Os valores para as restantes classes culturais encontram-se abaixo dos valores dos consumos. No caso das pastagens tem a maior diferença entre o consumo e as NR anuais simuladas, 91,1 mm (em 427,6 mm consumidos), correspondendo a um consumo 21,3% superior ao modelado.

A aplicação do método referido em 3.3.5, possibilitou alcançar valores das NR consistentes dentro dos valores dos consumos reportados pela ABL e pelo anuário agrícola do Alqueva para o ano 2020 cedido pela EDIA.

Pela Figura 4.10 conclui-se que 95% das NR anuais foram satisfeitas por sistemas de rega por aspersão, dos quais 47% correspondem a rampas pivotantes, com uma dotação média de 448,3 mm, e 48% por aspersão fixa com cobertura total, com uma dotação média de 400,5 mm. Para as restantes 5% foi utilizado sistema de rega localizada por gota a gota, com uma dotação anual média de 192,8 mm.

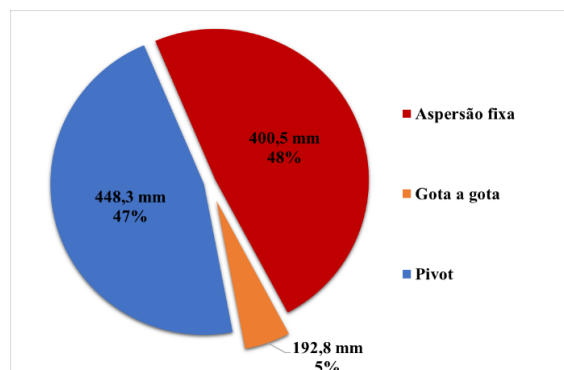


Figura 4.10. Distribuição relativa das NR anuais por sistema de rega.

Na Figura 4.11 encontra-se representada a distribuição espacial das necessidades de cada parcela do PRL, obtida através do método apresentado no Anexo IX em ambiente SIG.

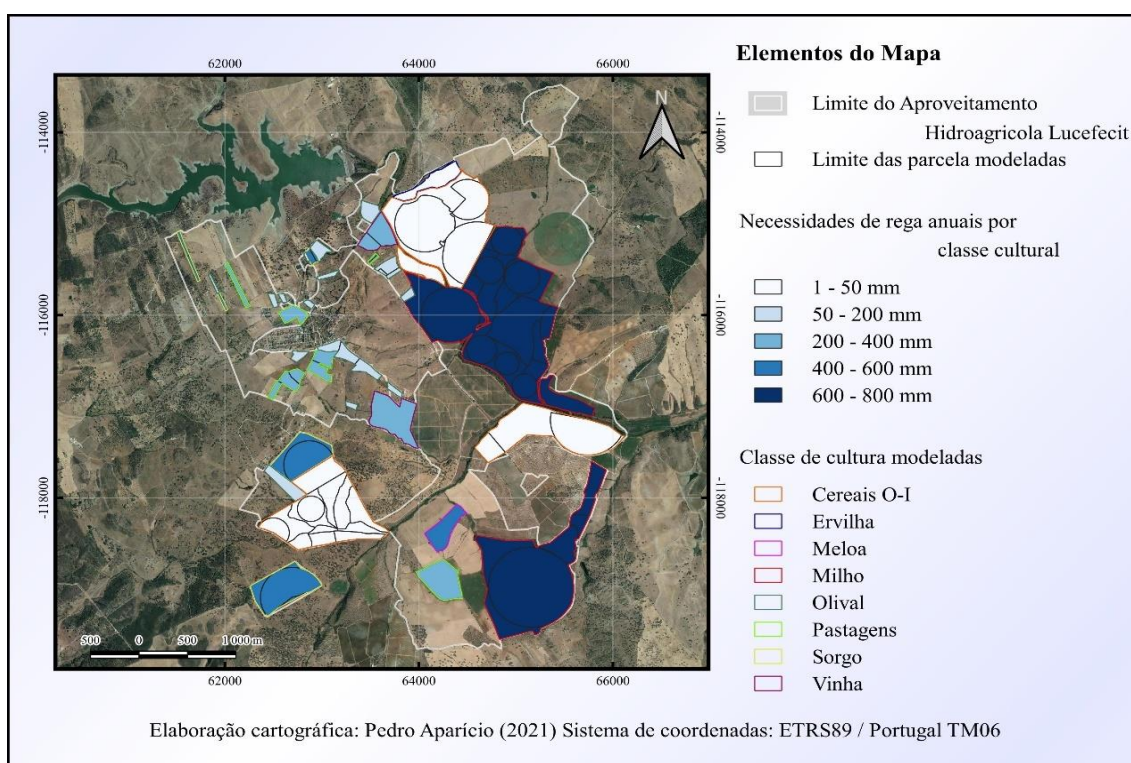


Figura 4.11. Mapa da distribuição espacial das necessidades de rega por parcela e agrupamento de parcelas de cada cultura.

#### 4.4.3. Necessidades de rega de ponta e caudal de ponta por classe cultural

A Figura 4.12 apresenta as NR em mês de ponta (julho) comparadas com o  $q_f$  para o período de ponta do ano em estudo e para um ano com uma probabilidade de não excedência de 81% (caudal médio).

É possível observar-se pelo gráfico da Figura 4.12 que a classe cultural com maiores exigências em rega no mês de julho é a classe do milho que é responsável por 85,28% de todas as NR de ponta do PRL, seguida da classe do sorgo, com 8,5% da NR de ponta, e da meloa, que é responsável por 1,61%. Apesar de a classe das pastagens ser em termos de exigências hídricas inferior à classe da meloa, é responsável por 2,44% da NR de ponta devido à sua representação no PRL.

Sobre os  $q_f$  do período de ponta por classe cultural, verifica-se, como seria de esperar, que o  $q_f$  obtido para todas as classes culturais para uma probabilidade de não excedente de 81%, é superior ao  $q_f$  obtido do ano 2020, indicando, como visto anteriormente, que no ano em estudo o mês correspondente ao período de ponta é mais húmido quando comparado com a probabilidade de 81%, ou seja, é um ano que não se excederam os valores de caudal necessários para satisfazer as NR de ponta de cada classe cultural. As maiores diferenças entre o  $q_f$  de ponta para 2020 e o  $q_f$  de 81% entre classes culturais, são obtidas para o milho ( $0,24 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ), a classe mais representativa em termos das NR de ponta, com probabilidade de não excedência para o ano de 2020 de 14,3% tanto para o  $q_f$  de ponta como para as NR anuais, confirmando que o ano 2020 foi um ano húmido.

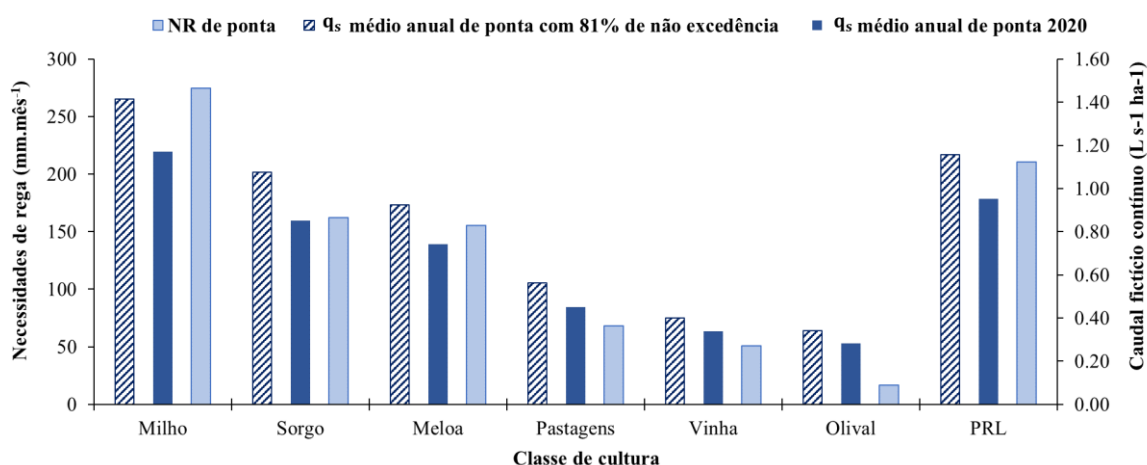


Figura 4.12. Necessidades de rega (NR) de ponta modeladas para cada classe cultural para o ano 2020, comparadas com os caudais fictícios contínuos modelados para o período de ponta do ano em estudo como para um ano com uma probabilidade de não excedência de 81% de uma série entre 2001 e 2020.



Estes valores quando comparados com o  $q_f$  de projeto ( $0,84 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) calculado em 1989 para uma área beneficiada de 1175 ha indicam que ao longo do tempo o padrão cultural foi alterando, permitindo regar culturas mais exigentes em rega em consequência da diminuição da área beneficiada. Além disso, caso o padrão cultural verificado no ano 2020 correspondesse a uma área beneficiária correspondente a toda a área do PRL, o  $q_f$  de projeto não seria suficiente para satisfazer as NR de ponta de todas as classes culturais.

#### 4.4.4. Necessidades globais de rega e caudal de ponta global ao nível do perímetro

Verifica-se na Figura 4.9 que as NGR anuais do PRL simuladas para o ano de 2020 foram de 399,6 mm, correspondendo a um volume anual de  $2504858,2 \text{ m}^3$  o que corresponde um excesso do consumo registado global das parcelas regadas na ordem dos 28,3%.

Como referido anteriormente, o  $q_f$  de projeto utilizado no dimensionamento do PRL é de  $0,84 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , considerando a área total do perímetro como a área beneficiada para rega. O dimensionamento de um perímetro de rega deve ser efetuado de modo a assegurar o transporte de caudais que conduzam a uma solução global equilibrada tanto em termos de custo, como no ponto de vista das condições de funcionamento. Um sistema sobredimensionado, acarreta um custo económico elevado, mas em contrapartida poderá estar melhor preparado para um eventual aumento das NR provocadas pelas alterações climáticas, enquanto um sistema subdimensionado poderá não ter capacidade de satisfazer as NR das culturas, levando à falha do sistema, quando o padrão cultural é alterado para culturas mais exigentes em rega ou/e quando se verifique um aumento das NR devido ao aumento da temperatura e à redução da precipitação provocadas pelas alterações climáticas (Matias, 2012; Rodrigues *et al.*, 2011). Por essa razão, os valores dos  $q_f$  são muito importantes para o cálculo de indicadores de desempenho do sistema de transporte e distribuição de água.

É possível observar-se pela Figura 4.12 que o  $q_f$  para uma probabilidade de não excedente de 81% do PRL corresponde a  $1,16 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , verificando-se uma diferença de  $0,32 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  que indica, numa primeira análise, que o sistema inicialmente foi subestimado para os dias de hoje, ou seja, que o PRL não tem capacidade para satisfazer as NR no período de ponta das culturas. No entanto, numa análise mais pormenorizada, verifica-se, que em 2020, existe uma redução significativa (767,54 ha) da área beneficiada efetivamente regada a que se junta o facto de existir uma elevada área ocupada por culturas de O-I cujo as parcelas não são regadas no período de ponta (219,3 ha), acentuando ainda mais a redução do  $q_f$  em 2020, não estando a ser utilizada toda a capacidade do PRL.

