

Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Agronómica

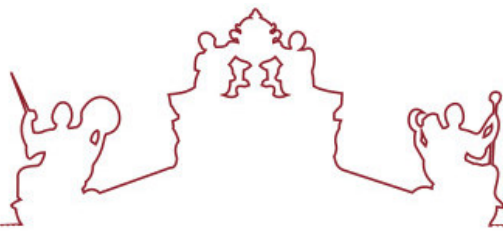
Dissertação

**Efeitos das alterações climáticas sobre a salinidade do solo:
modelação de caso de estudo no regadio do Roxo**

Tomás Miguel Pina Monteiro

Orientador(es) | Carlos Alexandre
Tiago Cunha Brito Ramos

Évora 2022



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Agronómica

Dissertação

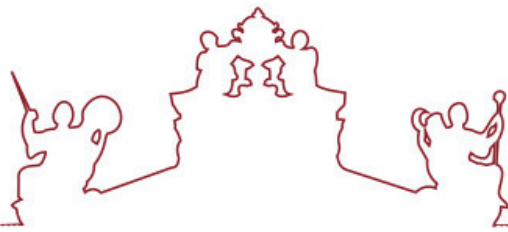
**Efeitos das alterações climáticas sobre a salinidade do solo:
modelação de caso de estudo no regadio do Roxo**

Tomás Miguel Pina Monteiro

Orientador(es) | Carlos Alexandre

Tiago Cunha Brito Ramos

Évora 2022



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

Presidente | Vasco Fitas da Cruz (Universidade de Évora)

Vogais | Carlos Alexandre (Universidade de Évora) (Orientador)
Luís Leopoldo Silva (Universidade de Évora) (Arguente)

Agradecimentos

Não poderia começar esta dissertação sem primeiro prestar uma palavra de agradecimento a toda a gente que tornou possível a realização desta dissertação.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador Doutor Tiago Ramos pela sua constante disponibilidade, apoio prestado e conhecimento transmitido, especialmente no funcionamento dos modelos utilizados para obter os resultados apresentados nesta dissertação.

Ao Professor Carlos Alexandre, também orientador, pela orientação e simpatia prestada ao longo da elaboração deste trabalho.

À Doutora Hanaa Darouich por ter tido a disponibilidade de me explicar como trabalhar com um dos modelos.

Ao Professor Luís Silva por ter sugerido que me candidatasse à bolsa, da qual beneficieei, e de onde surgiu o tema para esta dissertação. Agradeço também pela ajuda na realização dos inquéritos feitos aos agricultores.

Aos meus pais, avós e irmã que me sempre apoiaram toda a minha vida e sem eles nunca conseguiria ter terminado este projeto.

Quero agradecer também aos meus amigos que me acompanharam durante todo o meu percurso académico.

Também agradeço à Universidade de Évora e a todos os seus docentes por tudo o que me ensinaram, que me ajudou diretamente ou indiretamente a completar esta etapa.

Por último quero agradecer também à Fundação para a Ciência e Tecnologia que financiou este trabalho realizado no âmbito do projeto PTDC/ASP-SOL/28796/2017 “Aumento da produtividade do regadio através do uso sustentado do solo, SOIL4EVER” e a todas as pessoas que estiveram envolvidas no mesmo. As equipas têm o apoio da Associação de Beneficiários do Roxo.

Resumo

O regadio é fundamental para a produção agrícola em Portugal. Os cenários de alterações climáticas que indicam um aumento da temperatura e diminuição da precipitação, combinados com práticas de rega pouco eficientes, permitem prever um risco acrescido de salinização dos solos. Neste trabalho, pretende-se avaliar o risco de salinização do solo em função das práticas de rega monitorizadas em culturas representativas do perímetro de rega do Roxo (amendoal, olival, clementinas) e da variabilidade climática atual. Os modelos SIMDualKc e HYDRUS-1D foram utilizados na simulação da dinâmica da água e sais no solo. Foram identificados, para cada cultura, os anos com necessidades de rega médias, altas e muito altas provenientes de dados de reanálise (1979-2020), assumindo uma probabilidade de não excedência de 50%, 80% e 95%, respetivamente. Os resultados indicam aumento de salinidade do solo na maioria dos cenários estudados, que a médio-longo prazo é prejudicial para as culturas e solo.

Palavras-chave: Balanço hídrico; HYDRUS-1D; lixiviação de sais; necessidades de rega; SIMDualKc.

Effects of climate changes on soil salinization: modelling case study on the Roxo irrigation area

Irrigation is fundamental for agricultural production in Portugal. Climate change scenarios indicate an increase in temperature and decrease in precipitation, which combined with inefficient irrigation practices, project an increased risk of soil salinization. In this work, it is intended to evaluate the risk of soil salinization as a function of irrigation practices monitored in representative crops of the Roxo irrigation district (almonds, olive groves, clementines) and of current climate variability. The SIMDualKc and HYDRUS-1D models were used to simulate the dynamics of water and salts in the soil. The years with medium, high, and very high irrigation needs were then identified for each crop from reanalysis data (1979-2020), assuming a probability of non-exceedance of 50%, 80% and 95%, respectively. The results indicate an increased risk of soil salinization for most of the scenarios studied, which in the medium to long term is harmful to crops and soil characteristics.

Keywords: HYDRUS-1D; irrigation needs; salt leaching; SIMDualKc; soil water balance.

Índice Geral

Índice de Tabelas.....	X
Índice de Figuras	XII
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	XIV
1. Introdução	1
2. Revisão da Literatura	4
3. Material e Métodos	10
3.1. Local.....	11
3.2. Culturas	11
3.3. Clima.....	13
3.4. Solos	15
3.5. Monitorização do solo	18
3.6. Gestão da rega	21
3.7. Modelação da Dinâmica da Água e do Transporte de Solutos no Solo.....	22
3.7.1. Breve descrição da abordagem seguida	22
3.7.2. Descrição do modelo SIMDualKc	23
3.7.3. Dados de entrada do modelo SIMDualKc	32
3.7.3.1. Condições meteorológicas.....	32
3.7.3.2. Propriedades do solo	33
3.7.3.3 Fenologia das culturas	33
3.7.3.4. Rega	34
3.7.3.5. Mulches.....	35
3.7.3.6. Salinidade.....	35
3.7.3.7. Cobertura do solo ativa.....	35
3.7.4. Calibração e validação do modelo SIMDualKc	35
3.7.5. Descrição do modelo HYDRUS-1D	35
3.7.6. Dados de entrada do HYDRUS-1D.....	41
3.7.6.1. Solo	41

3.7.6.2. Parâmetros hidráulicos do solo	41
3.7.6.3. Parâmetro de transporte de solutos.....	42
3.7.6.4. Parâmetros de absorção de água das raízes	42
3.7.6.5. Condições fronteira superiores e inferiores	43
3.7.6.6. Condições iniciais	43
3.8. Análise Estatística	46
3.9. Produtividade da Água.....	47
3.10. Cenários Climáticos	49
3.10.1. Dados de reanálise.....	49
3.10.2. Definição das datas dos diferentes ciclos das culturas	50
3.10.3. Definição da estratégia de rega	51
3.10.4. Definição dos anos de necessidades de rega médias, altas e muito altas	51
4. Resultados e Discussão	52
4.1. Parametrização do Modelo SIMDualKc.....	53
4.2. Parametrização do Modelo HYDRUS-1D	54
4.3. Comportamento dos Modelos.....	55
4.3.1. O modelo SIMDualKc	55
4.3.2. O modelo HYDRUS-1D	56
4.4. O Balanço de Água no Solo	58
4.5. O Balanço de Sais	59
4.6. Análise da Produtividade da Água.....	61
4.7. Impacto dos Cenários Climáticos no Balanço de Água e Sais no Solo	62
4.7.1. Amendoal.....	62
4.7.2. Olival intensivo.....	63
4.7.3. Clementinas	64
5. Conclusão	66
6. Referências Bibliográficas	69

7. Apêndices..... 78

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Diretrizes para a interpretação da água de rega, adaptado de Ayers & Westcot (1985)....	9
Tabela 3.1 Composição granulométrica e classificação textural dos campos experimentais.	16
Tabela 3.2 Respetivos teores de água no solo e densidade aparente a diferentes profundidades para os três campos experimentais.	17
Tabela 3.3 Coordenadas das sondas capacitivas de cada cultura.....	18
Tabela 3.4 Valores mínimos, médios e máximos de EC_e e número total de observações em cada local, entre 2019 e 2020.....	19
Tabela 3.5 Datas do início e fim de rega, valor médio e o número total de dotações de rega para as diferentes culturas nos anos 2019 e 2020.	21
Tabela 3.6 Duração dos diferentes estágios de crescimento das diferentes culturas.	34
Tabela 3.7 Respetivos valores de K_{cb} e p usados como entradas no modelo.	34
Tabela 3.8 Características das diferentes culturas.....	34
Tabela 3.9 Parâmetros específicos do solo, nos quais presentes: a densidade média aparente e a dispersividade longitudinal para o olival intensivo.....	42
Tabela 3.10 Valores do modelo de redução de absorção de água segundo os parâmetros de Feddes et al. (1978) para todas as culturas.....	42
Tabela 3.11 Valores de $EC_{e\ threshold}$ e s segundo Allen et al. (1998) e respetiva conversão para o modelo HYDRUS-1D.	43
Tabela 3.12 Valores referentes ao teor inicial de água no solo no início do ano medidos pelas sondas capacitivas para todas as culturas nos anos 2019 e 2020.	44
Tabela 3.13 Duração dos diferentes estágios de crescimento das diferentes culturas para anos de necessidades de rega médias, altas e muito altas.	50
Tabela 3.14 Acumulação de temperaturas para cada fase das culturas estudadas em 2019 e 2020.	51
Tabela 4.1 Valores padrão de diversos parâmetros e os respetivos valores calibrados para as diferentes culturas.	53
Tabela 4.2 Parâmetros hidráulicos de solo usados no HYDRUS-1D para o solo da parcela com o amendoal.	54
Tabela 4.3 Parâmetros hidráulicos de solo usados no HYDRUS-1D para o solo da parcela com o olival intensivo.	54
Tabela 4.4 Parâmetros hidráulicos de solo usados no HYDRUS-1D para o solo da parcela com as clementinas.....	55
Tabela 4.5 Indicadores estatísticos de 2019 e 2020 para os resultados de balanço de água diário das culturas no SIMDualKc.	55

Tabela 4.6 Indicadores estatísticos de 2019 e 2020 para os resultados de balanço de água diário das culturas no HYDRUS-1D.	57
Tabela 4.7 Balanço hídrico das três culturas nos anos 2019 e 2020.....	58
Tabela 4.8 Balanço de sais no solo para as diferentes culturas, em 2019 e 2020.	60
Tabela 4.9 Valor dos indicadores da produtividade de água para o amendoal.....	61
Tabela 4.10 Valor dos indicadores da produtividade de água para o olival intensivo.....	62
Tabela 4.11 Valor dos indicadores da produtividade de água para as clementinas.....	62
Tabela 4.12 Balanço de água para os cenários simulados de alterações climáticas no amendoal.....	63
Tabela 4.13 Balanço de sais para os diferentes cenários climáticos no amendoal.....	63
Tabela 4.14 Balanço hídrico dos cenários simulados de alterações climáticas no olival intensivo.	64
Tabela 4.15 Balanço de sais para os diferentes cenários climáticos no olival intensivo.....	64
Tabela 4.16 Balanço de água para os cenários simulados de alterações climáticas nas clementinas.	64
Tabela 4.17 Balanço de sais para os diferentes cenários climáticos nas clementinas.....	65

Índice de Figuras

Figura 2.1 Classificação do solo quanto à salinidade e sodicidade usando valores de EC_e , ESP e SAR..	6
Figura 2.2 Classificação da salinidade e sodicidade da água de rega.	8
Figura 2.3 Divisão que classifica a tolerância das culturas à salinidade.	9
Figura 3.1 Localização dos três campos experimentais no PRR.	11
Figura 3.2 Cultura do amendoal.	12
Figura 3.3 Parcela do olival intensivo.	12
Figura 3.4 Parcela das clementinas.	13
Figura 3.5 Gráfico da evapotranspiração de referência e precipitação diária entre 2019 e 2020.	14
Figura 3.6 Gráfico das temperaturas máximas e mínimas do ar durante 2019 e 2020.	14
Figura 3.7 Gráfico da velocidade do vento e humidade relativa mínima entre 2019 e 2020.	15
Figura 3.8 Sonda capacitiva para medição do teor de água a várias profundidades na parcela do olival.	18
Figura 3.9 Gráfico com os valores da EC_e do amendoal para o período de observação entre 2019 e 2020 das diferentes profundidades e com o respetivo limite de tolerância da cultura à salinidade segundo Allen et al. (1998).	20
Figura 3.10 Gráfico com os valores da EC_e do olival intensivo para o período de observação entre 2019 e 2020 das diferentes profundidades e com o respetivo limite de tolerância da cultura à salinidade.	20
Figura 3.11 Valores da EC_e das clementinas para o período de observação entre 2019 e 2020 das diferentes profundidades e com o respetivo limite de tolerância da cultura à salinidade segundo Allen et al. (1998).	21
Figura 3.12 Balanço de água na zona das raízes.	24
Figura 3.13 Exemplo do comportamento do K_{cb} e K_e de uma cultura. O K_{cb} é representado pela linha mais grossa, o K_e pela linha mais fina e a soma dos dois coeficientes pela linha a tracejado.	27
Figura 3.14 Comportamento do coeficiente de stresse de água, conforme a disponibilidade de água e salinidade do solo, onde θ_p representa o limiar a partir do qual o valor de K_s diminui.	29
Figura 3.15 Números de escoamento para diversas culturas para solos com texturas variadas.	30
Figura 3.16 Estrutura do modelo SIMDualKc.	31
Figura 3.17 Menu do modelo SIMDualKc.	32
Figura 3.18 Curva da resposta das plantas ao stresse hídrico.	38
Figura 3.19 Relação entre a salinidade e a diminuição de produção das culturas. Y_r – Fator relativo de diminuição de produção da cultura; EC_{e100} – Limiar a partir do qual a cultura cessa totalmente a sua produção.	39

Figura 3.20 Página inicial do software HYDRUS-1D.	41
Figura 3.21 Imagem do editor gráfico com as cinco profundidades de observação selecionadas com um quadrado vermelho, sendo que os retângulos verdes correspondem à profundidade do solo....	45
Figura 3.22 Gráfico dos valores anuais de evapotranspiração de referência e precipitação para o período de 1979 a 2020.	49

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

a_D – Parâmetro empírico da equação da percolação profunda (mm)

b_D – Parâmetro empírico da equação da percolação profunda (-)

b_0 – Coeficiente de regressão forçado à origem (-)

CN – Número de escoamento (-)

CR – Ascensão capilar (mm/dia)

D – Coeficiente hidrodinâmico de dispersão (cm^2/dia)

DP – Percolação profunda (mm/dia)

D_r – Profundidade cumulativa de evapotranspiração (depleção) da zona radicular (mm)

E – Evaporação (mm/dia)

EC – Condutividade elétrica (dS/m)

EC_e – Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (dS/m)

$EC_{e \text{ threshold}}$ – Condutividade elétrica do extrato de saturação no solo no limiar em que a cultura reduz o seu potencial total de produção (dS/m)

EC_{ss} – Condutividade elétrica da solução do solo (dS/m)

EC_w – Condutividade elétrica da água de rega (dS/m)

EF – Eficiência do modelo (-)

ESP – Percentagem de sódio de troca (%)

ET – Evapotranspiração (mm/dia)

ET_a – Evapotranspiração real (mm/dia)

ET_c – Evapotranspiração cultural sob condições padrão (mm/dia)

ET_o – Evapotranspiração de referência (mm/dia)

EWP – Produtividade económica da água ($\text{€}/\text{m}^3$)

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

f_c – Fração do solo coberta por vegetação (vista por cima) (-)

f_{ew} – Fração do solo que está exposta e humedecida (zona pela qual se dá mais evaporação) (-)

f_w – Fração do solo humedecida pela chuva ou rega (-)

h_c – Altura da cultura (m)

h_{critA} – Valor absoluto da pressão efetiva mínima da água do solo à sua superfície (cm)

h – Pressão efetiva da água do solo (cm)

h_1 – Pressão efetiva da água do solo abaixo da qual as raízes começam a extrair água do solo (cm)

h_2 – Pressão efetiva da água do solo abaixo da qual as raízes extraem água à taxa mais alta possível (cm)

h_{3H} – Pressão efetiva da água do solo limitante, abaixo da qual as raízes deixam de conseguir extrair água à taxa mais elevada (assumindo uma taxa de transpiração potencial de 0,5cm/dia) (cm)

h_{3L} – Igual a h_{3H} , mas para uma taxa de transpiração potencial de 0,1 cm/dia (cm)

h_4 – Pressão efetiva da água do solo abaixo da qual deixa de existir absorção de água pelas raízes (cm)

h_ϕ - Potencial osmótico (-)