## 5. Conclusões e perspectivas

Os resultados demonstraram que a utilização de perfis temporais do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) obtidos a partir de imagens satélite de elevada resolução temporal, que é o caso das imagens do Sentinel-2, permite de uma forma simples e eficiente, identificar variações na vegetação, possibilitando definir as diferentes fases do ciclo fenológico das culturas. No entanto, a utilização deste método para estimar os valores dos coeficientes culturais (Kc) em regiões como a de estudo ainda não se encontra suficientemente madura para que a sua aplicação seja simples e precisa, devido à grande diversidade de culturas, métodos de condução e condições climáticas. Foi possível ainda destacar os seguintes pontos:

- **A utilização da Detecção remota (DR) para obtenção dos Kc:** as relações utilizadas entre Kc e NDVI resultaram em curvas de Kc diferentes das curvas obtidas pelo método de Allen *et al.* (1998), tornando esta abordagem pouco viável, o que é justificado pelo estudo realizado por Rozenstein *et al.* (2018), que sugere que as relações do Kc com índices de vegetação são específicas das condições dos estudos, que a correlação varia consoante a cobertura e humidade da camada superior do solo, e que o seu desenvolvimento e aplicação têm de ter em conta a cultura e a sua região específica. Por outro lado, a DR veio a mostrar-se uma excelente ferramenta para analisar grande áreas, possibilitando a obtenção de amostras de grande resolução espacial e a definição das diferentes fases fenológicas das culturas em tempo real. Graças às imagens utilizadas do satélite sentinel-2, com resolução temporal de 2 a 3 dias e espacial de 10 m, foi possível identificar variação do NDVI em cada parcela com uma boa precisão ao longo do ciclo vegetativo. A plataforma GEE por fornecer catálogos públicos de dados geoespaciais, de uso gratuito, e permitir a sua manipulação em tempo real sem ser necessário exportar dados, veio a tornar-se uma ferramenta fundamental neste trabalho, pois permitiu aumentar a automatização, uma vez que é o processo aplicado é relativamente demorado.
- **A utilização dos sistema de informação geográficos (SIG) para o estudo da distribuição espacial das necessidades de rega (NR):** permitiu combinar e gerir uma grande diversidade de informação espacial em camadas informativas, o que possibilitou organizar a informação de cada unidade homogénea de análise (UHA), fornecendo os dados para a realização do balanço hídrico (BH) e a obtenção dos mapas espaciais georreferenciados, caracterizando a

distribuição espacial cultural, edáfica e das NR para cada cultura presente no Perímetro de Rega do Lucefecit (PRL);

- **Utilização de valores médios:** a forma como se organizaram os dados, principalmente na aplicação de uma composição que agrupou as imagens de satélite numa imagem média a cada 16 dias do ano, veio a mostrar-se uma mais-valia porque permitiu melhorar a qualidade dos dados, reduzindo a variabilidade de informação recolhida pelo satélite e das interferências (ruído) de sinal, tal como a presença de nuvens e sombras, e ainda de outras interferências radiométricas, apesar de em situações pontuais não ter sido possível eliminar por completo estas interferências. O número muito reduzido de parcelas existentes para algumas culturas dificultou a determinação do seu comportamento fenológico e, conseqüentemente, da definição das suas fases, enquanto nas culturas com um maior número de parcelas, possibilitou obter curvas médias das séries temporais de NDVI mais ajustadas à realidade;
- O método desenvolvido consegue captar o efeito da distribuição espacial dos solos, das culturas e dos sistemas de rega, no uso da água e espera-se que possa vir a constituir uma solução para a gestão da água de rega no PRL já que se revelou uma ferramenta útil para compreender a distribuição das NR das culturas e as suas causas, de modo a implementar melhorias ou inovações no perímetro hidroagrícola.

Em relação aos resultados obtidos no caso de estudo, destacam-se as seguintes conclusões:

- A partir dos dados simulados, o PRL consome 28,3% de água a mais (158,0 mm) do que a NGR anual simulada (399,6mm);
- A classe cultural que teve a maior NR anual foi o milho, com 760 mm, seguida do sorgo, com 459,2 mm, e da meloa, com 452,9 mm;
- Obtiveram-se valores simulados das NR anuais por cultura aproximados aos valores consumidos, tendo-se observado uma tendência para subestimar ligeiramente os valores em grande parte das culturas;
- A classe cultural mais representativa em termos das NR do período de ponta, responsável por 85,28% das NR de ponta do PRL (210,4 mm), é a classe do milho;
- Verificou-se que o projeto de dimensionamento do PRL tem uma capacidade superior ao atualmente utilizada;

- Pode concluir-se, deste modo, que a capacidade do PRL efetivamente não está a ser totalmente utilizada sendo possível aumentar a área regada utilizando culturas mais exigentes em rega, com sistemas culturais mais intensivos.

Considera-se que os objetivos propostos inicialmente foram alcançados com êxito, tendo-se desenvolvido um método que permite a estimação das NGR, ao nível de um perímetro hidroagrícola, com recurso a métodos de deteção remota e sistemas de informação geográficos, Apresentam-se, por último, as perspetivas identificadas para trabalhos futuros, relacionadas com a estimação da evapotranspiração cultural a partir da utilização de satélites:

- Obter relações de  $K_c$ \_NDVI validadas para mais culturas e regiões do país;
- Complementar o método com informação recolhida de outros tipos de sensores, tais como sensores com banda térmica, de modo a obter outros índices de vegetação e a relacioná-los com o  $K_c$ .

## 6. Referências bibliográficas

- ABL. (2021). Dados da distribuição espacial das parcelas, das culturas, dos sistemas de rega, os consumos, do o caudal fictício contínuo de água, dos limites do perímetro e das infraestruturas. *Associação beneficiários do lucefecit*.
- Abreu, J. (2018). *Agrometeorologia - Aplicação da Meteorologia para Maximizar a Produção Agrícola*. Agrobook. <https://www.bertrand.pt/livro/agrometeorologia-jose-paulo-de-melo-e-abreu/22616518>
- Acharya, S., Pandey, A., Mishra, S., & Chaube, U. (2016). GIS based graphical user interface for irrigation Management. In *Water Science and Technology: Water Supply* (Vol. 16, Issue 6). <https://doi.org/10.2166/ws.2016.081>
- Ahmad, M. D., Turrall, H., & Nazeer, A. (2009). Diagnosing irrigation performance and water productivity through satellite remote sensing and secondary data in a large irrigation system of Pakistan. In *Agricultural Water Management* (Vol. 96, Issue 4). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.09.017>
- Alface, A., Pereira, S., Filgueiras, R., & Cunha, F. (2019). Sugarcane spatial-temporal monitoring and crop coefficient estimation through NDVI Monitoramento espaço-temporal da cana-de-açúcar e estimativa do coeficiente de cultivo por meio do NDVI. In *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* (Vol. 23).
- Allani, M., Mezzi, R., Abdallah, W., Gharbi, A., Zouabi, A., Hedhli, K., Beji, R., Jemli, A., Mansouri Joumade, F., Afli, A., Hamza, M. E., Müller, H. W., & Sahli, A. (2018). *A Contribution to an Advisory Plan for Integrated Irrigation Water Management at Nebhana Dam System: from Research to Operational Support*. 3, 26–15. <https://doi.org/10.29007/vgpn>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 - Crop Evapotranspiration* (Issue January 1998).
- APA. (2015). *Plano Nacional da Água*. Revisão para o período 2016-2021. Obtido de [https://www.apambiente.pt/\\_zdata/Politicass/Agua/PlaneamentoGestao/PNA/2015/PNA2015.pdf](https://www.apambiente.pt/_zdata/Politicass/Agua/PlaneamentoGestao/PNA/2015/PNA2015.pdf)
- Ashraf, M. A., Maah, M. J., & Yusoff, I. (2011). Introduction to Remote Sensing of Biomass.

In *Biomass and Remote Sensing of Biomass* (Issue June 2014).  
<https://doi.org/10.5772/16462>

- Barker, J., Heeren, D., Neale, C., & Rudnick, D. (2018). Evaluation of variable rate irrigation using a remote-sensing-based model. In *Agricultural Water Management* (Vol. 203). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.022>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 1–13. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Belmonte, A. C., Jochum, A. M., García, A. C., Rodríguez, A. M., & Fuster, P. L. (2005). Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(3), 337–353. <https://doi.org/10.1007/s10795-005-5197-x>
- Calera, A., Campos, I., Osann, A., D’Urso, G., & Menenti, M. (2017). Remote sensing for crop water management: From ET modelling to services for the end users. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 17, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/s17051104>
- Cardoso, J. V. J. de C. (1965). *No Title*. Lisboa : Direcção Geral dos Serviços Agrícolas.
- Castro, R. A., & Verdial, A. J. (2011). Estratégias de rega deficitária na vinha em regiões de clima Mediterrânico. In *Actas “Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável”*,.
- Chartzoulakis, K., & Bertaki, M. (2015). Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change. In *Agriculture and Agricultural Science Procedia* (Vol. 4). The Authors. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.011>
- Chintapalli, S. M., Raju, P. V, Hakeem, K. A., & Jonna, S. (2000). Sustainable Management of Indian Irrigation Systems. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.: Vol. XXXIII* (Issue Part B7).
- Costa, T. C. B. A. (2013). *Alterações Climáticas e Biodiversidade: Avaliação da Vulnerabilidade e Medidas de Adaptação para a Herpetofauna Portuguesa*.
- COTR. (2021). Dados meteorológicos. Obtido 4 de Abril de 2021, de *Centro de Competências para o Regadio Nacional*. Beja, website: <https://www.cotr.pt/>
- Cunha, H. (2018). *Balanços Hídrico e Energético em Aproveitamentos Hidroagrícolas Uma nova abordagem para sistemas mistos. Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior*

- D'Urso, G., & Belmonte, A. C. (2006). Operative approaches to determine crop water requirements from earth observation data: Methodologies and applications. *AIP Conference Proceedings*, 852, 14–25. <https://doi.org/10.1063/1.2349323>
- D'Urso, G., Richter, K., Calera, A., Osann, M. A., Escadafal, R., Garatuza-Pajan, J., Hanich, L., Perdigão, A., Tapia, J. B., & Vuolo, F. (2010). Earth Observation products for operational irrigation management in the context of the PLEIADeS project. In *Agricultural Water Management* (Vol. 98, Issue 2). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.020>
- Dari, J., Brocca, L., Quintana-Seguí, P., Escorihuela, M. J., Stefan, V., & Morbidelli, R. (2020). Exploiting high-resolution remote sensing soil moisture to estimate irrigation water amounts over a Mediterranean region. In *Remote Sensing* (Vol. 12, Issue 16). <https://doi.org/10.3390/RS12162593>
- del Pozo, A., Brunel-Saldías, N., Engler, A., Ortega-Farias, S., Acevedo-Opazo, C., Lobos, G., Jara-Rojas, R., & Molina-Montenegro, M. (2019). Climate change impacts and adaptation strategies of agriculture in Mediterranean-climate regions (MCRs). In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/su11102769>
- DGADR. (2014). Caracterização da *Barragem de lucefecit*. Obtido 20 de Abril de 2021, de Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural website: <https://sir.dgadr.gov.pt/apresentacao>
- DGADR. (2016). *Lucefecit*. Obtido 20 de Abril de 2021, de Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural website: <https://sir.dgadr.gov.pt/expl-alentejo>
- EDIA. (2020). *Anuário Agrícola de Alqueva 2019*. Obtido 15 de Julho de 2021, de Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A., Beja. website: <https://www.edia.pt/pt/o-que-fazemos/apoio-ao-agricultor/anuario-agricola/>
- Elshaikh, A., Jiao, X., & Yang, S. (2018). Performance evaluation of irrigation projects: Theories, methods, and techniques. In *Agricultural Water Management* (Vol. 203). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.034>
- EOS. (2020). *NDVI: Perguntas Frequentes Para Compreender Melhor O Índice*. Acedido em

3 de Março de 2021 pelo <https://eos.com/pt/blog/ndvi-faq/>

- Etchanchu, J., Rivalland, V., Faroux, S., Brut, A., & Boulet, G. (2019). On the use of high resolution satellite imagery to estimate irrigation volumes and its impact in land surface modeling. In *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-126>
- Feng, Y., Cui, N., Zhao, L., Hu, X., & Gong, D. (2016). Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China. In *Journal of Hydrology* (Vol. 536). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.053>
- Fortes, P., Platonov, A., & Pereira, L. (2005). GISAREG - A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. In *Agricultural Water Management* (Vol. 77, Issues 1–3). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.042>
- GEE. (2021). Plataforma *Google Earth Engine - Code Editor*. Acedido em 1 de Maio de 2021, de <https://earthengine.google.com/>
- Gocic, M., Petković, D., Shamshirband, S., & Kamsin, A. (2016). Comparative analysis of reference evapotranspiration equations modelling by extreme learning machine. In *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 127). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.05.017>
- González-Piqueras, J. (2006). *Evapotranspiration de la Cubierta Vegetal mediante la Determinación del Coeficiente de Cultivo por Teledetección. Extensión a Escala Regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental*. 67(6), 14–21.
- Gouveia, H. (2017). *A importância dos climas de referência na simulação higrótérmica de elementos construtivos*. [Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia]. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/107481/2/214326.pdf>.
- INE. (2021). *Recenseamento Agrícola - Análise dos principais resultados - 2019* (I. P. Instituto Nacional de Estatística (ed.)). [www.ine.pt](http://www.ine.pt)
- IPCC. (2018). IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C. In *Ipcc - Sr15* (Vol. 2, Issue October). [www.environmentalgraphiti.org](http://www.environmentalgraphiti.org)
- Lechner, A. M., Foody, G. M., & Boyd, D. S. (2020). Applications in Remote Sensing to Forest



- Ecology and Management. In *One Earth* (Vol. 2, Issue 5). The Authors. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001>
- Maracchi, G., Pérarnaud, V., & Kleschenko, A. D. (2000). Applications of geographical information systems and remote sensing in agrometeorology. In *Agricultural and Forest Meteorology* (Vol. 103, Issues 1–2). [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00107-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00107-6)
- Matias, V. J. J. (2012). *Estudo comparativo de 2 alternativas de dimensionamento duma rede de rega : alta e baixa pressão*. [Universidade do Lisboa, Instituto Superior de Agronomia] <http://hdl.handle.net/10400.5/5299>
- Mehdizadeh, S., Behmanesh, J., & Khalili, K. (2017). Using MARS, SVM, GEP and empirical equations for estimation of monthly mean reference evapotranspiration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 139, 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.002>
- Melton, F. S., Johnson, L. F., Lund, C. P., Pierce, L. L., Michaelis, A. R., Hiatt, S. H., Guzman, A., Adhikari, D. D., Purdy, A. J., Rosevelt, C., Votava, P., Trout, T. J., Temesgen, B., Frame, K., Sheffner, E. J., & Nemani, R. R. (2012). Satellite irrigation management support with the terrestrial observation and prediction system: A framework for integration of satellite and surface observations to support improvements in agricultural water resource management. In *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* (Vol. 5, Issue 6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2214474>
- Mendes, P. G. (2013). *Desenvolvimento de uma aplicação sig no apoio à gestão da rega: o caso de estudo do alentejo (portugal)* [Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências]. <http://hdl.handle.net/10451/9876>
- Moeletsi, M. E., Walker, S., & Hamandawana, H. (2013). Comparison of the Hargreaves and Samani equation and the Thornthwaite equation for estimating dekadal evapotranspiration in the Free State Province, South Africa. In *Physics and Chemistry of the Earth* (Vol. 66). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.08.003>
- Muhammad Adnan, R., Chen, Z., Yuan, X., Kisi, O., El-Shafie, A., Kuriqi, A., & Ikram, M. (2020). Reference Evapotranspiration Modeling Using New Heuristic Methods. In *Entropy* (Vol. 22, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/e22050547>.
- Oliveira, I. (2011). *Técnicas de Regadio* (I. Oliveira (ed.); 2º Edição, Vols. 1–2). Copyright

2011. <https://www.tecnicasderegadio.info/>.
- Pandey, A., & Mogarekar, N. (2021). Development of A Spatial Decision System for Irrigation Management. In *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* (Vol. 2, Issue 2017). Springer India. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01305-2>.
- Pandey, P., Dabral, P., & Pandey, V. (2016). Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. In *International Soil and Water Conservation Research* (Vol. 4, Issue 1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.02.003>.
- Pastor, M., & Orgaz, F. (1994). Riego deficitario en olivar. *Agricultura* 746: 768-776.
- Pereira, J. (2018). *Sebenta de Detecção Remota e Análise de Imagens*.
- Pereira, L. (2004). *Necessidades de água e métodos de rega*. Publicações Europa-America.
- Pereira, L., Allen, R., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. In *Agricultural Water Management* (Vol. 147). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Pereira, L., Teodoro, P., Rodrigues, P., & Teixeira, J. (2003). *Irrigation Scheduling Simulation: The Model Isareg* (Issue January 2017). [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0129-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0129-8_10)
- PIMACON. (2018). *Catálogo de Sementes*. Consultado em 30 de Agosto de 2021 <https://www.pimacon.com/>
- Pôças, I., Calera, A., Campos, I., & Cunha, M. (2020). Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. In *Agricultural Water Management* (Vol. 233, Issue December 2019). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106081>
- Popova, Z., Eneva, S., & Pereira, L. S. (2006). Model Validation, Crop Coefficients and Yield Response Factors for Maize Irrigation Scheduling based on Long-term Experiments. In *Biosystems Engineering* (Vol. 95, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.05.013>
- Rawls, W. J., Brakensiek, C. L., & Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties. In *Transactions - American Society of Agricultural Engineers* (Vol. 25, Issue 5). <https://doi.org/10.13031/2013.33720>

- Reyes-González, A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Hay, C., & Ahiablame, L. (2017). Comparative Analysis of METRIC Model and Atmometer Methods for Estimating Actual Evapotranspiration. In *International Journal of Agronomy* (Vol. 2017). <https://doi.org/10.1155/2017/3632501>
- Rigollier, C., & Wald, L. (1999). *the Helioclim Project: From Satellite Images To Solar Radiation Maps: Vol. I.*
- Rocha, J., & Sousa, P. M. (2007). *Integração de Dados Estatísticos na Classificação de Imagens de Satélite Jorge Rocha e Paulo Morgado Sousa Estudos para o Planeamento Regional e Urbano nº 70 Centro de Estudos Geográficos Universidade de Lisboa. January.* <https://doi.org/10.13140/2.1.4483.2321>
- Rodrigues, P. N., Azevedo, S., & Paulo, V. (2011). *Optimização e análise do funcionamento de um sistema secundário de rega . Aplicação ao bloco do Alfundão Alto.* Em
- Rojas, R., Roldán Cañas, J., López Luque, R., Alcaide García, M., & Camacho Poyato, E. (1996). El riego del olivar en la provincia de Jaén (II): programación de riegos. In *Ingeniería del agua* (Vol. 3, Issue 1). <https://doi.org/10.4995/ia.1996.2691>
- Rolim, J., Navarro, A., Vilar, P., Saraiva, C., & Catalao, J. (2019). Crop data retrieval using earth observation data to support agricultural water management. In *Engenharia Agrícola* (Vol. 39, Issue 3). <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n3p380-390/2019>
- Rolim, J., Teixeira, J. L., Mendes, P., Catita, C., & Catalão, J. (2014). Cenários de Alteração Climática. In *Impacte Das Alterações Climáticas Nos Sistemas De Regadio Do Alentejo* (pp. 5–30).
- Rosa, R. (2018). *Modelação da evapotranspiração com o modelo SIMDualKc : Aplicação à rega de fruteiras , a consociações de culturas e a condições salinas , e ligação ao SIG para análise à escala do projecto de rega.* [Universidade de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia]. <http://hdl.handle.net/10400.5/17807>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. In *NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA* (Issue September 1972). [http://scholar.google.com/scholar?q=related:kfZY0xukQScJ:scholar.google.com/&hl=en&num=20&as\\_sdt=0,5%5Cnpapers2://publication/uuid/FB22B85B-B2F9-442E-AF63-](http://scholar.google.com/scholar?q=related:kfZY0xukQScJ:scholar.google.com/&hl=en&num=20&as_sdt=0,5%5Cnpapers2://publication/uuid/FB22B85B-B2F9-442E-AF63-)