INE – Instituto Nacional de Estatística

INIAV – Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IWU – Água de rega usada (m^3/ha)

IUSS – *International Union of Soil Sciences*

K_c – Coeficiente cultural (-)

$K_{c\ act}$ – Coeficiente cultural real (-)

K_{cb} – Coeficiente cultural basal (-)

$K_{cb\ ini}$ – Coeficiente cultural basal durante a fase inicial de crescimento (-)

$K_{cb\ mid}$ – Coeficiente cultural basal durante a fase intermédia de crescimento (-)

$K_{cb\ end}$ – Coeficiente cultural basal durante a fase final de crescimento (-)

$K_{c\ max}$ – Valor máximo de K_c depois de chuva ou rega (-)

K_e – Coeficiente de evaporação do solo (-)

K_{EC} – Condutividade elétrica da água do solo *in situ* à capacidade de campo (dS/m)

K_r – Coeficiente de redução da evaporação do solo (-)

K_s – Coeficiente de stresse de água (-)

K_{sat} – Condutividade hidráulica saturada (cm/dia)

MAD – Gestão da depleção de água no solo permitida (-)

n – Número de observações (-)

NRMSE – Rácio do RMSE para o desvio padrão dos dados medidos (-)

P – Precipitação (mm)

p – Fator de esgotamento (-)

PBIAS – Desvio percentual de estimativa (%)

PRR – Perímetro de Rega do Roxo

R – Rega (mm)

R^2 – Coeficiente de determinação (-)

RAW – Água facilmente utilizável da zona das raízes (mm)

REW – Água facilmente evaporável (mm)

RH – Humidade relativa (%)

RH_{med} – Humidade relativa média (%)

RH_{min} – Humidade relativa mínima (%)

RMSE – Erro quadrático médio (cm^3/cm^3)

RO – Escoamento superficial (mm)

R_s – Radiação solar ($MJ/m^2/dia$)

s - Declive da curva que determina a diminuição da absorção de água por unidade de aumento de salinidade (%/dS/m)

S – Sumidouro que descreve a extração de água do solo pela cultura ($cm^3/cm^3/dia$)

SAR – Razão de adsorção do sódio ($\text{mmol}_c/\text{L}^{0.5}$)

S_e – Teor efetivo de água (m^3/m^3)

t – Tempo (dia)

TAW – Água total disponível na zona das raízes (mm)

TEW – Água total evaporável (mm)

TWU – Água total utilizada (mm)

T_c – Transpiração cultural real (mm)

TDS – Teor de sais solúveis (g/L)

T_p – Transpiração cultural potencial (mm)

Y_a – Produção real de uma cultura (kg/ha)

W – Armazenamento real de água na zona das raízes (mm)

WP_{irrig} – Produtividade da água de rega (kg/m^3)

WP_{ET} - Produtividade da água evapotranspirada (kg/m^3)

WP_T -Produtividade da água transpirada (kg/m^3)

WP_{WU} – Produtividade da água total utilizada (kg/m^3)

WRB – *World Reference Base for Soil Resources*

Z_e – Profundidade da camada de solo sujeita a secar por evaporação (m)

Z_r – Profundidade das raízes (m)

ΔSW – Variação no teor de água no solo (mm)

θ_{FC} – Teor de água no solo à capacidade de campo (cm^3/cm^3)

θ_{WP} – Teor de água no solo no coeficiente de emurchecimento (cm^3/cm^3)

θ_r – Teor de água residual (cm^3/cm^3)

θ_s – Teor de água no solo em saturação (cm^3/cm^3)

θ_p – Teor de água a partir do qual as plantas entram em stresse hídrico (-)

α – Parâmetro empírico (cm^{-1})

α – Parâmetro empírico (-)

ρ – Densidade aparente (g/cm³)

1. Introdução

A agricultura de regadio permite aumentar a produtividade das culturas, satisfazer as necessidades alimentares duma população mundial crescente, aumentar a segurança alimentar, diversificar a produção e contribuir para o desenvolvimento socioeconómico, principalmente em zonas de climas áridos, semiáridos e por vezes sub-húmidos secos. Contudo, uma das consequências negativas associadas ao regadio é a salinização dos solos. As melhores estimativas sugerem que cerca de 412 Mha são afetados por salinidade e outros 618 Mha por sodicidade (FAO, 2015) em todo o mundo, sendo que a soma das duas áreas corresponde a mais de 100 vezes o tamanho de Portugal.

Em Portugal, a agricultura de regadio tem tido um incremento na sua importância e dimensão. Entre 2009 e 2019, segundo o Instituto Nacional de Estatística (INE, 2021), houve um crescimento em 80.500 ha da superfície agrícola regada no Alentejo, o que corresponde a um aumento de cerca de 58% face a 2009. Grande parte desta ampliação deveu-se ao início da exploração, em 2002, do Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva, com a progressiva conversão de 120.000 ha de nova área regada.

As alterações climáticas têm levado ao aumento das temperaturas em Portugal, tornando os verões mais quentes e secos e as precipitações cada vez mais baixas, o que aumenta a dependência dos países mediterrânicos ao regadio (Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural, 2022). Estas condições climáticas, em conjunto com a rega, levam inevitavelmente a uma maior evapotranspiração das culturas, que por sua vez favorecem a acumulação de sais no solo, aumentando assim o risco de salinização e sodicização do mesmo. O aumento do teor de sais no solo acarreta perigos como a diminuição da produtividade das culturas, uma menor biodiversidade do solo, a degradação do solo e, a longo prazo, leva à desertificação e abandono dos terrenos agrícolas (Gonçalves *et al.*, 2020).

Por estas razões é necessária a implementação de uma gestão de rega sustentável que conjugue a necessidade de controlar a salinização do solo, com a poupança da água de rega e o controlo da lixiviação de nutrientes, sem comprometer o rendimento do produtor.

No Alentejo, mais especificamente no perímetro de rega do Roxo (PRR), é praticada agricultura intensiva em solos muitas vezes com problemas estruturais, com capacidade de potenciar os riscos de salinização (Alexandre *et al.*, 2018). Na região hidrográfica 6, que inclui também o PRR, estimou-se que 50% (506.275 ha) dos solos são salino-sódicos ou com risco de sodicização e quase 9% (90.184ha) são solos sodicizados (ARH, 2012). É, por isso, importante conhecer e monitorizar a presença de sais no solo de modo a minimizar estes riscos com a adoção de práticas de rega mais sustentáveis adaptadas para os diferentes casos.

Para tal, devem ser utilizados modelos capazes de simular a dinâmica da água e o transporte de sais no solo de modo a prever o efeito das práticas agrícolas na qualidade do solo. No entanto, a utilização destes modelos necessita de um cuidadoso processo de calibração e validação para que as suas previsões sejam minimamente realistas e que geralmente estão limitadas pela falta de informação ao nível da parcela.

De modo a prevenir e remediar a salinização e sodicização tem de haver uma monitorização destes processos baseado no conhecimento da dinâmica da água e sais no solo. Através da modelação matemática é possível avaliar a gestão de rega e prever os efeitos que a qualidade da água tem no solo e nas águas subterrâneas. Quanto mais intensiva for a rega e pior a sua qualidade, maior é a importância do seu controlo (Gonçalves *et al.*, 2015).

Assim, esta dissertação visa utilizar os dados de solos, de culturas e de qualidade da água disponíveis para o perímetro de rega do Roxo, monitorizados no âmbito do projeto SOIL4EVER e em projetos anteriores, para simular os efeitos na salinidade do solo causados pelo regadio. Para o efeito pretende-se recorrer, principalmente, ao modelo HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 2016), que vai ser usado para simular o movimento da água e sais no solo para os anos 2019 e 2020 em três casos de estudo (amendoal, olival e clementinas). São depois avaliados, para cada cultura, os riscos de salinização do solo, em função das necessidades de rega médias, altas e muito altas, estimadas a partir de dados de reanálise (1979-2020), assumindo uma probabilidade de não excedência de 50%, 80% e 95%, respetivamente.

2. Revisão da Literatura

Quando se refere ao fenómeno de salinização do solo, este pode ser dividido em excesso de concentração de sais solúveis no solo (salinidade) e concentração elevada de sódio (Na^+), sozinho ou em conjunto com magnésio (Mg^{2+}), no complexo de troca (sodicidade) (Daliakopoulos *et al.*, 2016). Os efeitos causados pela salinidade e pela sodicidade são diferentes, sendo que o primeiro aumenta a pressão osmótica da água do solo, diminuindo assim a capacidade de absorção de água pelas plantas, causando stresse hídrico e podendo causar também problemas de toxicidade. O solo não perde a sua estrutura e permeabilidade, sendo que a salinidade pode ser controlada através da lavagem do solo com água pouco salina. Em contraste, os solos sódicos sofrem de dispersão das argilas e degradação da estrutura porosa do solo, formando assim horizontes de baixa permeabilidade que dificultam o crescimento das raízes devido ao mau arejamento, promovendo também a erosão do solo (Paz *et al.*, 2020). De modo a reverter este processo é necessário adicionar cálcio sob a forma de CaCO_3 (carbonato de cálcio) e de seguida aplicar água de qualidade em excesso para lixiviar os sais dissolvidos. Há ainda solos salino-sódicos que têm excesso de Na^+ (sódio) de troca e de sais solúveis, mas ao contrário dos solos sódicos, não há dispersão das argilas, nem degradação da estrutura do solo devido às forças eletrostáticas resultantes dos sais dissolvidos na água do solo (Weil & Bradley, 2017).

De modo a quantificar o grau de salinização e sodicização do solo usam-se três parâmetros diferentes que avaliam a resposta das plantas e comportamento do solo. O primeiro permite quantificar o grau de salinização do solo e é a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (EC_e , dS/m), que avalia o quão facilmente uma solução aquosa transporta corrente elétrica, a 25°C , e que é posteriormente relacionada com a concentração total de sais solúveis. A classificação da EC_e para solos agrícolas é: 0 - 2 dS/m (não salino), 2 - 4 dS/m (ligeiramente salino), 4 - 8 dS/m (moderadamente salino), 8 - 16 dS/m (fortemente salino), > 16 dS/m (extremamente salino) (Richards, 1954).

A quantificação da sodicização é feita pela percentagem de sódio de troca (ESP) que mede a proporção de Na^+ adsorvido no solo em relação aos outros catiões adsorvidos (ARH, 2012):

$$\text{ESP (\%)} = \frac{\text{Na}^+ \text{ (cmol}_c\text{/kg)}}{\sum (\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+, \text{Na}^+) \text{ (cmol}_c\text{/kg)}} \times 100 \quad (1)$$

Por fim é calculada a razão de adsorção do sódio (SAR), que avalia a capacidade da solução do solo e da água de rega trocarem sódio com o complexo de troca do solo:

$$\text{SAR (mmol}_c\text{/L}^{0.5}) = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{2}}} \quad (2)$$

O solo pode ser classificado segundo Richards (1954) conjugando os três parâmetros (Figura 2.1).

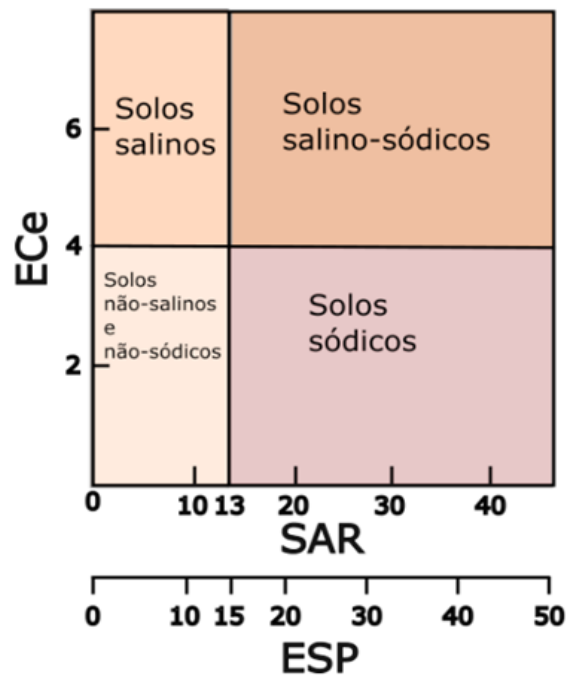


Figura 2.1 Classificação do solo quanto à salinidade e sodicidade usando valores de EC_e, ESP e SAR.

Fonte: Adaptado de Weil, R. & Bradley, N., 2017

A acumulação de sais no solo depende de vários fatores, podendo esses ser divididos em salinização primária, que ocorre através de processos naturais, e secundária, que é introduzida através da ação humana por más práticas de rega como a utilização de águas de má qualidade, normalmente em locais com condições de drenagem reduzidas e em solos pouco permeáveis. Um dos fatores de maior importância para o aumento de teor de sais no solo dá-se quando o balanço entre a precipitação e a evapotranspiração é negativo (Alexandre *et al.*, 2018).

O risco de salinização já é um problema antigo no PRR, por esse motivo, no período de 2018 a 2022 decorreu um projeto SOIL4EVER denominado por “Aumento da produtividade do regadio

através do uso sustentado do solo”, na qual está também incluída esta investigação. A equipa de investigação focou-se no desenvolvimento e testagem de um conjunto de metodologias que permitiram avaliar, prever e reduzir os riscos de salinização do solo, aumentar a eficiência da fertilização e maximizar as produções (e.g., Farzadian *et al.*, 2021; Gonçalves *et al.*, 2022). Os objetivos da investigação passaram então (i) pela identificação e monitorização de zonas com potencial risco de salinização; (ii) pelo estudo dos efeitos da qualidade da água de rega (condutividade elétrica (EC) catiões solúveis, SAR, ESP) nos indicadores fisiológicos de diferentes culturas e produção final; (iii) pelo uso da modelação de forma a chegar a uma gestão sustentável de rega e da fertilização azotada; e (iv) pela criação de uma plataforma no WebGIS (sistema de informação geográfica *online*) para aumentar a consciencialização dos produtores dos riscos da degradação do solo caso não sejam aplicadas práticas agrícolas sustentáveis.

Sabe-se que a albufeira do Roxo apresentava no passado os valores mais elevados de salinidade e sodicidade da água de Portugal (Alvim, 1980). Monitorizações feitas entre julho de 2003 e setembro de 2004, à água de rega do PRR, indicavam valores de condutividade elétrica compreendidos entre 1 e 1,27 dS/m, que segundo Richards (1954), representavam um risco de salinidade alto (C_3) (Figura 2.2). Já o risco de sodicização era baixo (S_1), sendo que o catião dominante era o sódio solúvel (Martins *et al.*, 2005). A classe C_3 indica que a água de rega não pode ser utilizada em solos com drenagem limitada. Mesmo em condições de boa drenagem, poderá ser necessária uma gestão especial de controlo de salinidade e devem ser escolhidas plantas com boa tolerância à salinidade. Por outro lado, a classe S_1 significa que a água de rega pode ser efetuada na maioria dos solos e culturas, com baixa probabilidade de originar níveis prejudiciais de sódio de troca. No entanto, deve ser evitada a sua utilização em culturas sensíveis ao sódio como as prunóideas. Relativamente à solução do solo, a EC e o teor de sódio solúvel demonstraram uma tendência crescente do seu valor durante o período de rega (Martins *et al.*, 2005).

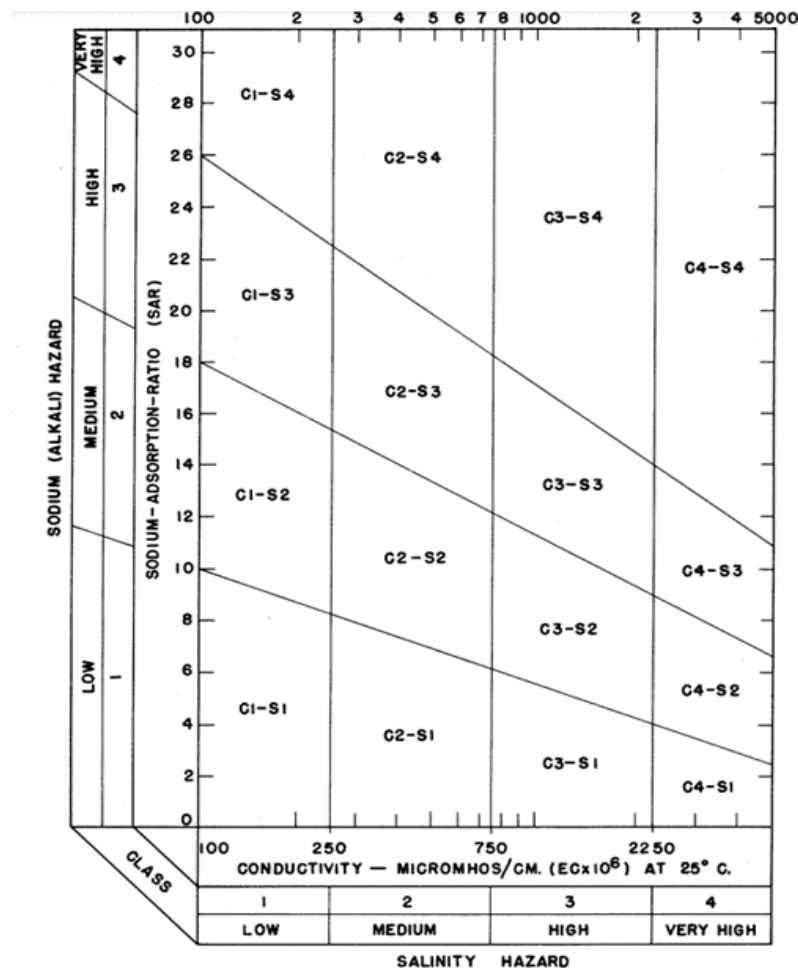


Figura 2.2 Classificação da salinidade e sodicidade da água de rega.

Fonte: Richards, 1954

Mais recentemente, entre junho e setembro de 2016, os valores da condutividade elétrica da água de rega (EC_w) baixaram de 0,99 dS/m para 0,76 dS/m, período que coincidiu com o início da receção de água proveniente do Alqueva. Nesse mesmo estudo foi concluído por Alexandre *et al.* (2018) que a salinização do solo não é um problema significativo no PRR, no entanto foi encontrada uma maior abundância de solos sódicos do que estudos anteriores de cartografia de solos indicavam.

Num estudo realizado por Gonçalves *et al.* (2022), a EC_w média no PRR entre 2019/2020 e em 2021 foi de 0,72 dS/m e 0,66 dS/m, respetivamente, o que representa uma diminuição relativamente aos dados disponíveis de 2016. Foi ainda concluído no mesmo estudo que a EC_e apresentou valores pontuais superiores ao limite de tolerância à salinidade de algumas culturas mais sensíveis (amendoal e citrinos).

Os valores de EC_w dos diferentes estudos acima, segundo a Ayers & Westcot (1985) poderão representar um ligeiro a moderado impacto na salinidade do solo, à exceção do valor de EC_w de 2021 (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 Diretrizes para a interpretação da água de rega, adaptado de Ayers & Westcot (1985).

Salinidade	Unidades	Grau de restrição de uso		
		Nenhum	Ligeiro a moderado	Severo
EC_w	dS/m	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0
TDS	mg/L	< 450	450 – 2.000	> 2.000

Onde TDS é o teor de sais dissolvidos no solo.

Na Figura 2.3 encontra-se uma possível classificação das diferentes tolerâncias à salinidade das culturas, na qual o olival enquadra-se como uma cultura moderadamente tolerante à salinidade, enquanto o amendoal e as clementinas como culturas sensíveis à salinidade (Tanji & Kielen, 2002).

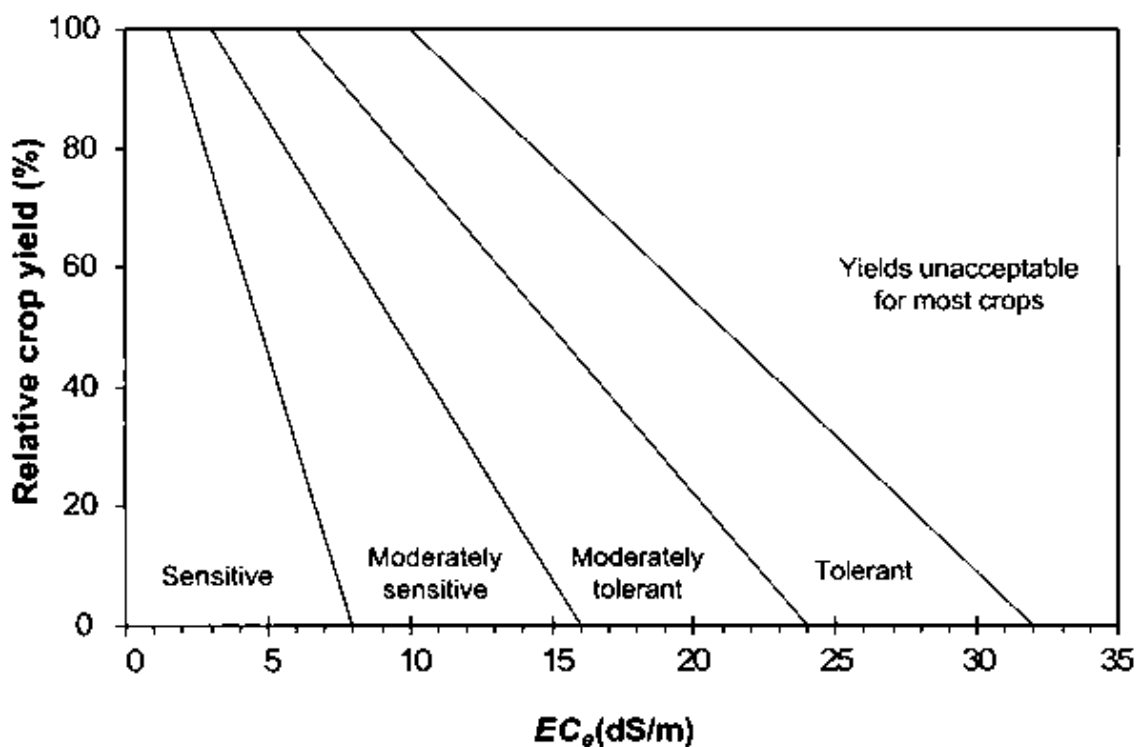


Figura 2.3 Divisão que classifica a tolerância das culturas à salinidade.

Fonte: Tanji & Kielen, 2002

3. Material e Métodos

3.1. Local

Neste trabalho foram selecionados três campos experimentais, que beneficiam da água da albufeira do Roxo, localizados na freguesia de São João de Negrilhos, Aljustrel. Desde 1968 que a albufeira fornece água aos terrenos circundantes e a entidade responsável pela gestão deste recurso é a Associação de Beneficiários do Roxo. No total, o perímetro de rega do Roxo é responsável por abastecer 8.240 ha. Algumas das culturas que beneficiam da água desta barragem são os olivais (intensivos e superintensivos ou em sebe), amendoais, citrinos e romanzais (Associação de Beneficiários do Roxo, 2022).

Na Figura 3.1 encontram-se parte dos terrenos abastecidos pela água da albufeira do Roxo, tal como a localização dos três campos experimentais estudados.

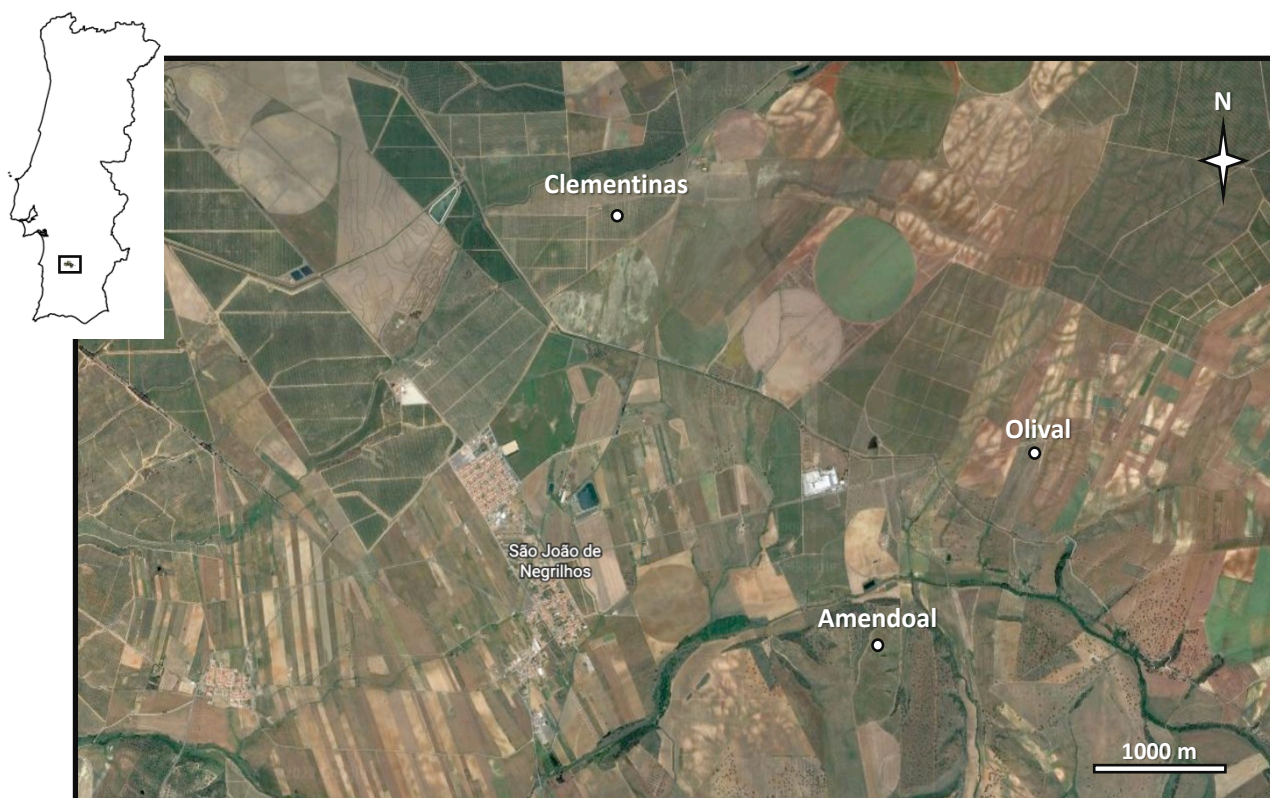


Figura 3.1 Localização dos três campos experimentais no PRR.

3.2. Culturas

As três culturas escolhidas, correspondentes aos usos do solo mais representativos do perímetro de rega do Roxo, foram:

Um amendoal (Figura 3.2) de cinco anos, em 2019, da variedade ‘Monterey’, com as coordenadas (37.941N; -8.153W), com uma densidade de 391 arv/ha e instalado num solo Sr* (Mediterrâneo Vermelho com materiais lateríticos, pedregoso) (SROA, 1970);



Figura 3.2 Cultura do amendoal.

Fonte: SOIL4EVER, 2022

Um olival intensivo (Figura 3.3) de onze anos, em 2019, da variedade ‘Picual’, com as coordenadas (37.954N; -8.140W), com uma densidade de 298 arv/ha e instalado num solo Vc (Calcário Vermelho) (SROA, 1970);



Figura 3.3 Parcela do olival intensivo.

Fonte: SOIL4EVER, 2022

Um pomar de clementinas (Figura 3.4) de cinco anos, em 2019, da variedade 'Oronules', com as coordenadas (37.969N; -8.176W), com uma densidade de 404 arv/ha e instalado num solo Pag (Mediterrâneo Pardo, para-hidromórfico) (SROA, 1970).



Figura 3.4 Parcela das clementinas.

Fonte: SOIL4EVER, 2022

3.3. Clima

O clima da região pode ser classificado como semiárido, tendo uma temperatura média anual de 16,3 °C, em que os meses com a média de temperaturas mais baixas e altas são janeiro com 9,8 °C e agosto com 23,1 °C, respetivamente. A média da evapotranspiração de referência (ET_0) anual é 1.197 mm, variando entre 1.104 mm e 1.466 mm. A precipitação média anual é 454 mm, com amplitudes entre 280 mm e 703 mm. Os dados climáticos anteriores são referentes ao período de 1979 a 2020 que foram obtidos por reanálise meteorológica da estação meteorológica local, isto é, combinação de dados medidos, observados, simulados e de técnicas de assimilação de dados, de modo a obter a descrição mais realista dos eventos climáticos (Meteoblue, 2022).

Nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 abaixo encontram-se alguns dos dados climáticos diários de 2019 e 2020, retirados da estação meteorológica local que foram usados neste estudo.

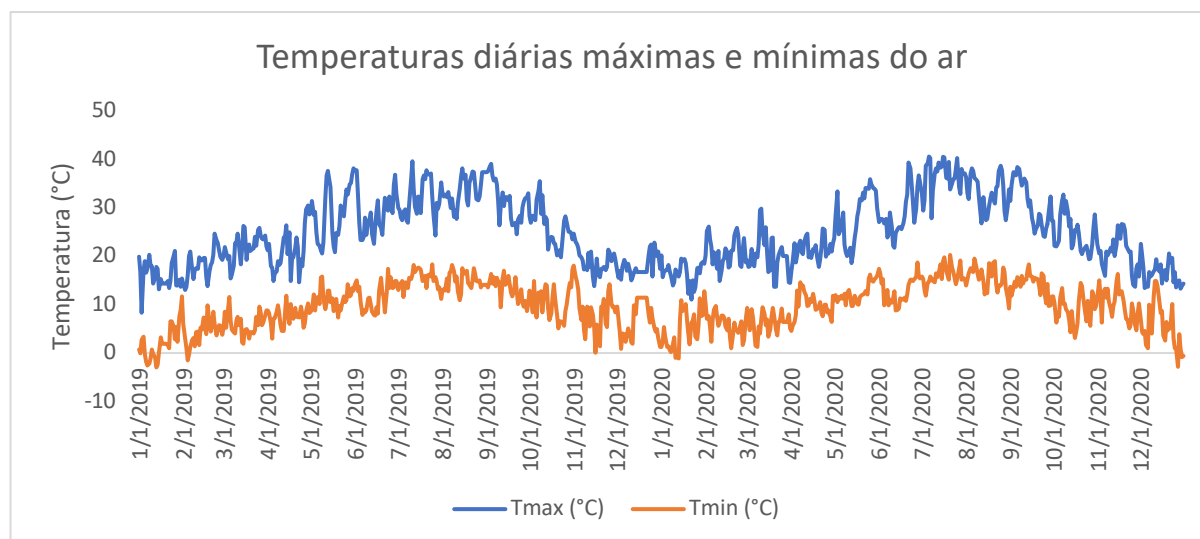


Figura 3.6 Gráfico das temperaturas máximas e mínimas do ar durante 2019 e 2020.

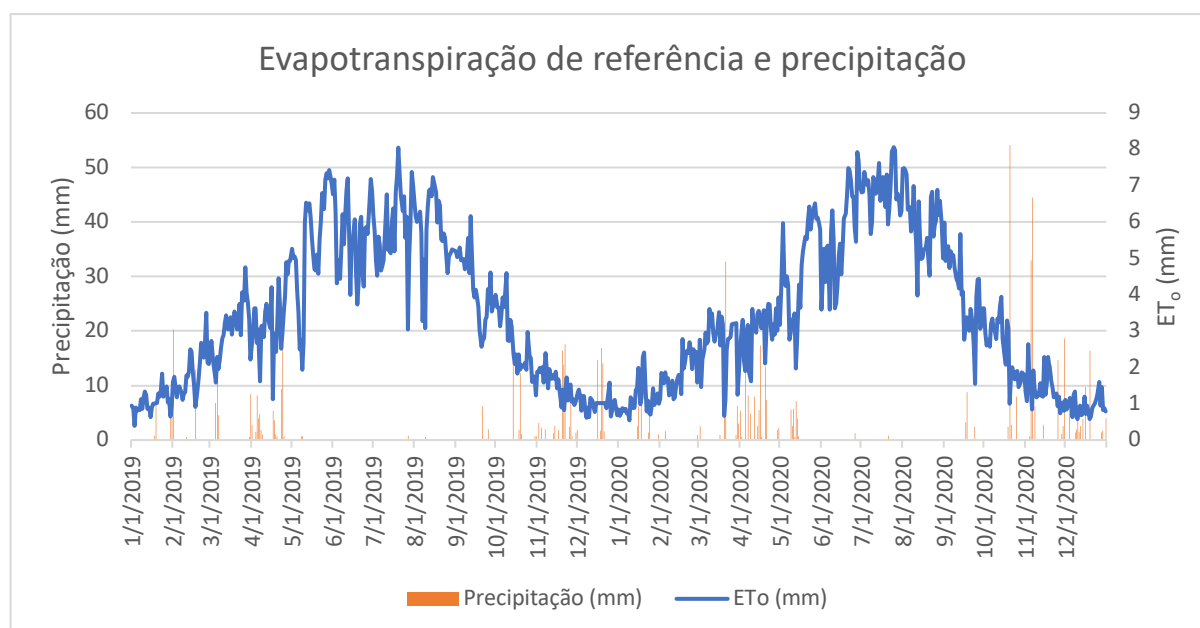


Figura 3.5 Gráfico da evapotranspiração de referência e precipitação diária entre 2019 e 2020.