58F3517012FC

- Rozenstein, O., Haymann, N., Kaplan, G., & Tanny, J. (2018). Estimating cotton water consumption using a time series of Sentinel-2 imagery. *Agricultural Water Management*, 207(May), 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.017>
- Schuckman, K., & Dutton, J. A. (2009). *Optical Sensors / GEOG 480: Exploring Imagery and Elevation Data in GIS Applications*. Acediso em 10 de Março de 2021. <https://www.e-education.psu.edu/geog480/node/494>
- Segovia-Cardozo, D., Rodríguez-Sinobas, L., & Zubezu, S. (2019). Water use efficiency of corn among the irrigation districts across the Duero river basin (Spain): Estimation of local crop coefficients by satellite images. In *Agricultural Water Management* (Vol. 212, Issue August 2018). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.042>
- ShaleTrak. (2017). *GIS, Mappingtle*. Acedido em 10 de Março de 2021. <https://shaletrak.com/services/>
- Shitu, A., Tadda, M., & Danhassan, A. U. (2018). Irrigation water management using smart control systems: A review. *Bayero Journal of Engineering and Technology*, 13(2), 1–12.
- Singh, V. (2015). GIS and Remote Sensing : New Technique for Spatial Planning and Environmental Management. In *Journal of Engineering Computer & Applied Science (JECAS)* (Vol. 4, Issue 11).
- SNIRH. (2021). *Albufeira de Lucefécit (22M/01A)*. [https://snirh.apambiente.pt/snirh/\\_dadosbase/site/simplex.php?OBJINFO=DADOS&FILTRA\\_BACIA=23&FILTRA\\_COVER=920123705&FILTRA\\_SITE=1627758752](https://snirh.apambiente.pt/snirh/_dadosbase/site/simplex.php?OBJINFO=DADOS&FILTRA_BACIA=23&FILTRA_COVER=920123705&FILTRA_SITE=1627758752)
- Sousa, A., & Silva, J. (2011). Fundamentos Teóricos de Detecção Remota. In *Universidade de Évora - Departamento de Engenharia Rural*.
- SUHET. (2015). SENTINEL-2 User Handbook and Exploitation Tools (SUHET). In European Space Agency (Ed.), *European Space Agency* (Issue 1).
- terraDrone. (2019). *Agricultura de precisão*. Acedido em 24 de Abril de 2021. <https://www.terradrone.pt/pt/agricultura-precisao-drone/>
- Teixeira, J. L. (2021). *Manual Programa ISAREG* (Issue 8) [Universidade de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia]. Acedido em 05 de Janeiro de 2021

<http://home.isa.utl.pt/~jlteixeira/index.htm>

Texas, U. of. (2014). *Types of Radiation*. Acedido em 24 de Abril de 2021.  
<http://ch301.cm.utexas.edu/atomic/#EM/radiation.html>

Todorovic, M., & Steduto, P. (2003). A GIS for irrigation management. In *Physics and Chemistry of the Earth* (Vol. 28, Issues 4–5). [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00023-8)

Toureiro, C., Serralheiro, R., Shahidian, S., & Sousa, A. (2017). Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. In *Agricultural Water Management* (Vol. 184). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.010>

UN-Water, P. (2010). Climate Change Adaptation: The Pivotal Role of Water. In *Ginebra, Suíza* (Vol. 01).

UNESCO. (2020). *UN-Water, 2020: United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. UNESCO.

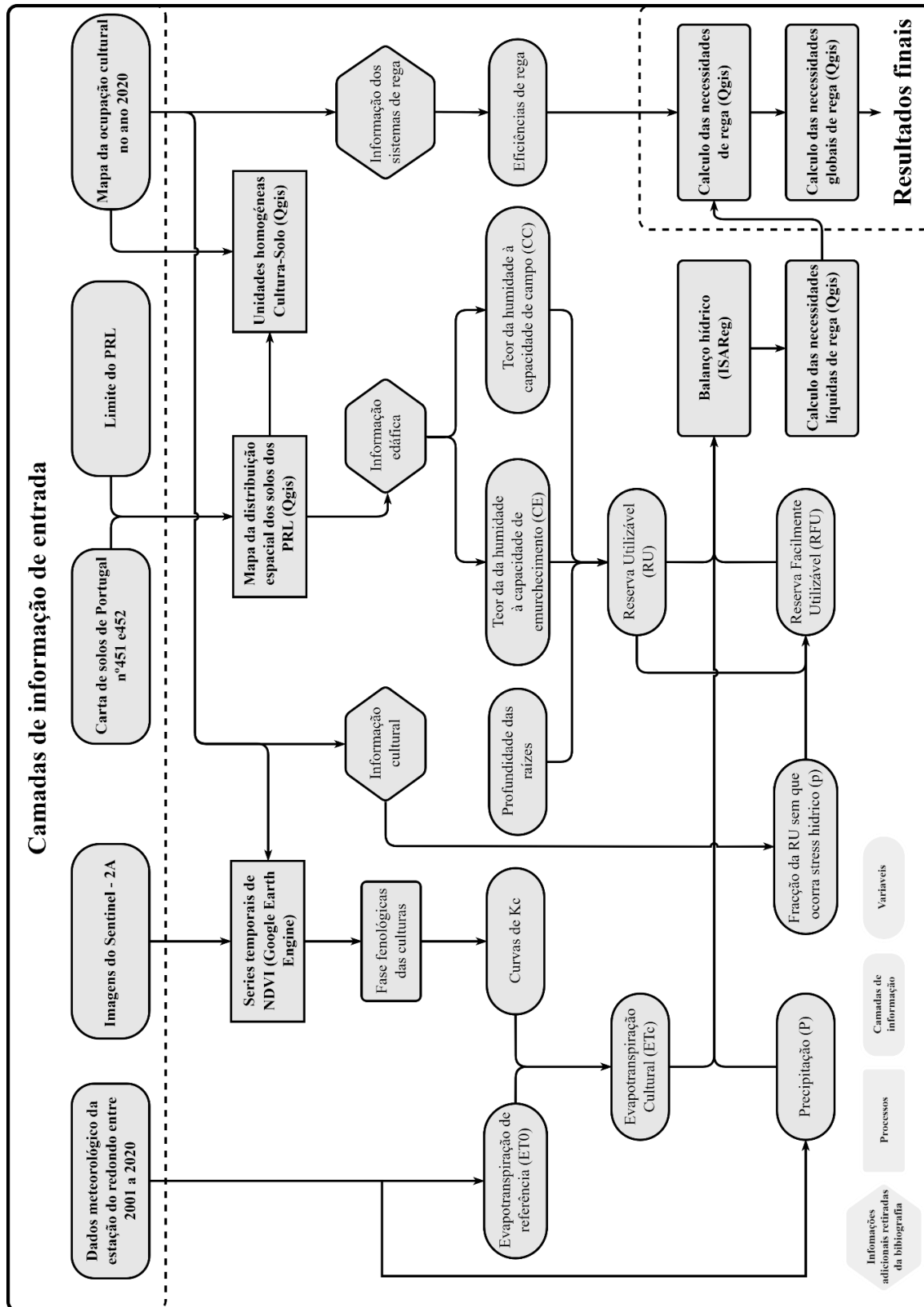
Veysi, S., Naseri, A., Hamzeh, S., & Bartholomeus, H. (2017). A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. In *Agricultural Water Management* (Vol. 189). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.016>

Vilar, P. M. do C. (2015). *Utilização de Imagens de Detecção Remota para Monitorização das Culturas e Estimação das Necessidades de Rega* (Issue October 2018) [Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências]. <http://hdl.handle.net/10451/20677>

VIVAS, S. (2021). *CATÁLOGO 2021- SEMENTES VIVAS*. Consultado em 30 de Agosto de 2021. <https://www.sementesvivas.bio/pt/>

# 7. Anexos

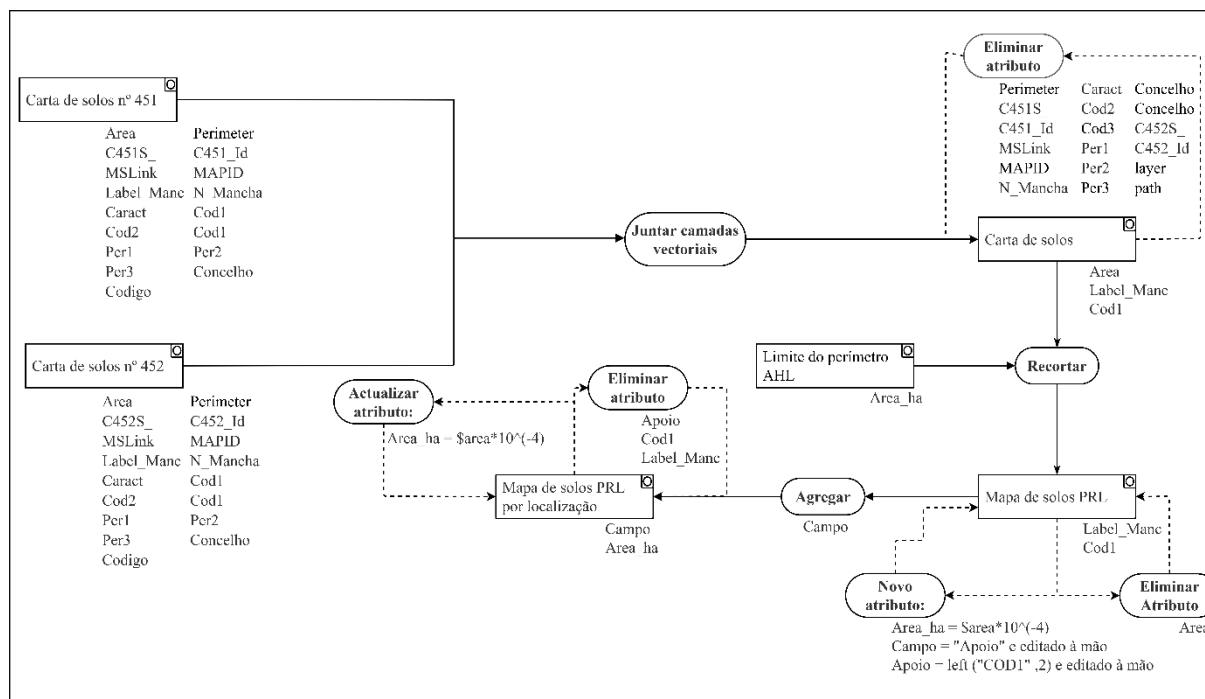
Anexo I. Fluxograma completo dos métodos utilizados.



Anexo II. Constantes meteorológicas relativas ao ano 2020 para a estação meteorológica do Redondo. Valores médios mensais e anuais da (T<sub>med</sub>) temperatura média (°C), da (HR<sub>med</sub>) humidade relativa média (%), (RSG) da radiação solar global (kJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>), (VV<sub>med</sub>) da velocidade média do vento (m.s<sup>-1</sup>) e (P) da precipitação (COTR, 2021).

Meses	T <sub>med</sub> (°C)	HR <sub>med</sub> (%)	RSG (kJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> )	VV <sub>med</sub> (m.s <sup>-1</sup> )	P (mm)	ET <sub>0</sub> (mm)
Janeiro	9,7	84,8	7970,6	1,4	1,9	1,4
Fevereiro	12,9	79,4	11955,0	1,0	0,1	2,2
Março	13,2	74,8	14905,6	1,6	1,9	2,7
Abril	14,6	81,3	15955,9	1,4	3,3	2,8
Mai	20,4	68,2	23095,9	1,1	3,0	4,8
Junho	21,4	59,2	25042,1	1,4	0,0	5,5
Julho	27,8	45,5	26213,8	1,1	0,8	6,4
Agosto	24,9	52,5	23860,3	1,4	0,0	5,6
Setembro	22,8	58,2	17053,5	1,0	2,2	3,4
Outubro	16,4	70,3	13080,6	1,1	4,2	2,9
Novembro	14,2	86,1	7863,4	1,1	4,0	1,5
Dezembro	10,1	88,8	6582,8	1,1	2,4	1,1
<b>Anual</b>	<b>17,4</b>	<b>70,7</b>	<b>16150,7</b>	<b>1,2</b>	<b>2,0</b>	<b>3,4</b>

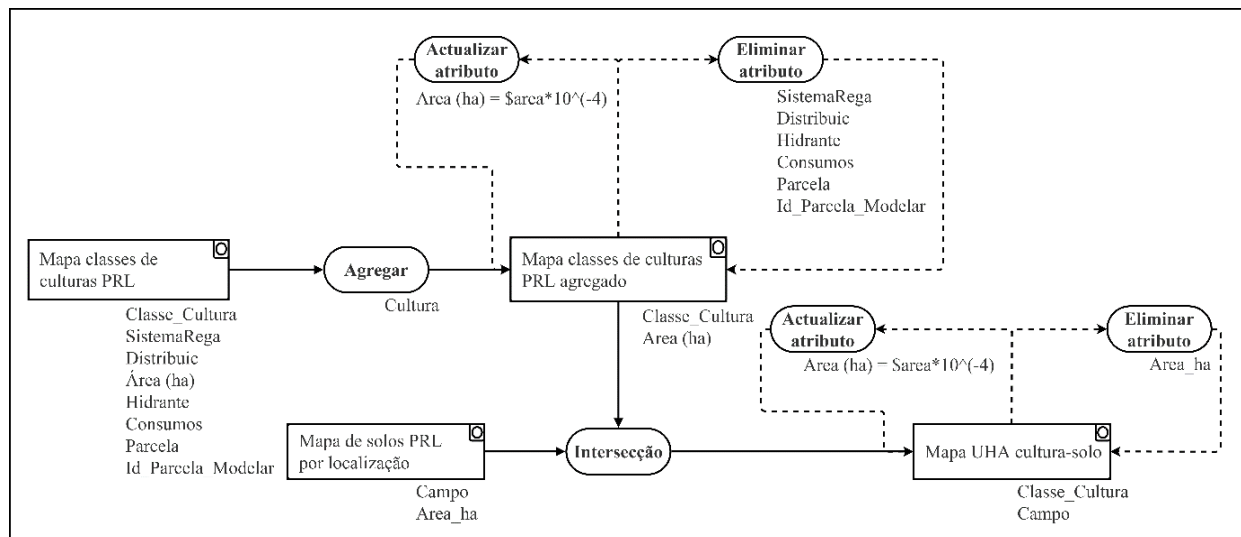
Anexo III. Fluxograma do processo vetorial utilizado para a construção da camada de informação relativo à distribuição espacial dos solos existentes mais representativos no PRL.



Anexo IV. Parcelas descartadas da modelação por falta de representatividade.

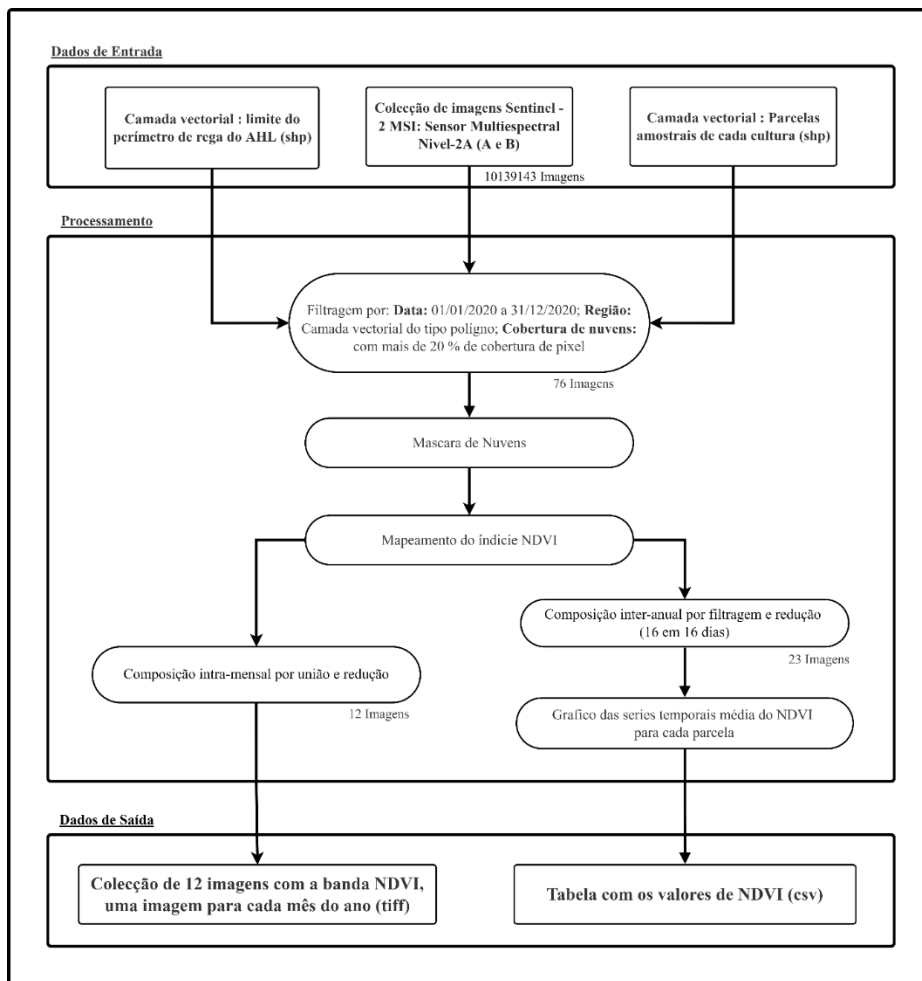
ID da parcela	Cultura Instalada	Área inscrita (ha)	Área da parcela (ha)	Percentagem da área instalada na parcela
19	Hortas	0,02	0,82	2%
43	Hortas	0,25	7,60	3%
88	Hortas	0,08	0,55	15%
143	Hortas	0,02	0,61	3%
183	Hortas	0,02	3,37	1%
213	Hortas	0,25	1,27	20%
304	Hortas	0,10	4,38	2%
305	Hortas	0,05	1,34	4%
193	Feijão frade	1	5,09	20%
209	Luzerna	0,50	2,57	19%
110	Pomar	0,50	0,53	94%
223	Jardim	0,06	0,91	7%
105	Desconhecida	0	0,52	0%
124	Desconhecida	0	0,53	0%
179	Desconhecida	0	0,58	0%
211	Desconhecida	0	0,83	0%

Anexo V. Fluxograma do processo para definição das UHA cultura-solo.

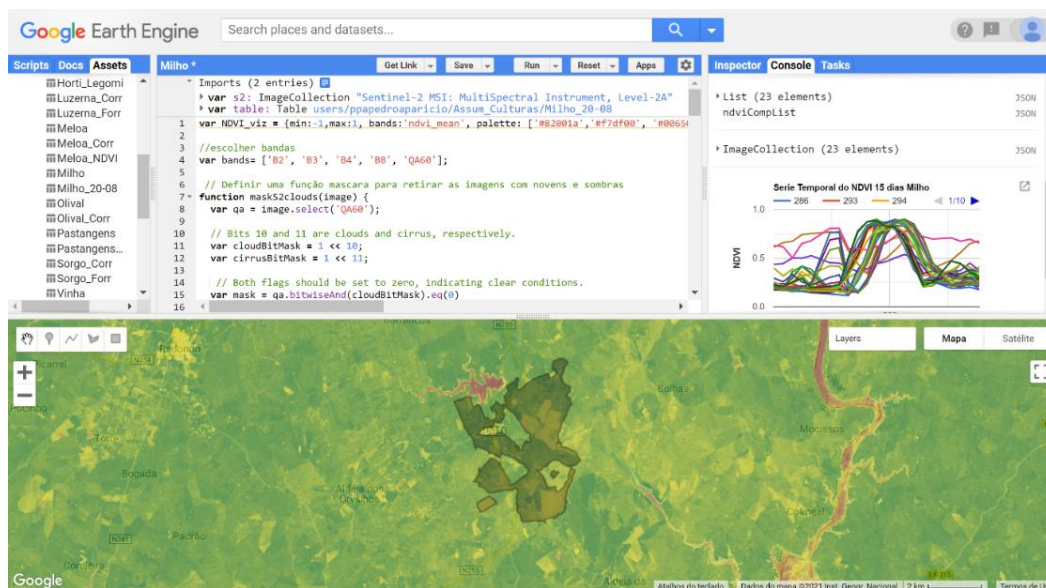




Anexo VI. Fluxograma das operações envolvidas na extração das imagens de satélite para identificação e seleção das parcelas mais representativas e para a obtenção das series temporais de NDVI por parcela.