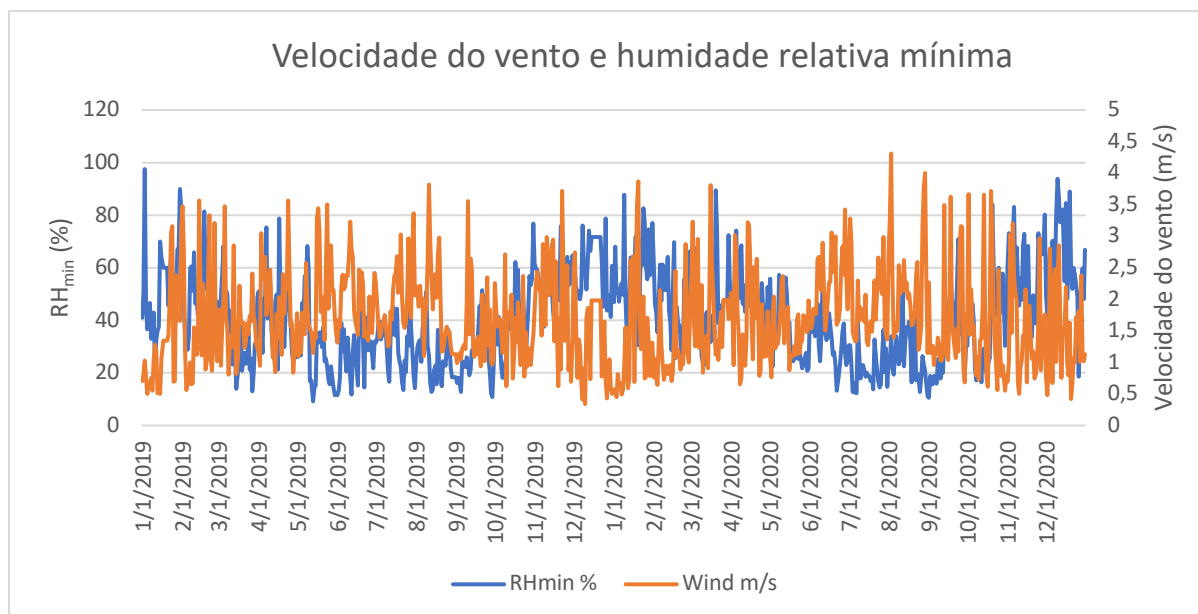


Figura 3.7 Gráfico da velocidade do vento e umidade relativa mínima entre 2019 e 2020.

3.4. Solos

No Quadro 3.1 encontra-se a classificação dos solos segundo Cardoso (1965) e também pela classificação *World Reference Base for Soil Resources* (WRB, 2015).

Quadro 3.1 Algumas características dos solos e culturas estudadas.

Cultura	Compasso (linha x entrelinha)	Solos	
		Classificação portuguesa	Classificação da FAO
Amendoal	3,65 x 7,0 m	Sr*	LV-ap.cr
Olival intensivo	4,8 x 7,0 m	Vc	RG-ca
Clementinas	4,5 x 5,5 m	Pag	RG-so.st

Legenda abreviada da classificação dos solos (WRB, 2015):

LV-ap.cr – *Chromic Abruptic Luvisol*

RG-ca – *Calcaric Regosol*

RG-so.st – *Sodic Stagnic Regosol*

No início da campanha de monitorização foi avaliada a composição granulométrica do solo e a sua classificação textural dos três campos experimentais (Tabela 3.1). A distribuição do tamanho das partículas do solo foi determinada tendo em conta os limites definidos pela *International Union of Soil Sciences* (IUSS) para as partículas (escala de *Atteberg*). Nesta escala, partículas com um tamanho entre 0,2 - 2 mm são consideradas areia grossa, entre 0,02 – 0,2 mm areia fina, entre 0,002 – 0,02 mm limo

e, por fim, com um tamanho inferior a 0,002 mm argila. No quadro, esses valores são apresentados já em percentagem. A composição granulométrica foi obtida pelo método da pipeta. A classe de textura foi obtida segundo o diagrama triangular de Gomes & Silva (1962).

Tabela 3.1 Composição granulométrica e classificação textural dos campos experimentais.

Cultura	Profundidade cm	Areia grossa %	Areia fina %	Limo %	Argila %	Textura*
Amendoal	0 - 20	40,62	22,78	14,82	21,79	FAAr
	20 - 40	39,91	23,63	15,38	21,08	FAAr
Olival intensivo	0 - 20	10,28	17,94	24,56	47,23	AL
	20 - 40	13,94	18,59	25,18	42,28	AL
	40 - 60	20,57	21,99	35,61	21,82	FL
	60 - 80	24,60	18,71	30,83	25,87	FL
Clementinas	0 - 20	47,09	38,88	8,59	5,44	ArF
	20 - 40	45,72	40,03	7,86	6,39	ArF
	40 - 60	50,23	35,66	8,33	5,78	ArF
	60 - 80	42,08	32,12	7,22	18,58	FAr
	80 - 100	33,39	26,96	7,80	31,77	FAAr

* Classificação textural segundo o diagrama triangular de Gomes & Silva (1962): Argilo-Limosa (AL); Fraco-Limosa (FL); Franco-Argilo-Arenosa (FAAr); Areno-Franca (ArF); Franco-Arenosa (FAr).

Na Tabela 3.2 encontram-se os valores da densidade aparente do solo (ρ) que é obtida pela razão entre o peso seco a 105 °C durante 48 h de uma amostra de solo não perturbado e o seu volume (100 cm³). A capacidade de retenção de água do solo foi também medida em amostras de 100 cm³ de solo não perturbado. O teor de água no solo na saturação (θ_s) foi determinado pela capacidade máxima de retenção das amostras de solo, volumetricamente. Para obter o teor de água no solo à capacidade de campo (θ_{Fc}) foram usadas caixas de sucção a -10 kPa de potencial matricial (Romano *et al.*, 2002). O teor de água no solo no coeficiente de emurchecimento (θ_{wp}) foi determinado com placas de pressão a -1.500 kPa de potencial matricial (Dane & Hopmans, 2002). A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) foi determinada em amostras de 630 cm³ de solo não perturbado pelo método da carga constante.

Tabela 3.2 Respetivos teores de água no solo e densidade aparente a diferentes profundidades para os três campos experimentais.

Cultura	Profundidade cm	Teor de água no solo cm ³ /cm ³				ρ g/cm ³	K _{sat} cm/dia
		θ_s	θ_{FC}	θ_{WP}	$\theta_{FC} - \theta_{WP}$		
Olival intensivo	0 - 40	0,5433	0,4689	0,3048	0,1641	1,38	1.149
	5 - 20	0,4175	0,1949	0,0795	0,1154	1,48	0,0795
Amendoal	20 - 40	0,4209	0,2024	0,0800	0,1224	1,41	0,0700
	0 - 10	0,3380	0,2500	0,0583	0,1917	1,80	82
Clementinas	10 - 35	0,3899	0,3334	0,1980	0,1354	1,75	-

Onde:

θ_s – Teor de água no solo em saturação (cm³/cm³);

θ_{FC} – Teor de água no solo à capacidade de campo (cm³/cm³);

θ_{WP} – Teor de água no solo no coeficiente de emurchecimento (cm³/cm³);

ρ – Densidade aparente (g/cm³);

K_{sat} – condutividade hidráulica saturada (cm/dia).

Foi aberto também um perfil em cada cultura na entrelinha e foi descrita a morfologia do solo. Cada horizonte do solo foi igualmente alvo de amostragens para caracterização das características físicas e químicas do solo por uma equipa do Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária (INIAV).

3.5. Monitorização do solo

Todas as culturas foram regadas através de um sistema gota-a-gota e a gestão da rega foi feita pelos agricultores responsáveis por cada parcela. O teor de água do solo foi monitorizado de forma contínua com recurso a sondas capacitivas (Figura 3.8) (EnviroPro MT, MAIT Industries, Austrália), colocadas na linha da cultura às profundidades de 0,1, 0,3, 0,5 e 0,7 m. As sondas foram calibradas por comparação dos valores medidos pelas sondas com os teores de água monitorizados em amostras perturbadas colhidas para o efeito, em várias datas e a várias profundidades, e posteriormente convertidos na base do volume, por multiplicação pelas respetivas densidades aparentes de cada camada. As coordenadas das sondas encontram-se na Tabela 3.3. As dotações de rega foram monitorizadas através de caudalímetros inseridos nos tubos de rega e pelos registos dos agricultores.



Figura 3.8 Sonda capacitiva para medição do teor de água a várias profundidades na parcela do olival.

Fonte: SOIL4EVER, 2022

Tabela 3.3 Coordenadas das sondas capacitivas de cada cultura.

Coordenadas	Amendoal	Olival intensivo	Clementinas
Latitude (Norte)	37.941	37.954	37.969
Longitude (Oeste)	-8.153	-8.140	-8.176

Foi também monitorizada a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, o pH, o teor de azoto em nitratos (N-NO_3^-), os catiões solúveis (Na^+ , Ca^+ , Mg^{2+}) e o valor de SAR, que foi feita

sempre que possível, uma vez por mês, sendo que nestas campanhas de monitorização os valores mais importantes são os obtidos após o fim da época de rega para avaliar o efeito da água de rega na salinidade do solo e quando a época de chuva acaba, para avaliar a lixiviação de nutrientes causada pela precipitação. As amostras de solo foram colhidas, entre maio de 2019 até novembro de 2020, de 20 em 20 cm até a uma profundidade máxima de 80 cm, se a espessura efetiva do solo o permitisse.

O valor de EC_e foi inicialmente determinado em dS/m e convertido posteriormente para o teor de sais dissolvidos no solo através da seguinte relação (Richards, 1954):

$$TDS \text{ (g/L)} = 0,64 \times EC_e \text{ (dS/m)} \quad (3)$$

A EC_w , medida com um condutímetro, apresentou um valor médio de 0,72 dS/m durante o período de investigação.

Os valores da EC_e foram determinados potenciometricamente e encontram-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Valores mínimos, médios e máximos de EC_e e número total de observações em cada local, entre 2019 e 2020.

Cultura	EC_e (dS/m)			Nº de observações
	Mínimo	Médio	Máximo	
Amendoal	0,43	0,96	1,69	13
Olival intensivo	0,41	0,97	3,96	51
Clementinas	0,34	1,05	4,44	42

A evolução da EC_e ao longo do tempo está presente nas Figuras 3.9, 3.10 e 3.11. A tolerância à salinidade das culturas é expressa em condutividade elétrica do extrato de saturação no solo no limiar em que a cultura reduz o seu potencial total de produção ($EC_{e \text{ threshold}}$). Os valores usados de $EC_{e \text{ threshold}}$ foram retirados de Allen *et al.* (1998), onde para o amendoal era 1,5 dS/m e para as clementinas 1,7 dS/m. Para o olival, visto que, não há informação sobre o $EC_{e \text{ threshold}}$, foi escolhido um valor semelhante a outras culturas com uma tolerância moderada à salinidade, presentes em Allen *et al.* (1998), de 4 dS/m.

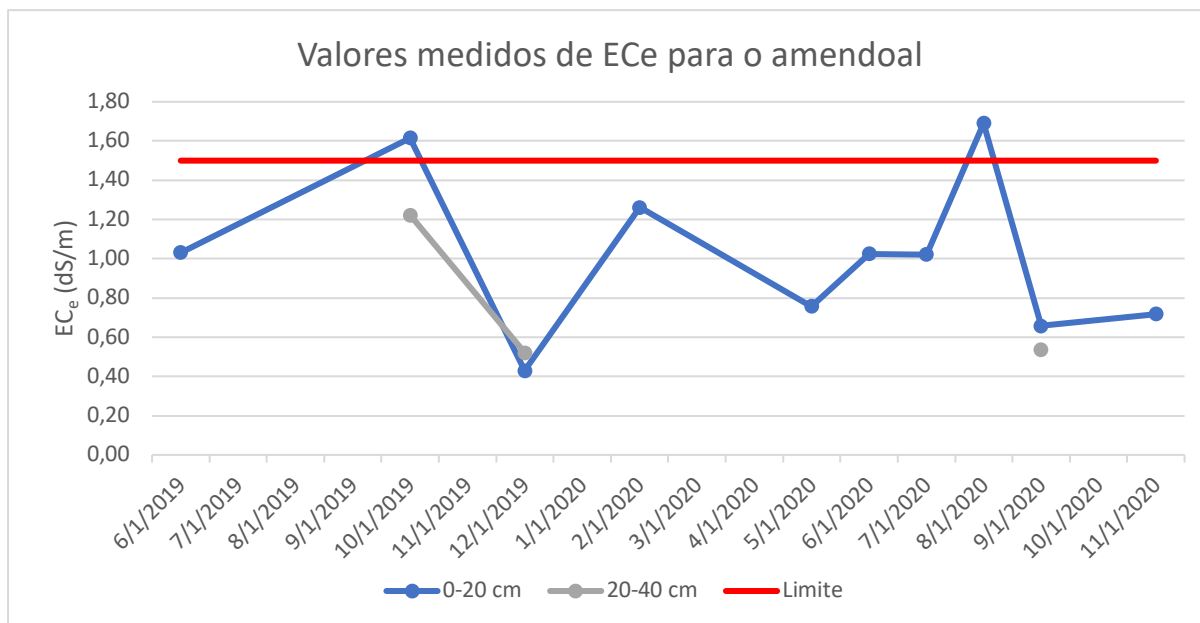


Figura 3.9 Gráfico com os valores da EC_e do amendoal para o período de observação entre 2019 e 2020 das diferentes profundidades e com o respetivo limite de tolerância da cultura à salinidade segundo Allen *et al.* (1998).

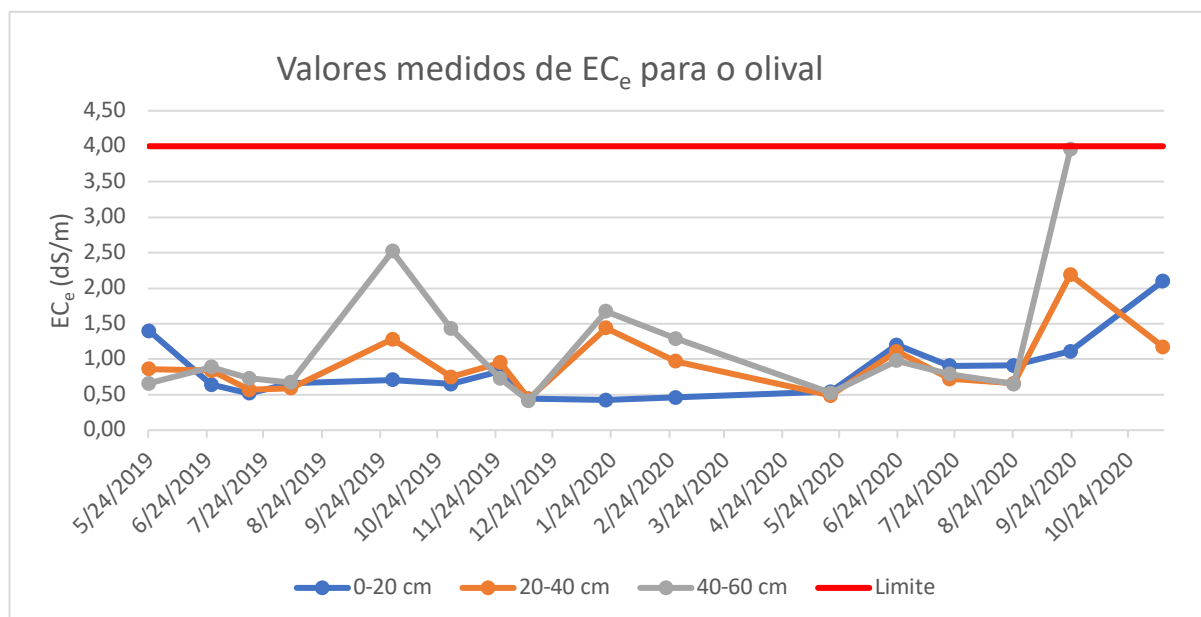


Figura 3.10 Gráfico com os valores da EC_e do olival intensivo para o período de observação entre 2019 e 2020 das diferentes profundidades e com o respetivo limite de tolerância da cultura à salinidade.

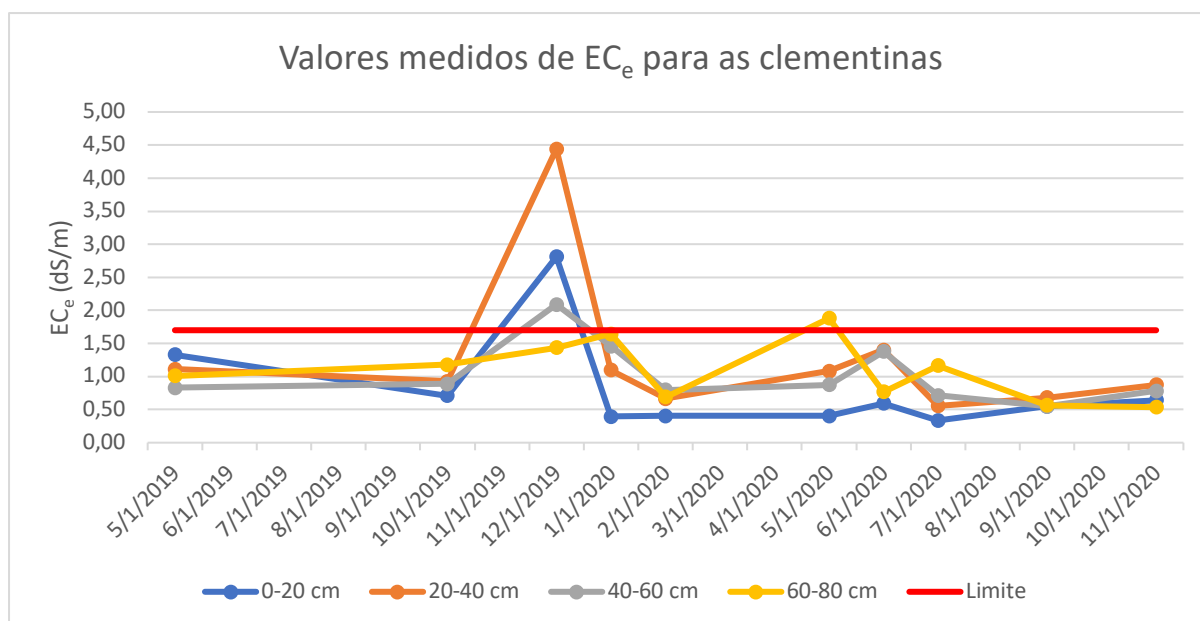


Figura 3.11 Valores da EC_e das clementinas para o período de observação entre 2019 e 2020 das diferentes profundidades e com o respetivo limite de tolerância da cultura à salinidade segundo Allen *et al.* (1998).

3.6. Gestão da rega

Os dados mais importantes da gestão de rega encontram-se na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Datas do início e fim de rega, valor médio e o número total de dotações de rega para as diferentes culturas nos anos 2019 e 2020.

Cultura	Amendoal		Olival intensivo		Clementinas		
	Ano	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Início		17/03	05/03	30/03	10/03	18/01	13/03
Fim		15/12	26/11	18/11	18/10	09/12	21/10
Nº de regas		185	154	91	71	200	157
Dotação média mm		3,5	5	3,8	4,5	3,3	5,5
Dotação total mm		649	772	356	323	635	858

No amendoal, em 2019, o maior período de rega diária sem intervalos foi de 117 dias, de 26/05 a 19/09, sendo que a maior dotação de rega realizada foi de 7,2 mm a 12/06. Em 2020 o maior período de rega foi de 13/06 a 10/08, correspondendo a um total de 59 dias, no dia 09/03 realizou-se a maior dotação de rega de 13 mm.

Para o olival intensivo não se verificaram períodos longos de regas diárias em ambos os anos, sendo que em 2019 e 2020 as dotações de rega máximas foram de 9,1 mm a 08/09 e 8,5 mm a 04/10, respetivamente.

As clementinas, no entanto, tiveram longos períodos de regas diárias sem intervalos, especialmente em 2019 com um total de 188 dias seguidos, de 02/05 a 05/11, com a dotação de rega mais alta a 29/03 de 20,2 mm. O ano de 2020 à semelhança do anterior teve um longo período de rega entre 27/05 e 09/08, correspondendo a 75 dias e a dotação de rega maior foi de 9,3 mm a 25/05.

3.7. Modelação da Dinâmica da Água e do Transporte de Solutos no Solo

3.7.1. Breve descrição da abordagem seguida

O modelo HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 2016) foi usado para modelar a dinâmica da água e sais nos três casos de estudo. Este modelo já foi anteriormente testado na previsão do efeito da aplicação de águas salinas na rega do milho e sorgo em Portugal (Ramos *et al.*, 2011, 2012). Uma das principais dificuldades à sua implementação é a definição, tão correta quanto possível, das condições de fronteira superiores (condições atmosféricas potenciais) quando sistemas altamente complexos como culturas perenes são objeto de estudo. Estes sistemas são caracterizados por superfícies heterogéneas, de vegetação esparsa, com densidades de plantação, altura e condução das árvores e gestão da entrelinha altamente variáveis. Todos estes fatores influenciam de forma diferente a quantidade de energia disponível para o processo evapotranspirativo, bem como a disponibilidade de água. O modelo HYDRUS-1D não dispõe de nenhum módulo de crescimento de plantas que possa sequer tentar reproduzir tais efeitos no solo. Porém, esta limitação é facilmente ultrapassada com a ligação ao modelo SIMDualKc (Rosa *et al.*, 2012), que calcula a evapotranspiração das culturas (ET_c) através da metodologia dos coeficientes culturais duais ($K_c = K_{cb} + K_e$), em que o K_{cb} representa o coeficiente cultural basal, correspondendo à componente da transpiração das culturas, e o K_e o coeficiente de evaporação, representando a componente da evaporação do solo. Para além disso, o modelo SIMDualKc dispõe de diversas adaptações para estimativa da evapotranspiração em sistemas perenes, nomeadamente, com vegetação ativa na entrelinha, com existência de *mulches*, em ambientes salinos, etc. Nas secções seguintes, descreve-se em maior detalhe, a abordagem seguida.

Após calibração e validação dos modelos, foram usados dados climáticos de reanálise entre 1979-2020 para os quais foram calculadas, para cada cultura, as necessidades de rega anuais com o modelo SIMDualKc. Após obter os valores anuais de rega, foram escolhidos os três anos correspondentes às necessidades de rega normais, altas e muito altas, assumindo uma probabilidade de não excedência de 50%, 80% e 95%, respetivamente (Pereira *et al.*, 2009). É importante notar que

os três anos para cada cultura não têm que necessariamente coincidir em todos os casos. O modelo HYDRUS-1D foi depois usado para o cálculo dos balanços de água e sais em cada um dos cenários a avaliar.

3.7.2. Descrição do modelo SIMDualKc

O SIMDualKc é um modelo desenvolvido no Instituto Superior de Agronomia (ISA), que permite fazer o cálculo da evapotranspiração cultural (ET_c) e também o planeamento e calendarização de rega de culturas de cobertura parcial do solo (pomares e hortícolas) com sistemas de rega de alta frequência, através da metodologia dos coeficientes culturais duais ($K_{cb} + K_e$) (Rosa *et al.*, 2012).

Para o modelo servir o seu propósito, efetua o balanço de água diário no solo na zona radicular, que é expresso em termos de depleção de água ao final do dia como pode ser confirmado na seguinte equação (Allen *et al.*, 1998, 2007):

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - R_i - CR_i + ET_{a,i} + DP_i \quad (4)$$

Onde:

$D_{r,i}$ – Depleção de água na zona radicular no final do dia i (mm);

$D_{r,i-1}$ – Depleção de água na zona radicular no final do dia anterior $i-1$ (mm);

P_i – Precipitação no dia i (mm);

RO_i – Escoamento superficial no dia i (mm);

R_i – Rega aplicada que se infiltrou no solo no dia i (mm);

CR_i – Ascensão capilar a partir do lençol freático no dia i (mm);

$ET_{a,i}$ – Evapotranspiração cultural real no dia i (mm);

DP_i – Água que sai da zona radicular por percolação profunda no dia i (mm).

Na Figura 3.12 está apresentado um modelo de como funciona o balanço hídrico na zona das raízes (Allen *et al.* 1998).

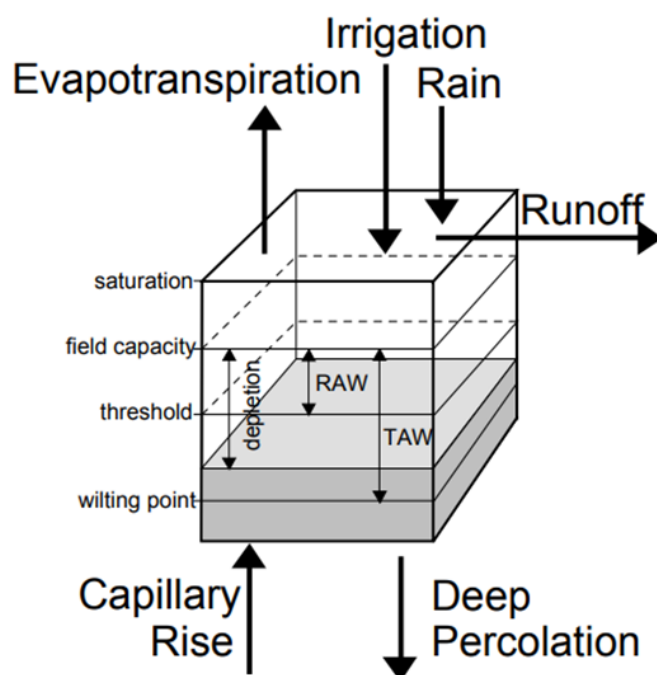


Figura 3.12 Balanço de água na zona das raízes.

Fonte: Allen *et al.*, 1998

A ET_c é descrita por Allen *et al.* (1998) como a evapotranspiração em condições *standard*, sendo essas definidas como uma cultura num grande terreno sob condições agronômicas e de água no solo excelentes. Este parâmetro pode também ser calculado por um coeficiente cultural (K_c) único, que engloba a evaporação do solo e a transpiração cultural e é normalmente usado em estudos que não necessitem de um K_c diário.

O cálculo da ET_c dá-se pela seguinte equação (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o = K_c \times ET_o \text{ (mm/dia)} \quad (5)$$

Onde a ET_o representa a evapotranspiração de referência, ou seja, a taxa de evapotranspiração (ET) de uma superfície coberta por relva com características específicas, onde a água não é um fator limitante. Os únicos fatores que afetam a ET_o são parâmetros climáticos (Allen *et al.*, 1998).

O K_c é um valor adimensional que varia sobretudo devido às características de cada cultura e apenas é ligeiramente influenciado pelo clima, isto permite que o mesmo valor de K_c possa ser usado

mesmo entre diferentes locais e climas. No entanto, em culturas perenes, uma vez que as suas características são altamente variáveis, o uso dos K_c tabelados não pode ser facilmente generalizado.

A implementação dos coeficientes culturais duais permite uma melhor estimativa da evapotranspiração cultural através do cálculo diário dos dois componentes do coeficiente cultural (K_c), o coeficiente basal da cultura (K_{cb}), que representa a transpiração da cultura (T_c), e o coeficiente de evaporação do solo (K_e), que representa a evaporação do solo (E_s). A fórmula é a seguinte:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (6)$$

O K_{cb} é definido pela razão entre a ET_c e a ET_o quando a superfície do solo está seca e quando a transpiração não é limitada pela água. Portanto $K_{cb} \times ET_o$ representa principalmente a transpiração da ET_c , no entanto K_{cb} inclui também pequenas quantidades de evaporação do solo devido à difusão. São necessários três valores de K_{cb} para traçar a sua curva: $K_{cb \text{ ini}}$, $K_{cb \text{ mid}}$ e $K_{cb \text{ end}}$, que representam valores médios de K_{cb} durante as diferentes fases de desenvolvimento das culturas (Allen *et al.*, 1998).

Allen *et al.* (1998, 2007) e Allen & Pereira (2009) fornecem valores recomendados de K_{cb} . Esses valores referem-se a um clima sub-húmido com uma humidade relativa mínima (RH_{\min}) média de 45% e com velocidade média do vento de 2 m/s. O K_{cb} tem que ser ajustado caso as condições climáticas de RH_{\min} e velocidade do vento difiram dos valores médios referidos.

A transpiração da cultura resulta então de:

$$T_c = K_{cb} ET_o \text{ (mm/dia)} \quad (7)$$

O K_e quando o solo está húmido, depois da ocorrência de precipitação ou da aplicação de rega, atinge o seu valor máximo, por outro lado quando o solo está seco o valor de K_e é baixo podendo mesmo chegar a zero. Onde o solo está humedecido pode-se dizer que a evaporação está a ocorrer à taxa máxima dependendo do grau de cobertura do solo. Mas o K_e não pode ultrapassar o valor máximo que é o coeficiente cultural máximo ($K_{c \text{ max}}$). O $K_{c \text{ max}}$ é determinado pela energia disponível para a ET à superfície do solo ($K_{cb} + K_e \leq K_{c \text{ max}}$).

Quando a água à superfície do solo começa a secar, menos água fica disponível para evaporar e conseqüentemente há uma diminuição na evaporação que ocorre proporcionalmente à quantidade de água restante na superfície do solo. A fórmula é dada por (Allen *et al.*, 1998):

$$K_e = K_r (K_{c \text{ max}} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c \text{ max}} \quad (8)$$

Onde:

K_e – Coeficiente de evaporação do solo (-);

K_{cb} – Coeficiente basal da cultura (-);

$K_{c\ max}$ – Valor máximo de K_c depois de chuva ou rega (-);

K_r – Coeficiente de redução da evaporação, dependente da profundidade cumulativa de água esgotada (evaporação) à superfície do solo (-);

f_{ew} – Fração do solo não coberta e húmida, que corresponde à fração do solo onde ocorre mais evaporação (-).

A taxa de evaporação total da fração exposta da superfície do solo é expressa por:

$$E_s = K_e ET_o \text{ (mm/dia)} \quad (9)$$

O valor de K_r é igual a um, após chuva ou rega, neste caso a evaporação é determinada pela energia disponível para evaporar. Assim que a superfície do solo começa a secar K_r fica menor que um e quando deixa de existir água na camada superior do solo o K_r assume o valor de zero. De modo a estimar o K_r o modelo necessita de calcular o balanço de água diário na camada evaporativa do solo (Allen *et al.*, 1998).

O comportamento da curva do K_{cb} e do K_e tem a forma apresentada na Figura 3.13. Os picos de K_e na mesma figura representam o aumento de evaporação quando há precipitação ou rega, estes deixam a superfície do solo húmida o que aumenta temporariamente a ET_c e influencia a curva do K_c .

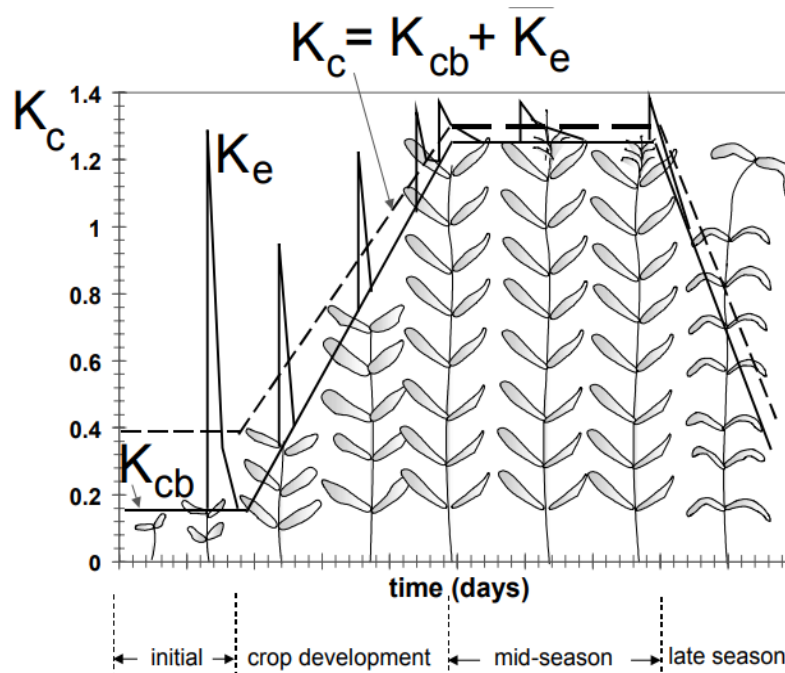


Figura 3.13 Exemplo do comportamento do K_{cb} e K_e de uma cultura. O K_{cb} é representado pela linha mais grossa, o K_e pela linha mais fina e a soma dos dois coeficientes pela linha a tracejado.