Anexo VII. Editor de Código GEE JavaScript de utilização aberta



Anexo VIIIa. Código utilizado para a determinação das amostras de NDVI, baseado no método de composição intra-anual por união e redução para coleção de imagens, adaptado para uma escala mensal.

```
// Importação das camadas de informação
1 var s2 = ee.ImageCollection ( "COPERNICUS/S2_SR" ),
2   table = ee.FeatureCollection ( "Camada vectorial do perimetro em estudo" );

// Definição dos parâmetros de visualização
3 var RGB_viz = { min:0, max:0.6, bands: [ 'B4_mean', 'B3_mean', 'B2_mean' ], gamma: 1.8070000000000002 };
4 var NDVI_viz = { min:-1, max:1, bands: 'ndvi_mean', palette: [ '#82001a', '#f7df00', '#00650f' ] };

//Escolher bandas que serão utilizadas
5 var bands= [ 'B2', 'B3', 'B4', 'B8', 'QA60' ];

// Definir uma função mascara para retirar os pixels com nuvens e sombras
6 function maskS2clouds ( image ) {
7   var qa = image.select ( 'QA60' );
8   var cloudBitMask = 1 << 10; // Reclassificar Bits 10 (nuvens) com o valor 1.
9   var cirrusBitMask = 1 << 11; // Reclassificar Bits 11 (sombra) com o valor 1.
10  var mask = qa.bitwiseAnd ( cloudBitMask ).eq ( 0 ).and ( qa.bitwiseAnd ( cirrusBitMask ).eq ( 0 ));
11  return image.updateMask ( mask ).divide ( 10000 ).copyProperties ( image, image.propertyNames ( ) );}

// Redução da coleção de imagens
12 var img = s2
13   .filterBounds ( table )
14   .select ( bands )
15   .filterDate ( '2020-01-01', '2020-12-31' )
16   .filter ( ee.Filter.lt ( 'CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20 )) /* Retirar as imagens que têm mais de 20%
                                                                dos pixels cobertos de nuvens*/
17   .map ( function ( cc ) { return cc.set ( 'month', ee.Image ( cc ).date ( ).get ( 'month' )); } ) // Adicionar a
                                                                propriedade mês a cada imagem
18   .map ( maskS2clouds ); // retirar os pixels cobertos de nuvens e sombra das restantes imagens

// Criar uma banda chamada ndvi
19 var addNDVI = function ( aa ) { var ndvi = aa.normalizedDifference ( [ 'B8', 'B4' ] ).rename ( 'ndvi' );
20 return aa.addBands ( ndvi );};

// Acrescentar essa banda à cada imagem da coleção de imagens
21 var with_ndvi = ee.ImageCollection ( img ).map ( addNDVI );

/* Criação de uma lista de composição de imagens em que se obtém uma imagem média a partir de toda as
imagens existentes em cada mês do ano*/
22 var distinctmonth = with_ndvi.distinct ( 'month' ).sort ( 'month' ); // Identificar o mês de cada imagem
```

```

23 var filter = ee.Filter.equals ({ leftField: 'month', rightField: 'month' }); // Filtrar todas as imagens que têm o
                                                                    mesmo mês
24 var join = ee.Join.saveAll ( 'month_match' ); /* Criar uma propriedade onde será armazenada a informação das
                                                                    imagens filtradas para cada mês*/

25 var joiningimg = join.apply ( distincmonth, with_ndvi, filter );
26 var imgCompList = joiningimg.map ( function ( bb ) {
27   return ee.ImageCollection.fromImages ( bb.get ( 'month_match' ) )
28     .reduce ( ee.Reducer.mean () ) /*Reduzir para uma imagem média todas as imagens com o mesmo mês
                                                                    correspondente*/
29   .copyProperties ( bb, [ 'month' ] );
30 });

    // Converter a lista em uma coleção de imagens
31 var imgCompCol = ee.ImageCollection ( imgCompList);

    //Obter cada imagem da coleção individualmente
32 var Jan = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 1 ).mean ();
33 var Fev = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 2 ).mean ();
34 var Mar = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 3 ).mean ();
35 var Abr = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 4 ).mean ();
36 var Mai = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 5 ).mean ();
37 var Jun = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 6 ).mean ();
38 var Jul = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 7 ).mean ();
39 var Ago = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 8 ).mean ();
40 var Set = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 9 ).mean ();
41 var Out = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 10 ).mean ();
42 var Nov = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 11 ).mean ();
43 var Dez = imgCompCol.filterMetadata ( 'month', 'equals', 12 ).mean ();

    // Resultados visíveis em formato texto e em formato imagem
44 print ( “nome do mês”, ‘ “nome do mês” ’ );
45 Map.addLayer ( “nome do mês”, NDVI_viz, “nome do mês”_NDVI ’ );
46 Map.addLayer ( “nome do mês”, RGB_viz, “nome do mês”_RGB ’ );
    //Exportar
47 Export.image.toDrive ( {
48   image: ”Nome da imagem a exportar”,
49   description: 'Imagem_NDVI_2020_'”Nome do mês”,
50   scale: 10,
51   crs: 'EPSG:4326',
52   folder: 'DadosGEE' });

```

Anexo VIIIb. Código utilizado na obtenção da series temporais de NDVI de cada parcela para cada classe cultural, baseado no método de composição inter-anual por filtragem e redução para coleção de imagens, adaptado para uma escala de 16 dias.

```

// Importação das camadas de informação
1 var s2 = ee.ImageCollection ( "COPERNICUS/S2_SR" ),
2   table = ee.FeatureCollection ( "Camada vectorial das parcelas de uma classe cultural" );

// Definição dos parâmetros de visualização
3 var NDVI_viz = { min:-1, max:1, bands: 'ndvi_mean', palette: [ '#82001a', '#f7df00', '#00650f' ] };

//Escolher bandas que serão utilizadas
4 var bands= [ 'B2', 'B3', 'B4', 'B8', 'QA60' ];

// Definir uma função mascara para retirar os pixels com nuvens e sombras
5 function maskS2clouds ( image ) {
6   var qa = image.select ( 'QA60' );
7   var cloudBitMask = 1 << 10; // Reclassificar Bits 10 (nuvens) com o valor 1.
8   var cirrusBitMask = 1 << 11; // Reclassificar Bits 11 (sombra) com o valor 1.
9   var mask = qa.bitwiseAnd ( cloudBitMask ).eq ( 0 ).and ( qa.bitwiseAnd ( cirrusBitMask ).eq ( 0 ));
10  return image.updateMask ( mask ).divide ( 10000 ).copyProperties ( image, image.propertyNames ( ) );}

// Redução da coleção de imagens
11 var img = s2
12   .filterBounds ( table )
13   .select ( bands )
14   .filterDate ( '2020-01-01', '2020-12-31' )
15   .filter ( ee.Filter.lt ( 'CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20 )) /* Retirar as imagens que têm mais de 20%
                                                                dos pixels cobertos de nuvens*/
16   .map ( maskS2clouds ) // retirar os pixels cobertos de nuvens e sombra das restantes imagens;

// Criar uma banda chamada ndvi
17 var addNDVI = function (aa) { var ndvi = aa.normalizedDifference ( [ 'B8', 'B4' ] ).rename ( 'ndvi' );
18 return aa.addBands ( ndvi );};

// Acrescentar essa banda à cada imagem da coleção de imagens
19 var NDVI = ee.ImageCollection ( img ).map ( addNDVI );

// Criação de uma coleção de imagens só com a banda NDVI
20 var ndvicol = ee.ImageCollection ( NDVI ).select ( 'ndvi' );

// Criação de uma lista de sequência do dia do ano entre 1 a 365 dias em cada 16 dias
21 var doyList = ee.List.sequence ( 1, 365, 16 );

```

```

/* Criação de uma lista de composição de imagens em que se obtém uma imagem média a partir de toda as
imagens existentes em cada 16 dias do ano*/
22 var ndviCompList = doyList.map ( function ( startDoy ) {
23   startDoy = ee.Number ( startDoy ); // Assegura que startDoy é um número
24   return ndvicol
25     .filter ( ee.Filter.calendarRange ( startDoy, startDoy.add ( 15 ), 'day_of_year' )) /* filtrar imagens pelo
período de dias, a começar no corrente dia inicial (corresponde ao
primeiro dia do ano de cada 16 dias) e terminar 15 dias depois*/
26     .reduce ( ee.Reducer.mean () ) //Reduzir o resultado numa imagem colecção pela média
27     .set ( 'DOY', ee.Number ( startDoy ));
28   });

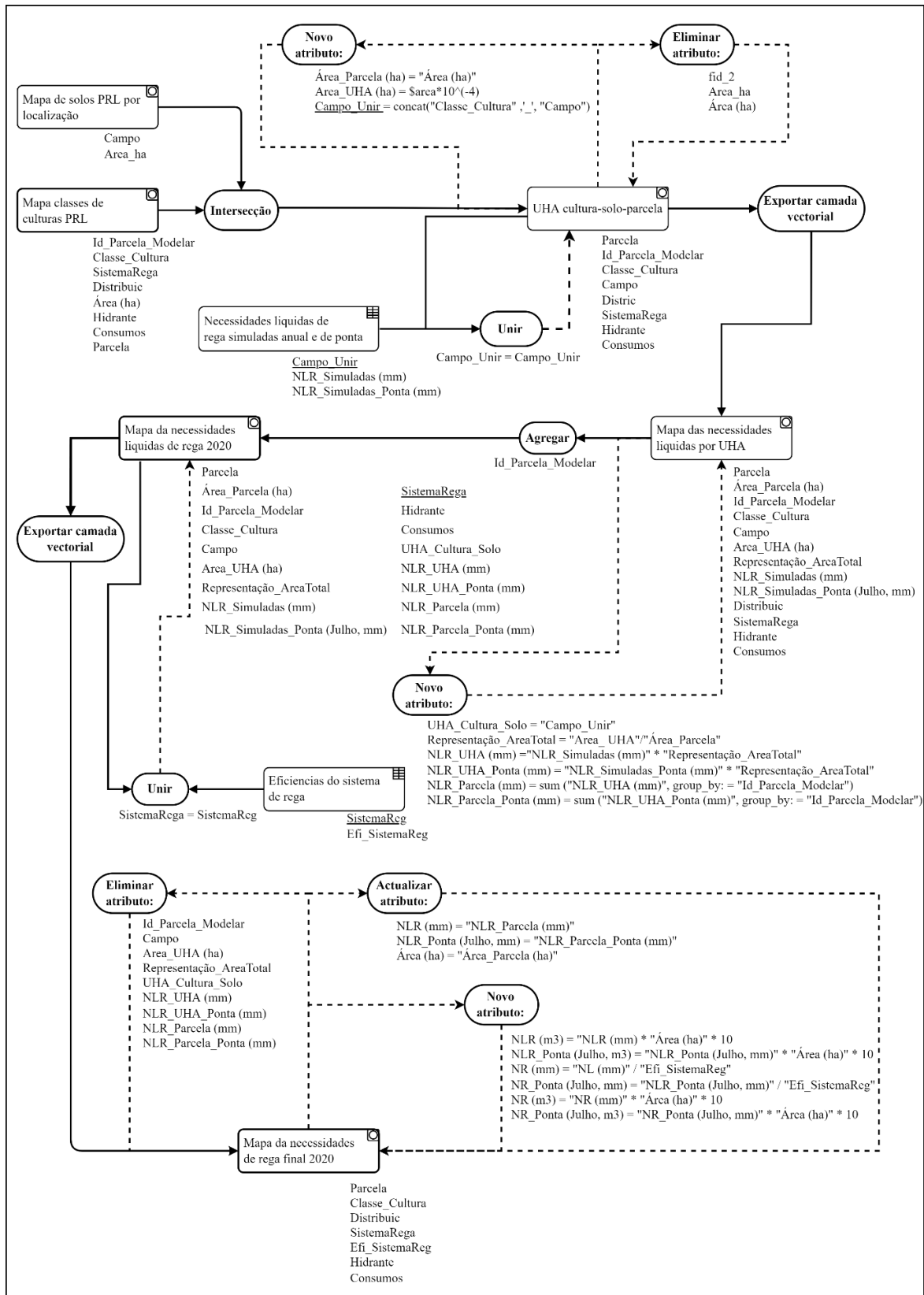
// Converter a lista em uma colecção de imagens
29 var ndviCompCol = ee.ImageCollection.fromImages ( ndviCompList );

// Resultados visíveis em formato texto e em formato imagem
30 print ( ndviCompList, 'ndviCompList' );
31 Map.addLayer ( ndviCompCol,NDVI_viz, 'imgComCol' );

// Criar um gráfico com as series temporais de NDVI ao longo do ano para cada parcela da classe cultural.
32 var chart =
33   ui.Chart.image
34     .seriesByRegion ( {
35       imageCollection: ndviCompCol,
36       band: 'ndvi_mean',
37       regions: table,
38       reducer: ee.Reducer.median (),
39       scale: 10,
40       seriesProperty: 'fid',
41       xProperty: 'DOY' })
42     .setOptions ( {
43       title: 'Serie Temporal do NDVI a cada 16 dias do ano para a classe “Nome da classe cultural” ',
44       hAxis: { title: 'Dia do Ano', titleTextStyle: { italic: false, bold: true }, format: '' },
45       vAxis: { title: 'NDVI', titleTextStyle: { italic: false, bold: true } },
46       lineWidth: '' });
47   print ( chart );