Fonte: Allen *et al.*, 1998

Quando uma cultura está em stresse hídrico no solo o coeficiente cultural real ($K_{c\ act}$) deixa de corresponder ao valor potencial (K_c), sendo o $K_{c\ act}$ obtido através da seguinte fórmula (Rosa *et al.*, 2012):

$$K_{c\ act} = K_s K_{cb} + K_e \text{ (mm/dia)} \quad (10)$$

Onde o K_s corresponde ao coeficiente de stresse de água.

Sobre stresse, a evapotranspiração real (ET_a) deixa de igualar o seu valor potencial (ET_c), progredindo assim a uma taxa mais baixa.

$$ET_a = K_{c\ act} ET_o \text{ (mm/dia)} \quad (11)$$

Tal como K_r , o K_s varia entre zero e um e depende do teor de água na zona das raízes. Para calcular o K_s é necessário um balanço de água diário para a zona das raízes, onde é calculado o teor médio de água na zona das raízes ao final de cada dia, que é expresso pela depleção de água na zona das raízes (D_r).

O K_s é expresso como uma função linear da depleção de água da zona das raízes, quando essa excede a reserva de água facilmente utilizável (RAW) presente na zona das raízes.

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1 - p) TAW} \text{ para } D_r > RAW \quad (12)$$
$$K_s = 1 \text{ para } D_r \leq RAW$$

Onde:

TAW – água total disponível no solo (mm);

RAW – reserva de água facilmente utilizável no solo (mm);

D_r – Depleção de água da zona das raízes (-);

p – Fração de depleção no início do stress (-).

As equações para TAW e RAW são:

$$TAW = 1000 Z_r (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \quad (13)$$

$$RAW = p TAW \quad (14)$$

Onde:

Z_r – Corresponde à profundidade das raízes (m);

θ_{FC} – Teor de água no solo à capacidade de campo (cm^3/cm^3);

θ_{WP} – Teor de água no solo no coeficiente de emurchecimento (cm^3/cm^3).

Quando a depleção $D_r > pTAW$, T_c começa a diminuir em proporção à quantidade restante de água na zona das raízes (Figura 3.14).

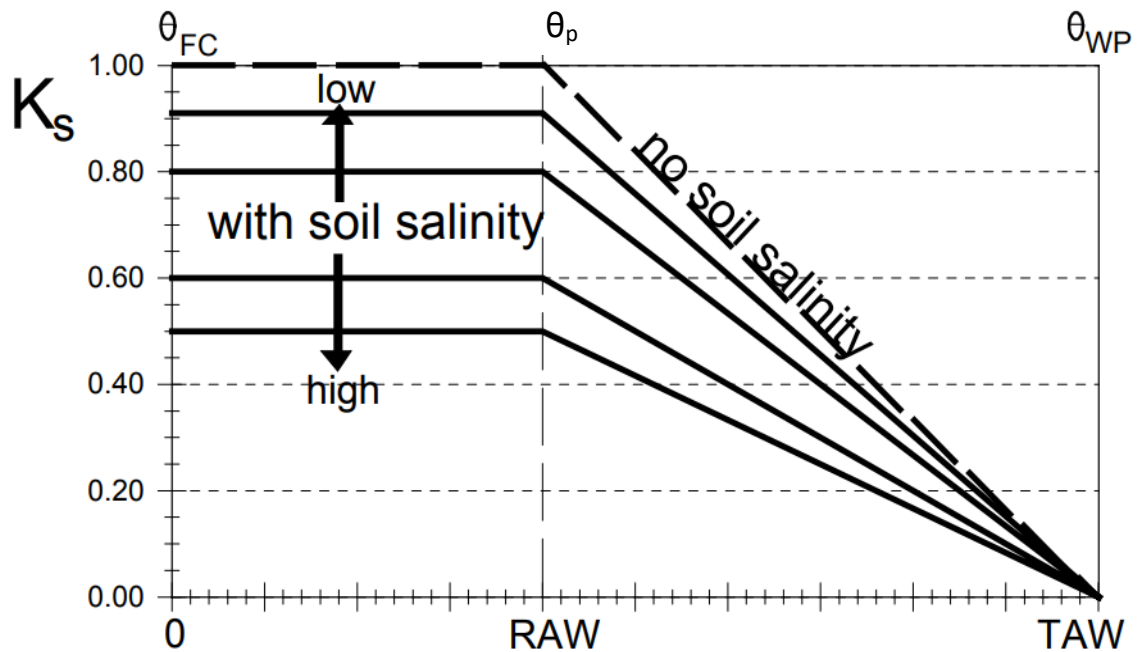


Figura 3.14 Comportamento do coeficiente de estresse de água, conforme a disponibilidade de água e salinidade do solo, onde θ_p representa o limiar a partir do qual o valor de K_s diminui.

Fonte: Allen *et al.*, 1998

A percolação profunda (DP) foi estimada através de uma equação paramétrica proposta por Liu *et al.* (2006), que requer conhecimento e calibração de alguns parâmetros empíricos.

$$W = a_D t^{b_D} \quad (15)$$

Onde:

W – Armazenamento real de água na zona das raízes (mm);

a_D – Valor compreendido entre o teor de água armazenado no solo à capacidade de campo e saturação do solo (mm);

$b_D < -0,0173$ para solos de drenagem rápida e $b > -0,0173$ para solos de drenagem lenta (-);

t – Tempo, após rega ou chuva, que o solo fica com água armazenada acima da capacidade de campo (dia);

O escoamento superficial (RO) durante a precipitação ou rega é influenciado por vários fatores como a cobertura do solo, o declive, a textura e estrutura do solo, a presença de crosta superficial, teor inicial de água no solo e duração e intensidade da precipitação. Estes parâmetros geralmente são muito difíceis de quantificar, por haver falta de dados. Por isso é usado o método do número de escoamento (CN) que é um simples modelo empírico para estimar o RO que foi desenvolvido pelo *Soil conservation service* (USDA-SCS, 1972). Tem apenas dois parâmetros: o valor de CN e a depleção de água inicial. O CN está relacionado com a textura do solo e pode ser estimado através de tabelas (Figura 3.15) como as encontradas em Allen *et al.* (2007). Em modelos de simulações contínuas o valor de CN é atualizado diariamente sendo que pode variar de 0 (não há escoamento) até 100 (toda a precipitação é escoada).

Crop	Soil Texture		
	Coarse	Medium	Fine
Spring wheat	63	75	85
Winter wheat	65	75	85
Field corn	67	75	85
Potatoes	70	76	88
Sugar beets	67	74	86
Peas	63	70	82
Dry edible beans	67	75	85
Sorghum	67	73	82
Cotton	67	75	83
Paddy rice	50	60	70
Sugar cane, virgin	60	69	75
Sugar cane, ratoon	60	68	76
Fruit trees, bare soil	65	72	82
Fruit trees, ground cover	60	68	70
Small garden vegetables	72	80	88
Tomatoes	65	72	82
Alfalfa hay	60	68	77
Suggested defaults	65	72	82

Figura 3.15 Números de escoamento para diversas culturas para solos com texturas variadas.

Fonte: USDA-SCS, 1972

A componente da ascensão capilar (CR) é igual a zero por não existir toalha freática por baixo de nenhuma das culturas estudadas

Um resumo do modelo SIMDualKc pode ser encontrado na Figura 3.16 na qual está explicado como foi estruturado.

O Modelo SIMDualKc

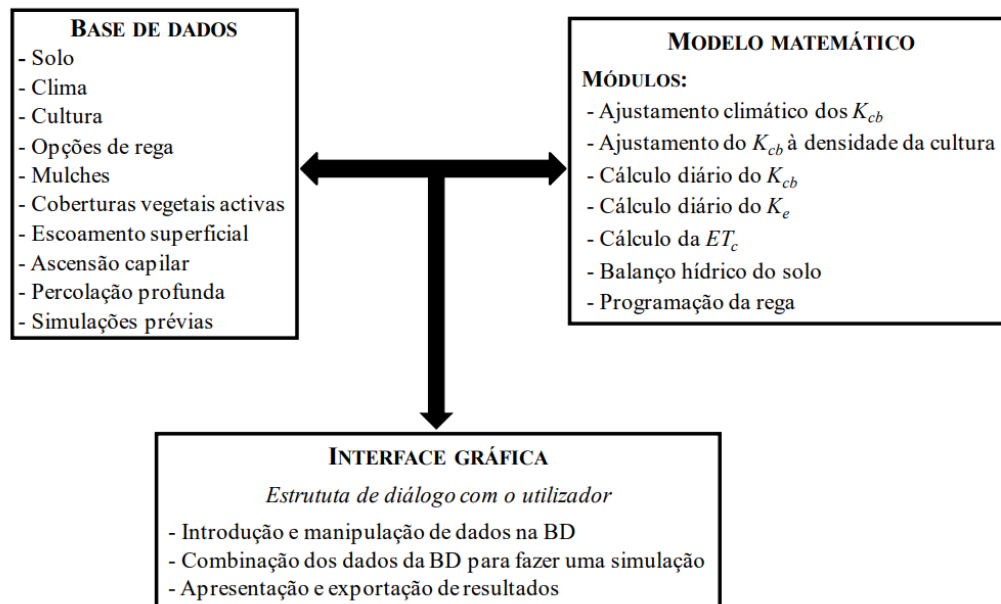


Figura 3.16 Estrutura do modelo SIMDualKc.

Fonte: Rosa *et al.* 2010

3.7.3. Dados de entrada do modelo SIMDualKc

O modelo SIMDualKc necessita de informação detalhada sobre as condições meteorológicas, as propriedades do solo, a fenologia das culturas, o calendário e sistema de rega de modo a calcular o balanço de água no solo.

Os dados de entrada no modelo podem então ser divididos entre *inputs* obrigatórios e opcionais (Figura 3.17).

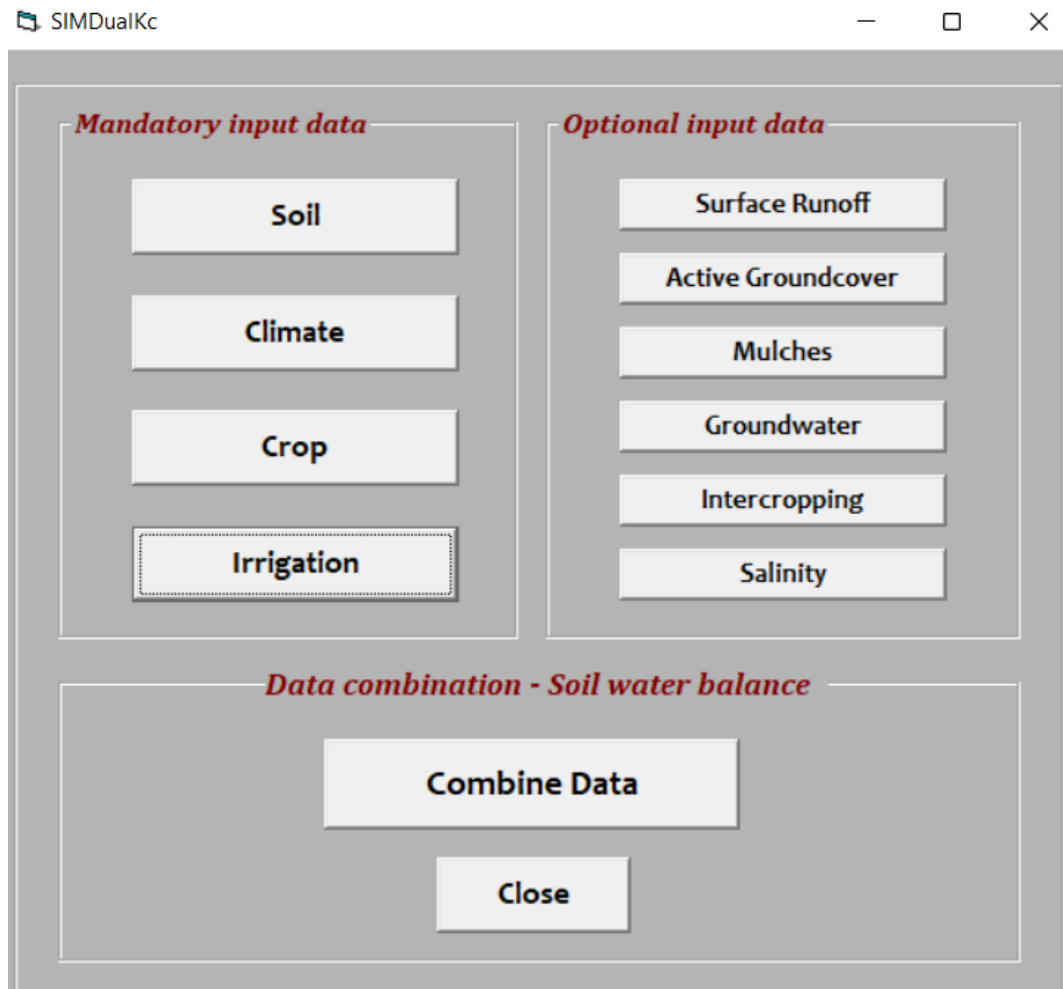


Figura 3.17 Menu do modelo SIMDualKc.

Fonte: SIMDualKc

3.7.3.1. Condições meteorológicas

As condições meteorológicas foram obtidas da estação meteorológica local. Os valores retirados foram os das temperaturas máximas e mínimas do ar (T_{max} e T_{min} , °C), precipitação (mm), humidade relativa média (RH_{med} , %) e mínima (RH_{min} , %), radiação solar (R_s , MJ/m²/dia) e velocidade

do vento (m/s) medido a uma altura de 2 m, dados que estão presentes nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 no capítulo 3.3. Clima. O modelo usou os *inputs* referidos para calcular a ET_o diária dos anos de 2019 e 2020 de acordo com a fórmula de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

3.7.3.2. Propriedades do solo

O perfil do solo foi caracterizado através da distribuição do tamanho das partículas e das propriedades hidráulicas dos diferentes horizontes do solo encontrados nas Tabelas 3.1 e 3.2. O valor de água total disponível para as plantas (TAW, mm) foi obtido automaticamente pelos valores da fração do volume da capacidade de campo (θ_{FC}), do coeficiente de emurchecimento (θ_{WP}) e da profundidade total do solo. O valor de água total evaporável (TEW, mm) e a água facilmente evaporável (REW, mm) foram calculados de acordo com as características de retenção de água da camada evaporativa do solo e da textura do solo, respetivamente. A profundidade da camada evaporável (Z_e) varia de 0,1 m a 0,15 m de acordo com Allen *et al.* (1998, 2005). O CN foi também definido tendo em conta a distribuição do tamanho das partículas da superfície do solo (USDA-SCS, 1972). Os parâmetros das perdas por percolação relativos à equação paramétrica de Liu *et al.* (2006) foram obtidos de acordo com os dados de textura do solo, θ_s e θ_{FC} . Por último, os valores de depleção inicial de água no solo na zona das raízes e na camada evaporativa do solo foram introduzidos em percentagem e definidos a partir de medições feitas no início do ano, que correspondem a uma época mais húmida.

3.7.3.3 Fenologia das culturas

Os dados relativos à fenologia das culturas incluem as datas dos diferentes estádios de desenvolvimento das culturas (Tabela 3.6). O $K_{cb\ ini}$, o $K_{cb\ mid}$ e o $K_{cb\ end}$ do olival foram baseados em Rallo *et al.* (2021) e os do amendoal e das clementinas em Allen *et al.* (1998), tal como os valores da fração de depleção de água no solo para o qual não há stresse (p_{ini} , p_{mid} , p_{end}) (Tabela 3.7). A altura das plantas (h_c), a fração estimada de cobertura do solo (f_c) e a profundidade das raízes (Z_r) para cada cultura foram obtidas com base nas observações *in situ* (Tabela 3.8).