```

Anexo IX. Fluxograma do processamento vetorial utilizado na criação do mapa das necessidades de rega para todas as parcelas do PRL



Anexo Xa. Resumos da caracterização dos parâmetros culturais

<b>a) Cereais O-I</b>		Data de sementeira:		13 de Setembro
<b>Fases de crescimento</b>	Inicial	Média	Final	
<b>Dias após sementeira</b>	0	64	254	
<b>Défi ce permissível (%)</b>	55	55	55	
<b>Profundidade radicular (m)</b>	0,05	1	1	
<b>Coeficiente cultural</b>	0,3	1,02	0,25	

<b>b) Milho</b>		Data de sementeira:		22 de Maio
<b>Fases de crescimento</b>	Inicial	Média	Final	
<b>Dias após sementeira</b>	0	64	144	
<b>Défi ce permissível (%)</b>	55	55	55	
<b>Profundidade radicular (m)</b>	0,1	1	1	
<b>Coeficiente cultural</b>	0,3	1,16	0,35	

<b>c) Sorgo</b>		Data de sementeira:		24 de Maio
<b>Fases de crescimento</b>	Inicial	Média	Final	
<b>Dias após sementeira</b>	0	48	128	
<b>Défi ce permissível (%)</b>	55	55	55	
<b>Profundidade radicular (m)</b>	0,1	1	1	
<b>Coeficiente cultural</b>	0,5	1,12	0,99	

<b>d) Vinha</b>		Início do ciclo cultural:		5 de Março
<b>Fases de crescimento</b>	Inicial	Média	Final	
<b>Dias após sementeira</b>	0	80	208	
<b>Défi ce permissível (%)</b>	45	45	45	
<b>Profundidade radicular (m)</b>	1	1	1	
<b>Coeficiente cultural</b>	0,3	0,64	0,4	

<b>e) Ervilha</b>		Data de sementeira:		13 de Setembro
<b>Fases de crescimento</b>	Inicial	Média	Final	
<b>Dias após sementeira</b>	0	64	126	
<b>Défi ce permissível (%)</b>	40	40	40	
<b>Profundidade radicular (m)</b>	0,1	0,6	0,6	
<b>Coeficiente cultural</b>	0,5	1,03	0,3	

<b>f) Melo a</b>		Data de sementeira:		22 de Abril
<b>Fases de crescimento</b>	Inicial	Média	Final	
<b>Dias após sementeira</b>	0	64	144	
<b>Défi ce permissível (%)</b>	40	40	40	
<b>Profundidade radicular (m)</b>	0,1	0,8	0,8	
<b>Coeficiente cultural</b>	0,5	1,02	0,74	

<b>g) Pastagens</b>		Data de sementeira:		1 de Janeiro
<b>Fases de crescimento</b>	Inicial	Média	Final	
<b>Dias após sementeira</b>	0	160	352	
<b>Défi ce permissível (%)</b>	60	60	60	
<b>Profundidade radicular (m)</b>	0,5	0,5	0,5	
<b>Coeficiente cultural</b>	0,91	0,7	0,91	

<b>h) Olival</b>		Início do ciclo cultural:		1 de Janeiro
<b>Fases de crescimento</b>	Inicial	Média	Final	
<b>Dias após sementeira</b>	0	48	352	
<b>Défi ce permissível (%)</b>	65	65	65	
<b>Profundidade radicular (m)</b>	1,2	1,2	1,2	

Anexo Xb. Valores Kc publicados por Pastor & Orgaz (1994), ajustados à cobertura do solo e alpardados à serie temporal de NDVI para a classe do olival

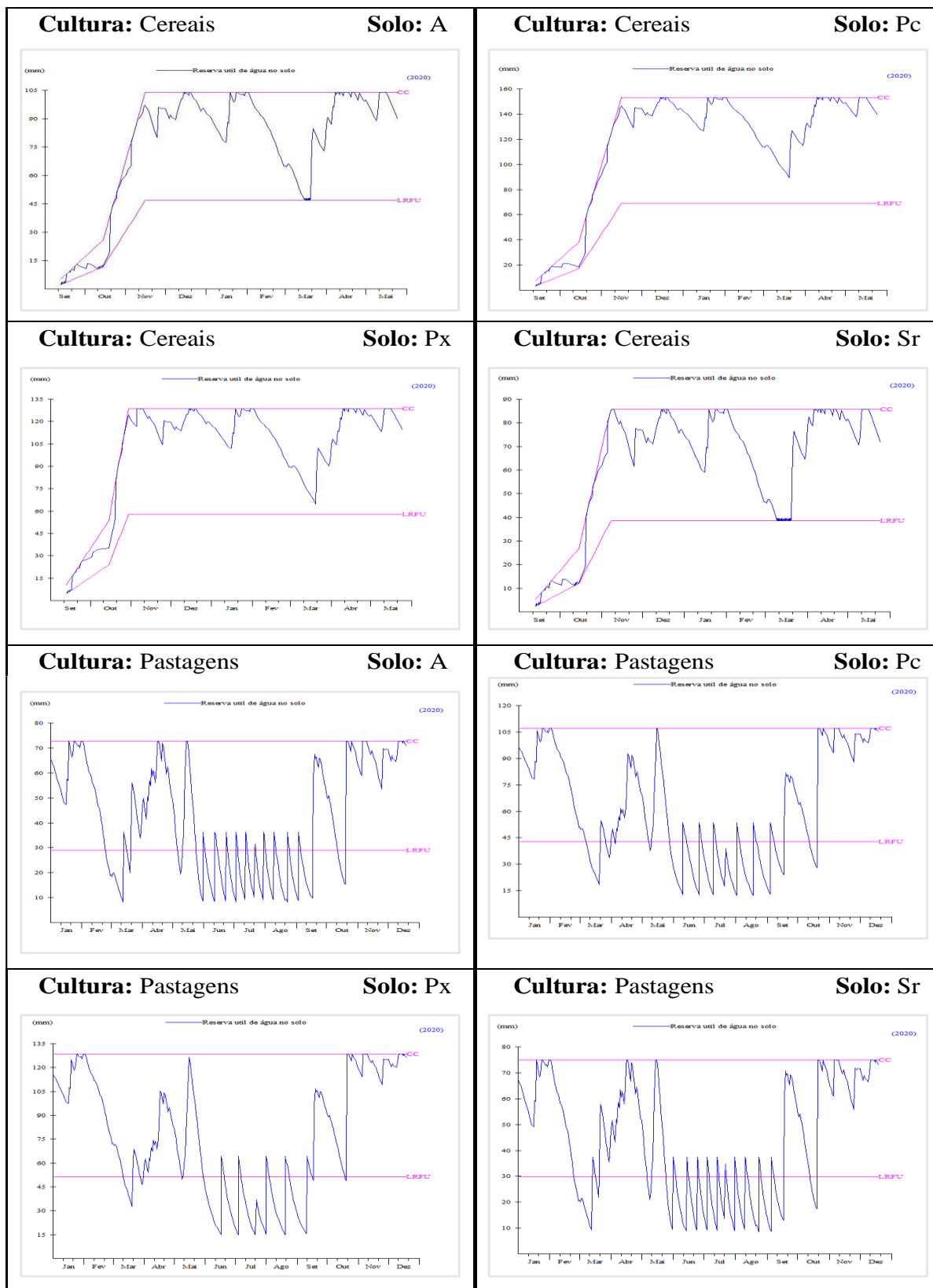
<b>Dias após 1 Jan</b>	0	17	33	49	65	97	113	129	145	161	177
<b>Coefficiente cultural</b>	0,25	0,25	0,25	0,33	0,30	0,30	0,30	0,28	0,28	0,25	0,25
<b>Dias após 1 Jan</b>	193	209	225	241	257	273	289	305	321	337	353
<b>Coefficiente cultural</b>	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,30	0,30	0,33	0,25	0,25

Anexo XI. Critérios para o ajustamento dos valores de Kc tabelados em Allen *et al.* (1998) para a fase inicial, média e final (adaptado de Allen *et al.*, 1998).

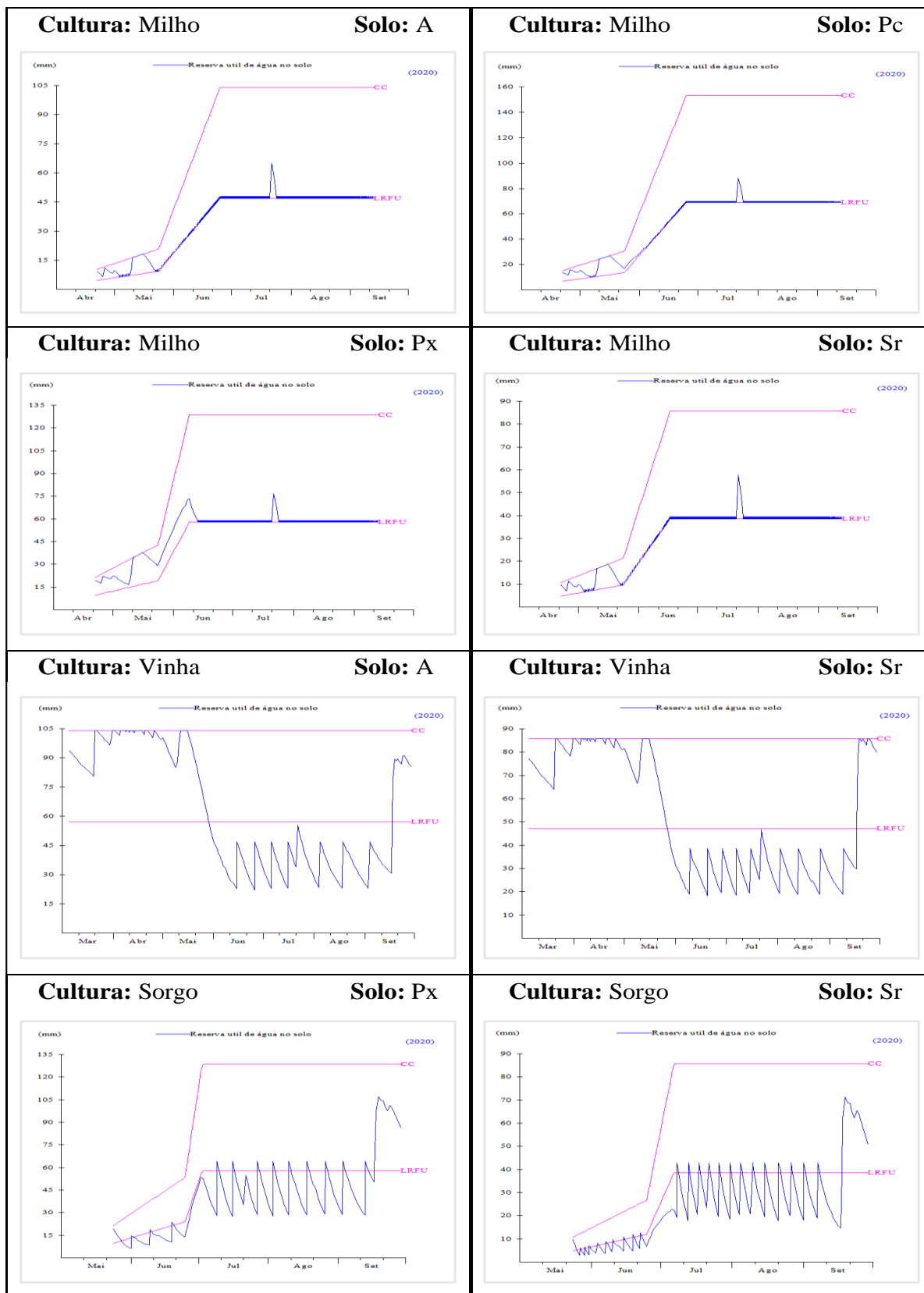
<b>Fase</b>	<b>Critério</b>	<b>Ajustamento</b>
<b>K<sub>cini</sub></b>	Em função da média interna entre eventos de precipitação/rega, poder da evapotranspiração de referência e da importância dos eventos de precipitação.	Não efectuado por não existirem eventos de grande precipitação significativos nesta fase.
<b>K<sub>cmed</sub></b>	Aplicado em climas com HR mínima diferente de 45% e uma velocidade do vento (u) superior ou inferior a 2 m s <sup>-1</sup> e para uma altura média da planta h.	$K_{c_{med}} = K_{c_{med} (tabulado)} + [0,04 (u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3}$
<b>K<sub>cfin</sub></b>	Aplicado em climas com HR mínima diferente de 45% e uma velocidade do vento (u) superior ou inferior a 2 m s <sup>-1</sup> , para uma altura média da planta h e para valores de K <sub>cfin</sub> tabulados superiores 0,45.	$K_{c_{med}} = K_{c_{med} (tabulado)} + [0,04 (u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3}$



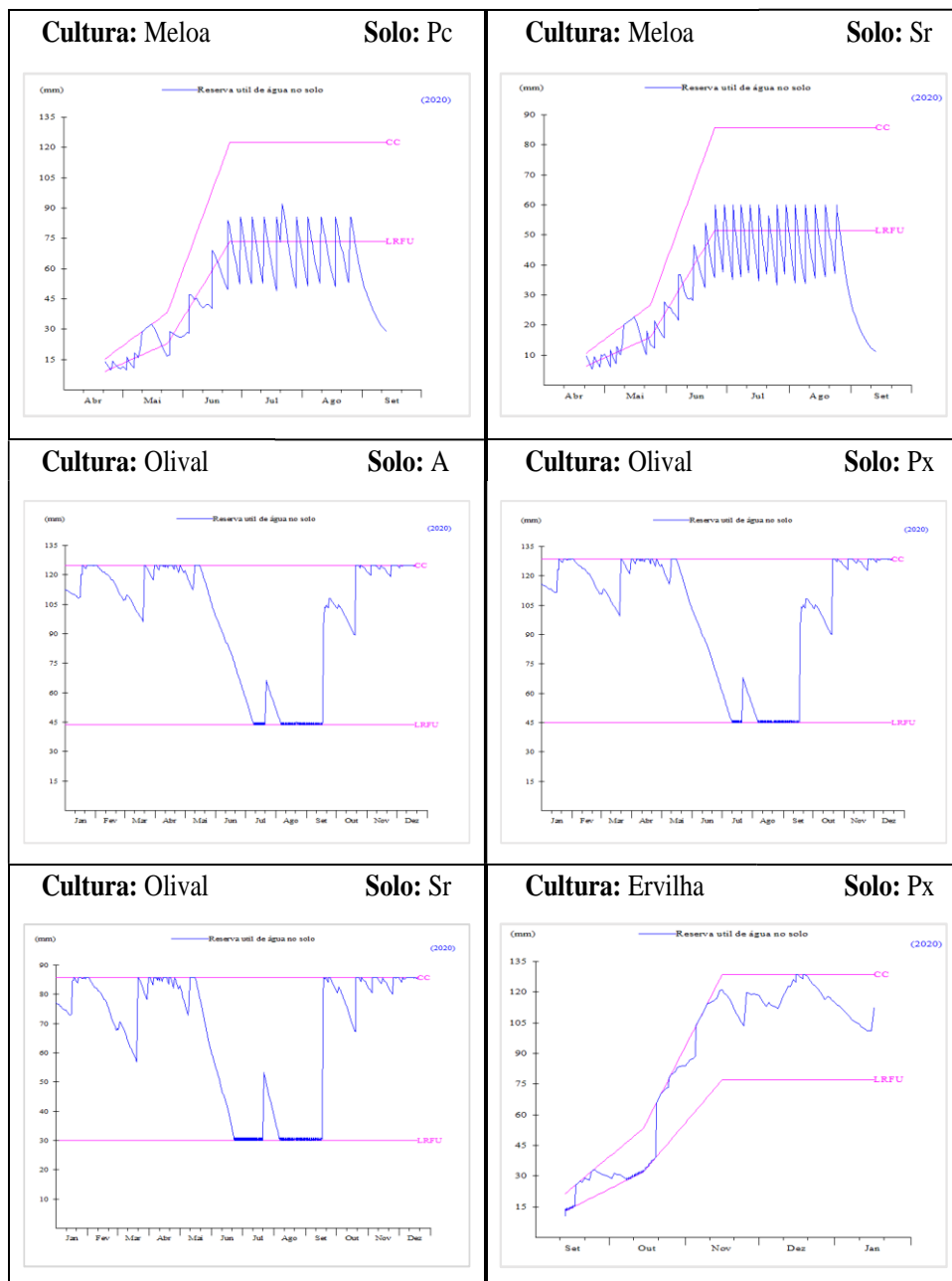
Anexo XIIa. Gráficos representando o balanço hídrico, obtido a partir do modelo ISAREG para as classes culturais dos cereais de outono-inverno e das pastagens em cada família de solo correspondente.



Anexo XIIIb. Gráficos representando o balanço hídrico, obtido a partir do modelo ISAREG para as classes culturais do milho, da vinha e do sorgo, em cada família de solo correspondente.



Anexo XIIc. Gráficos representando o balanço hídrico, obtido a partir do modelo ISAREG para as classes culturais da meloa, do olival e da ervilha, em cada família de solo correspondente.



Anexo XIII. Glossário:

**Aproveitamento Hidroagrícola** – É o conjunto das obras para aproveitamento de água do domínio público para rega, drenagem, enxugo e defesa dos terrenos agrícolas, que visa a intensificação sustentada da atividade agrícola da área abrangida. Estas obras estão sujeitas a um regime jurídico específico, sendo particularmente importante o Decreto-lei n.º 269/82, de 10 de julho, com as alterações introduzidas pelo Decreto-lei n.º 86/2002, de 6 de abril.

**Caudal fictício contínuo** – Caudal necessário para satisfazer as necessidades de rega durante o período de ponta, 24 por dia.

**Cota do coroamento** – Altura do elemento de remate, colocado na parte superior de uma parede ou de um edifício, no caso das barragens equivale à altura da própria barragem.

**Cota do espelho de água** – Altura da superfície contínua de água exposta à atmosfera

**Cota piezométrica** – É a energia potencial de pressão por unidade de peso do fluido relativamente a um dado plano horizontal de referência.

**Evapotranspiração** – Quantidade de água transferida da superfície para a atmosfera, por evaporação das superfícies (solo e plantas) e por transpiração das plantas num determinado ambiente e recebendo tratamentos culturais determinados;

**Evapotranspiração cultural** – Quantidade total de água evaporada da superfície do solo e das plantas e envolvida nos processos de transpiração das plantas em condições de conforto hídrico;

**Evapotranspiração de referência** – Evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, para a qual se assume uma altura de 0.12 m, uma resistência de superfície constante de 70 s m<sup>-1</sup> e um albedo de 0.23, semelhante à evapotranspiração de um extenso coberto de relva verde de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e bem abastecido de água.

**Índice de eficiência térmica** – Corresponde ao somatório anual da evapotranspiração potencial e que caracteriza o regime térmico local.

**Índice hídrico** – Exprime a humidade global do clima e é calculado pela diferença de um índice de humidade que avalia a importância de uma eventual estação húmida e um índice de aridez que avalia a importância de um eventual período seco.

**Necessidade de rega de ponta das culturas** – Quantidade de água para a rega no período de maiores exigências hídricas, que, em Portugal continental, coincide geralmente com o mês de julho. Pode ser referido à parcela (globais) ou ao ah (na captação).

**Necessidades anuais de rega** - Quantidade de água para a rega para toda a campanha de rega. Pode ser referido à parcela (globais) ou ao ah (na captação).

**Necessidades de rega das culturas** – Necessidades líquidas de rega (nlr) afetadas pela eficiência do sistema de rega da parcela.

**Necessidades de rega de um aproveitamento hidroagrícola** - Necessidades globais de rega do aproveitamento hidroagrícola referidas à entrada do sistema de adução e distribuição, ou seja, são as necessidades de rega de todas as parcelas do ah, afetadas pela eficiência de adução e distribuição do aproveitamento.

**Necessidades de rega líquidas das culturas** – Necessidades hídricas das culturas (nh) descontadas de outras fontes de água que não a rega, tais como a precipitação e a ascensão capilar.

**Necessidades globais de rega de um perímetro de rega** – Somatório das necessidades de rega de todas as parcelas do aproveitamento;

**Necessidades hídricas das culturas** – Quantidade de água necessária para satisfazer a evapotranspiração das culturas durante o seu ciclo ( $nh = et$ ).

**Período de retorno** – De um variável  $x$ , define-se como o número de anos que deve, em média, decorrer para que o valor dessa variável ocorra ou seja superado,  $T = 1/(1-F(x))$ .

**Probabilidade de não excedência** – Designando a probabilidade ( $p$ ) de a variável aleatória  $x$  assumir um valor inferior ou igual a  $x$ ,  $f(x) = p(x \leq x)$ .

**Projeto de regadio**- Conceção e realização de obras de construção ou de outras intervenções no meio natural ou na paisagem, que tem por finalidade a captação, armazenamento e distribuição de água para satisfazer as necessidades da atividade agrícola. A captação da água pode ser feita numa albufeira, num curso de água ou a partir de águas subterrâneas, estando incluídas as obras anexas (redes de drenagem e viárias).

**Sistema de abastecimento de água em gravidade** – Caracteriza-se por uma rede com abastecimento em canal ou conduta. Estes sistemas também podem ser abastecidos pontualmente por bombeamento em condutas com escoamento em baixa pressão (e.g., ~ 1 m c.a.).

**Sistema de abastecimento de água em pressão** – Caracteriza-se por uma rede com abastecimento em conduta com escoamento em alta pressão (~ 30 m c.a.).

**Stress hídricos** – É o fenómeno que ocorre nas plantas quando a água proveniente da precipitação e/ou rega não permite satisfazer as suas necessidades hídricas de forma a compensar a água perdida por transpiração, podendo levar a quebras de produção ou mesmo a morte da planta