Tabela 3.6 Duração dos diferentes estágios de crescimento das diferentes culturas.

Fases de crescimento da cultura	Amendoal		Olival intensivo		Clementinas		
	Ano	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Sem crescimento	01/01	01/01	01/01	01/01	01/01	01/01	01/01
Inicial	15/01	20/01	05/03	05/03	10/02	15/02	
Desenvolvimento	08/02	15/02	19/03	20/03	01/03	05/03	
Médio	01/03	01/03	01/06	20/06	25/05	01/06	
Senescência	25/08	30/08	25/09	01/10	01/12	01/12	
Final	01/11	05/11	05/11	20/11	-	-	

Tabela 3.7 Respetivos valores de K_{cb} e p usados como entradas no modelo.

Parâmetros	Coeficientes basais das culturas			Fator de esgotamento		
	$K_{cb\ ini}$	$K_{cb\ mid}$	$K_{cb\ end}$	p_{ini}	p_{mid}	p_{end}
Amendoal	0,2	0,85	0,6	0,6	0,45	0,6
Olival intensivo	0,35	0,35	0,3	0,6	0,65	0,65
Clementinas	0,8	0,8	0,85	0,5	0,5	0,5

Tabela 3.8 Características das diferentes culturas.

Culturas	Fração de cobertura do solo (f_c)	Fração do solo humedecida pela rega (f_w)	Altura das plantas (h_c , m)	Diâmetro da copa (m)	Profundidade das raízes (Z_r , m)
Amendoal	0,1 – 0,4 – 0,2	0,12	> 4	3,65	1
Olival intensivo	0,2 – 0,22 – 0,22	0,09	> 4	3	0,8
Clementinas	0,25 – 0,28	0,12	2,3	1,8	1

3.7.3.4. Rega

Os dados de rega foram inseridos no modelo de acordo com a sua data e quantidade de água aplicada, foi também discriminado o sistema de rega usado e a fração do solo humedecida pela rega (f_w).

3.7.3.5. *Mulches*

Nos *mulches* que representam a cobertura vegetal da entrelinha após seca, é permitido escolher o seu tipo (orgânico ou plástico), a data de instalação que corresponde ao início do ano, a espessura onde que foi considerada como média numa escala que varia entre fina e grossa, a fração do solo coberta por *mulches* e a percentagem de redução na evaporação do solo que foi de 50% para todas as culturas.

3.7.3.6. Salinidade

No SIMDualKc podem ser também introduzidos valores de salinidade para o solo e água de rega. Para a salinidade do solo foram usados os valores mensais de EC_e monitorizados ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas (Figuras 3.9, 3.10, 3.11), enquanto para a EC_w foi usado um único valor de 0,72 dS/m para todo o ano, que corresponde ao valor médio medido pelo condutivímetro durante a investigação.

3.7.3.7. Cobertura do solo ativa

Após observação *in situ*, foi considerada cobertura do solo na entrelinha apenas para a cultura do amendoal e das clementinas. A finalidade do uso da mesma tem como objetivos a proteção do solo contra a degradação, diminuição da amplitude térmica sentida no solo favorecendo assim as culturas e também a biodiversidade do solo. Esta cobertura é controlada mecanicamente ou com recurso a herbicida, quando começa a competir por água com a cultura instalada.

3.7.4. Calibração e validação do modelo SIMDualKc

O SIMDualKc foi calibrado através do método de tentativa e erro para os dados obtidos no ano de 2019. Este processo consistiu em ajustar parâmetros do modelo um de cada vez, dentro de um intervalo de valores razoáveis até que o desvio entre os valores medidos e simulados do teor de água no solo fosse o mais baixo possível. Os parâmetros calibrados foram os K_{cb} , os p , a Z_e , a TEW e o CN (Tabela 4.1). A calibração só foi dada como terminada quando os valores foram considerados aceitáveis. A validação foi realizada pela comparação dos dados medidos do teor de água no solo medidos em 2020, com as previsões do respetivo modelo usando os parâmetros previamente calibrados.

Para avaliar o desempenho do modelo foram usados vários indicadores estatísticos, que estão explicados com mais detalhe no capítulo da 3.8. Análise Estatística.

3.7.5. Descrição do modelo HYDRUS-1D

O HYDRUS-1D é um modelo desenvolvido na Universidade da Califórnia, *Riverside* que permite simular o movimento da água, calor e sais na zona vadosa do solo (Šimůnek *et al.* 2013). Há também

outros modelos da série HYDRUS que simulam o transporte a duas e três dimensões, no entanto a versão (uma dimensão) 1D simplifica este processo desprezando o movimento de água, sais e calor no eixo horizontal do solo (Šimůnek *et al.*, 2008).

Algumas das aplicações agrícolas do HYDRUS-1D são a avaliação de vários sistemas de rega (*e.g.*, Cote *et al.*, 2003; Ben-Gal *et al.*, 2004; Gärdenäs *et al.*, 2005; Dabach *et al.*, 2013), estudos de absorção de água e perdas por percolação (*e.g.*, Turkeltaub *et al.*, 2014; Neto *et al.*, 2016), transporte de contaminantes agrícolas (Wehrhan *et al.*, 2007; Unold *et al.*, 2009; Engelhardt *et al.*, 2015) e os efeitos que diversas práticas de rega têm na salinização e sodicização do solo (*e.g.*, Corwin *et al.*, 2007; Hanson *et al.*, 2008; Ramos *et al.*, 2011).

O modelo foi aplicado várias vezes em diferentes cenários desde em pequenas amostras de solo até solos de uso agrícola com profundidades de um metro ou mais (*e.g.*, Gärdenäs *et al.*, 2005; Hanson *et al.*, 2006).

Este modelo usa a equação de Richards para fazer o cálculo do fluxo saturado/ não saturado de água no solo e a equação de convecção-dispersão para o transporte de sais. A equação de Richards é descrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right] - S(z,t) \quad (16)$$

Onde:

θ - Teor de água volumétrica no solo (cm^3/cm^3);

t - Tempo (dias);

z - Coordenada vertical do espaço (cm);

h - Pressão efetiva da água do solo (cm);

$K(h)$ - Condutividade hidráulica do solo (cm/dia);

S - Sumidouro que representa a extração de água do solo ($\text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{dia}$).

As propriedades hidráulicas do solo, isto é, a curva de retenção de água no solo $\theta(h)$ e a curva da condutividade hidráulica insaturada $K(h)$, foram descritas com as funções propostas por Mualem-van Genuchten (1980).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$K(h) = K_{sat} S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad \text{onde } m = 1 + n > 1 \quad (18)$$

Onde:

θ_s – Teor de água na saturação (cm^3/cm^3);

θ_r – Teor de água residual (cm^3/cm^3);

α (cm^{-1}), m , n – Parâmetros empíricos (-);

S_e – Teor efetivo de água (cm^3/cm^3);

K_{sat} – Condutividade hidráulica saturada (cm/dia);

l – Fator de conectividade/tortuosidade do solo (-).

As equações acima têm cinco parâmetros independentes: θ_s , θ_r , α , l e o K_{sat} . O valor usado para o parâmetro de conectividade de poros (l) na função da condutividade hidráulica foi o estimado por Mualem (1976) de 0,5. Valor esse que é comum para muitos dos solos.

O parâmetro S é definido como o volume de água retirado de uma unidade de volume de solo por unidade de tempo devido à absorção das raízes e é calculado através da abordagem definida por Feddes *et al.* (1978). Nesta abordagem a taxa de transpiração potencial, T_p (mm/dia), é distribuída pela zona das raízes através da função de distribuição normalizada da densidade das raízes, $\beta(z, t)$ (cm^{-1}), e multiplicada pela função adimensional de resposta ao stresse, $\alpha(h, h_\phi, z, t)$, que engloba o stresse hídrico e osmótico (Feddes *et al.*, 1978; van Genuchten, 1987; Šimůnek & Hopmans, 2009):

$$S(h, h_\phi, z, t) = S(h, h_\phi, z, t) S_p(z, t) = \alpha(h, h_\phi, z, t) \beta(z, t) T_p(t) \quad (19)$$

Onde:

$S_p(z, t)$ e $S(h, h_\phi, z, t)$ - Volumes potenciais e reais de água retirada pelas plantas de uma unidade de volume do solo por unidade de tempo ($\text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{dia}$), respetivamente;

$\alpha(h, h_\phi, z, t)$ – Fator de redução da extração de água pelas plantas em função da pressão efetiva de água no solo (h) e do potencial osmótico (h_ϕ) ($0 \leq \alpha \leq 1$).

A taxa de transpiração real, T_r (mm/dia) é obtida através da integral da equação 19 sobre a profundidade da raiz, L_r .

$$T_r = \int_{L_r} S(h, h_\phi, z, t) dz = T_p \int_{L_r} \alpha(h, h_\phi, z, t) \beta(z, t) dz \quad (20)$$

A redução de absorção de água pelas raízes devido ao stresse de água é explicada pelo modelo de Feddes *et al.* (1978) na Figura 3.18.

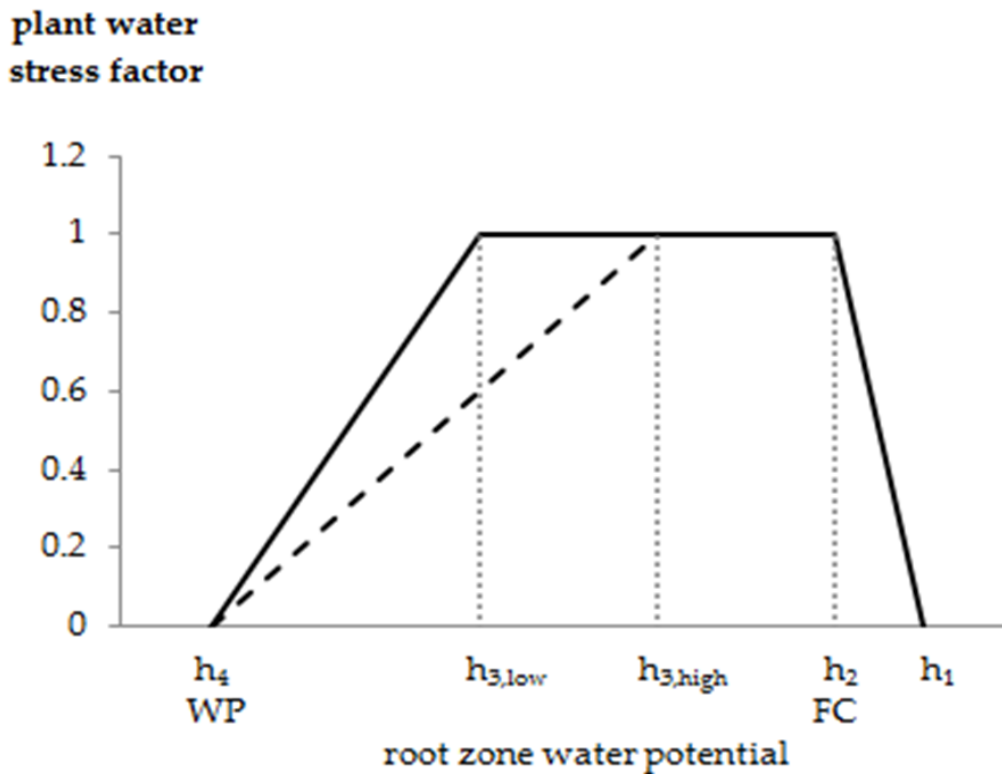


Figura 3.18 Curva da resposta das plantas ao stresse hídrico.

Fonte: Feddes *et al.*, 1978

O modelo de redução de absorção da água é dividido em vários valores:

h_1 – Pressão efetiva da água do solo abaixo da qual as raízes começam a extrair água do solo (cm);

h_2 – Pressão efetiva da água do solo abaixo da qual as raízes extraem água à taxa mais alta possível (cm);

h_{3H} – Pressão efetiva da água do solo limitante (cm), abaixo da qual as raízes deixam de conseguir extrair água à taxa mais elevada (assumindo uma taxa de transpiração potencial de 0,5 cm/dia);

h_{3L} – Igual a h_{3H} (cm), mas para uma taxa de transpiração potencial de 0,1 cm/dia;

h_4 – Pressão efetiva da água do solo abaixo da qual deixa de existir absorção de água pelas raízes (cm);

A absorção de água atinge, portanto, o seu valor potencial entre h_2 e h_{3L} , decresce linearmente quando $h > h_2$ ou $h < h_{3L}$ e é zero quando $h < h_4$ ou $h > h_2$.

A redução de absorção de água devido ao stresse causado pelos sais, $\alpha_2(h_\phi)$, foi descrita através do modelo de Maas & Hoffman (1984).

$$\alpha_2(h_\phi) = 1, EC \leq EC_{e \text{ threshold}} \quad (21)$$

$$\alpha_2(h_\phi) = 1 - (EC - EC_{e \text{ threshold}}) 0,01s, EC > EC_{e \text{ threshold}} \quad (22)$$

Onde:

$EC_{e \text{ threshold}}$ – Limiar de tolerância da cultura à salinidade (dS/m), que corresponde ao valor de EC_e acima do qual a absorção de água pelas raízes sofre uma redução;

s – Declive da curva que determina a diminuição da absorção de água por unidade de aumento de EC_e (%/dS/m).

A representação gráfica do efeito da salinidade na produção das culturas está apresentada na Figura 3.19.

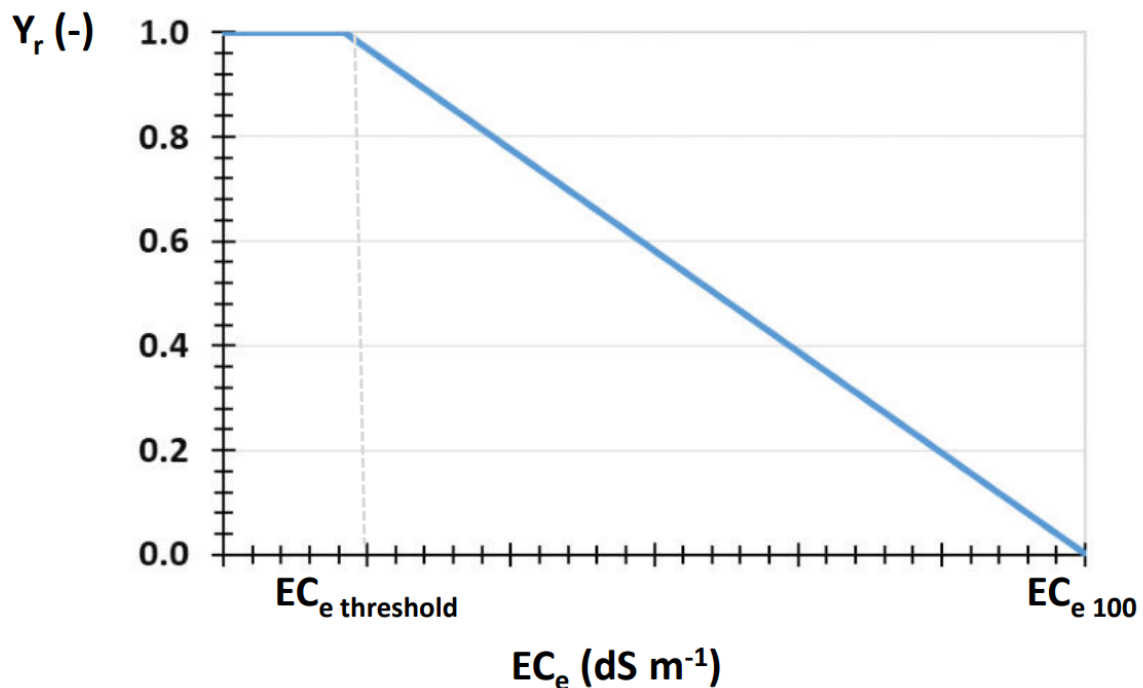


Figura 3.19 Relação entre a salinidade e a diminuição de produção das culturas. Y_r – Fator relativo de diminuição de produção da cultura; $EC_{e 100}$ – Limiar a partir do qual a cultura cessa totalmente a sua produção.

Fonte: Adaptado de Minhas *et al.*, 2020

A diminuição da produção da cultura dá-se a partir da $EC_{e\text{ threshold}}$, a partir do qual há uma perda de produção linear até chegar a uma produção nula.

O HYDRUS-1D fornece uma base de dados com valores referentes aos parâmetros da salinidade para diferentes plantas, baseados no trabalho de Maas (1990). Estes valores são apresentados já convertidos para a condutividade elétrica da solução do solo (EC_{ss}), simulada pelo modelo, a partir da seguinte equação (Richards, 1954):

$$EC_{ss} = k_{EC} \times EC_e \quad (23)$$

Onde k_{EC} é a relação da condutividade elétrica da água do solo *in situ* à capacidade de campo e a condutividade elétrica da água do solo no extrato de saturação. O valor assumido para k_{EC} é dois que é um valor usado normalmente para solos com um teor de água próximo da capacidade de campo e de textura média.

A equação de convecção-dispersão foi usada para simular o transporte de sais no solo:

$$\frac{\partial \theta C_k}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial qC}{\partial z} - S_{C_r} \quad (24)$$

Onde:

θ – Teor volumétrico de água no solo (cm^3/cm^3);

c , \bar{c} e c_r – Concentração de sais na fase líquida (g/cm^3), fase sólida (g/g) e na água extraída pelas plantas (g/cm^3), respetivamente;

ρ – Densidade aparente do solo (g/cm^3);

q – Fluxo de água no solo (cm/dia);

D – Coeficiente hidrodinâmico de dispersão (cm^2/dia);

Nesta aplicação, a EC é simulada como um soluto não reativo, não havendo, portanto, adsorção à fase sólida do solo, nem extração pelas plantas.

3.7.6. Dados de entrada do HYDRUS-1D

O modelo HYDRUS-1D permite simular vários aspectos referentes às interações entre a água, o solo, os sais e as culturas em estudo como é visível na Figura 3.20.

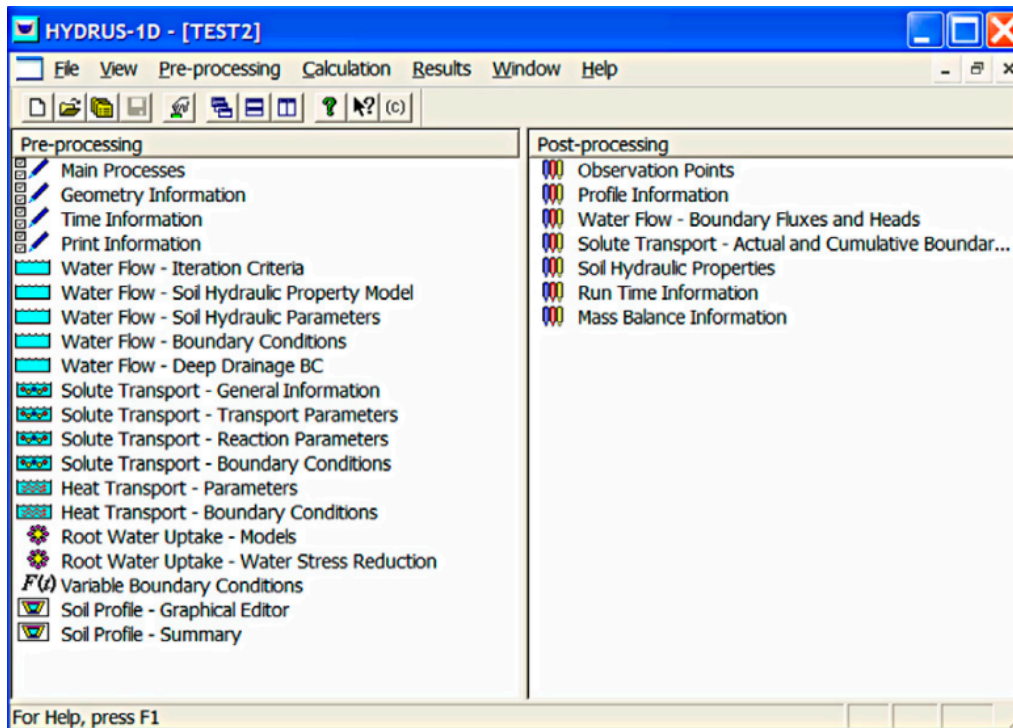


Figura 3.20 Página inicial do software HYDRUS-1D.

Fonte: Šimůnek *et al.*, 2008

O modelo permite inicialmente escolher quais são os parâmetros que vão ser simulados nos quais foram selecionados o fluxo da água vertical, o transporte de sais e o método de cálculo, a água absorvida pelas raízes das plantas e ainda se é necessária fazer modelação inversa dos teores de água do solo medidos às diferentes profundidades.

3.7.6.1. Solo

O valor de profundidade do solo definido foi de 200 cm e o número de horizontes foi quatro para todas as culturas de modo a melhor ajustar o modelo aos dados medidos do teor de água do solo.

3.7.6.2. Parâmetros hidráulicos do solo

Os parâmetros hidráulicos do modelo de Mualem-van Genuchten (1980) foram ajustados por modelação inversa aos dados medidos pelos sensores às diferentes profundidades. Têm de ser introduzidos valores para a estimativa inicial dos parâmetros e um limite máximo e mínimo. É necessário também introduzir os valores medidos do teor de água do solo.

3.7.6.3. Parâmetro de transporte de solutos

O parâmetro de transporte de solutos é dividido em parâmetros específicos do solo (Tabela 3.9) e de solutos.

Tabela 3.9 Parâmetros específicos do solo, nos quais presentes: a densidade média aparente e a dispersividade longitudinal para o olival intensivo.

Horizonte	Parâmetros específicos do solo	
	Densidade aparente g/cm ³	Dispersividade longitudinal cm
1	1,38	2
2	1,38	2
3	1,38	2
4	1,38	14

A densidade aparente para todos materiais na cultura das clementinas e amendoal é uma média dos valores da Tabela 3.2. A dispersividade longitudinal, foi definida para cada horizonte de cada cultura como um décimo da sua espessura (Ramos *et al.*, 2012).

3.7.6.4. Parâmetros de absorção de água das raízes

Como referido anteriormente foram usados os parâmetros de Feddes *et al.* (1978) para o modelo de redução de absorção da água (Tabela 3.10) e o modelo de Maas & Hoffman (1984) para o efeito da salinidade na cultura.

Tabela 3.10 Valores do modelo de redução de absorção de água segundo os parâmetros de Feddes *et al.* (1978) para todas as culturas.

Limiares cm	Amendoal	Olival intensivo	Clementinas
h₁	-10	-10	-10
h₂	-25	-25	-25
h_{3H}	-200	-3.000	-200
h_{3L}	-800	-5.000	-1.000
h₄	-15.000	-18.000	-8.000

Os parâmetros para o olival intensivo e clementinas foram retirados de Egea *et al.* (2016) e Peddinti *et al.* (2018), respetivamente, e os do amendoal foram adaptados de Phogat *et al.* (2018).

Os valores de $EC_{e \text{ threshold}}$ (dS/m) e s (%/dS/m) para o amendoal e as clementinas foram retirados de Allen *et al.* (1998) para serem introduzidos no modelo, porém os valores tiveram de ser convertidos em condutividade elétrica da água do solo à capacidade de campo pela equação 23, onde o valor de $EC_{e \text{ threshold}}$ é multiplicado por dois e o valor de s é dividido por dois. Os valores usados estão apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 Valores de $EC_{e \text{ threshold}}$ e s segundo Allen *et al.* (1998) e respectiva conversão para o modelo HYDRUS-1D.

Valores Allen <i>et al.</i> (1998)			
Parâmetros	Amendoal	Olival intensivo	Clementinas
$EC_{e \text{ threshold}}$ (dS/m)	1,5	4	1,7
s (%/dS/m)	19	16	16
Valores HYDRUS-1D			
$EC_{e \text{ threshold}}$ (dS/m)	3	8	3,4
s (%/dS/m)	9,5	8	8

3.7.6.5. Condições fronteira superiores e inferiores

As condições fronteiras superiores correspondem à evaporação e transpiração potenciais diárias que foram obtidas no modelo SIMDualKc, segundo a metodologia dos coeficientes culturais (K_c) duais (Allen *et al.*, 1998), que calcula separadamente a transpiração da cultura da evaporação do solo. Para além disso, a precipitação e a rega efetuada pelos agricultores completam as condições de fronteira superiores. Como condição de fronteira inferior foi definida a drenagem livre.

3.7.6.6. Condições iniciais

Usando um editor gráfico integrado no modelo, definiu-se a profundidade dos quatro horizontes, o primeiro de 0 - 20 cm, o segundo de 20 - 40 cm, o terceiro de 40 - 60 cm e o último de 60 - 200 cm. A profundidade das raízes considerada para todas as culturas foi 100 cm.

Para os diferentes horizontes considerados também foi atribuído um teor de água inicial que foi obtido pelas sondas capacitivas instaladas no solo (Tabela 3.12).

Tabela 3.12 Valores referentes ao teor inicial de água no solo no início do ano medidos pelas sondas capacitivas para todas as culturas nos anos 2019 e 2020.

Ano	Profundidade cm	Teor inicial de água cm ³ /cm ³			EC _e inicial dS/m		
		Amendoal	Olival intensivo	Clementinas	Amendoal	Olival intensivo	Clementinas
2019	10	0,2338	0,3599	0,1816			
	30	0,2172	0,3732	0,1704			
	50	0,1791	0,3950	0,1729	2,06	1,95	2,14
	70	0,1851	0,4075	0,1707			
2020	10	0,2341	0,4475	0,1815			
	30	0,2135	0,4458	0,1737			
	50	0,1928	0,4048	0,1809	2,52	2,33	2,3
	70	0,1810	0,4162	0,1747			

A concentração de sais no solo inicial foi obtida através da média da EC_e (dS/m) nas amostras de solo perturbadas feitas às diferentes profundidades, esse valor foi posteriormente multiplicado por dois para ser inserido no programa seguindo a equação 23. Há um aumento significativo nos valores de EC_e de 2019 para 2020 que se deveu às primeiras amostras de 2019 serem de maio onde já ocorreu lixiviação pela precipitação ocorrida durante o inverno e a primavera, e as amostras de 2020 que são de janeiro onde a lixiviação de sais é menor que em maio.

No editor gráfico foram selecionadas cinco profundidades de observação (Figura 3.21), correspondendo cada uma a uma profundidade diferente (0,1, 0,3, 0,5, 0,7 e 1,2 m). Os dados simulados a essas profundidades permitiram chegar ao balanço de água e sais do solo. As profundidades foram escolhidas para coincidirem com os dados de teor de água medidos nos dois anos. A razão pela qual foi pedida uma simulação adicional à profundidade de 1,2 m, foi para obter os valores das perdas por percolação e de lixiviação de sais, onde já não há presença de raízes.

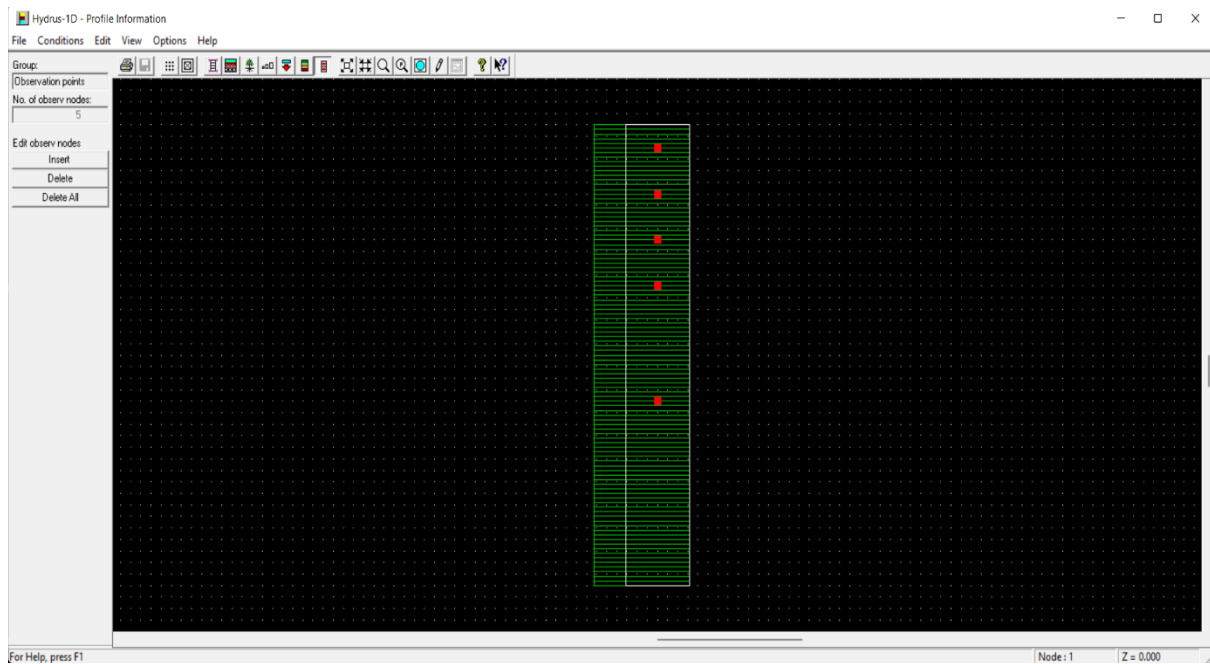


Figura 3.21 Imagem do editor gráfico com as cinco profundidades de observação selecionadas com um quadrado vermelho, sendo que os retângulos verdes correspondem à profundidade do solo.

Fonte: HYDRUS-1D

3.7.7. Calibração e validação do modelo HYDRUS-1D

A modelação inversa proposta por Šimůnek & van Genuchten (1996) foi usada para calibrar os valores dos parâmetros hidráulicos (θ_r , θ_s , α , λ , K_{sat}) dos diferentes horizontes dos solos das culturas estudadas em 2019. Os parâmetros hidráulicos foram estimados a partir dos dados do teor de água do solo medidos às diferentes profundidades pelos sensores instalados no campo. Este método de inversão teve como objetivo minimizar a discrepância entre os valores medidos e observados do teor de água no solo às diferentes profundidades (0,1, 0,3, 0,5, 0,7 m). As estimativas iniciais foram melhoradas iterativamente do horizonte mais superficial do solo para o mais profundo, até os valores medidos e observados apresentarem valores razoáveis (Šimůnek & van Genuchten, 1996; Hopmans *et al.*, 2002; Ramos *et al.*, 2006). As previsões do modelo foram depois validadas com os dados medidos em 2020.

3.8. Análise Estatística

Em ambos os modelos, de forma a avaliar o seu desempenho na predição dos valores medidos foi feita uma análise estatística. Esta análise consistiu no uso de diversos indicadores estatísticos que incluíram o coeficiente de regressão forçado à origem (b_0), o coeficiente de determinação (R^2), o erro quadrático médio (RMSE), o rácio do RMSE para o desvio padrão dos dados medidos (NRMSE), o desvio percentual de estimativa (PBIAS) e a eficiência de modelação (EF). Estes indicadores são usados frequentemente por vários autores (*e.g.*, Nash & Sutcliffe, 1970; Legates & McCabe, 1999; Moriasi *et al.*, 2007; Cholpankulov *et al.*, 2008).

As fórmulas de cada indicador são as seguintes:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (25)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (26)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (27)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (28)$$

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (29)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (30)$$

Onde:

O_i e P_i – Dados medidos e simulados no período i , respetivamente;

\bar{O} e \bar{P} – Valores médios dos dados medidos e simulados;

n - Número de observações.

Os diferentes indicadores têm significados distintos sendo que o b_0 quanto mais próximo tiver de um, mais os valores modelados são estatisticamente próximos dos valores medidos.

Valores de R_2 próximos de um estão associados ao modelo explicar bem a variabilidade das observações.

RMSE e NRMSE com valores a aproximarem-se de zero indicam pequenos erros de estimativa e boas previsões de modelos (Legates & McCabe, 1999).

Se o PBIAS for próximo de zero indica que as simulações do modelo são precisas, caso o valor seja ligeiramente mais alto que zero quer dizer que há uma subestimativa da tendência, caso contrário há uma sobre estimativa.

Por fim, valores de EF próximos de um indicam que a variância dos resíduos é muito menor do que a variância dos dados medidos, conseqüentemente as previsões do modelo são boas. Pelo contrário se a EF for próxima ou menor que zero, o modelo previsto é pior do que usar a média observada (Nash & Sutcliffe, 1970).

Para além da análise estatística também foi feita a representação gráfica dos valores simulados, em conjunto com os medidos de forma a perceber se existe uma boa sobreposição dos dados (Apêndices I a N).

3.9. Produtividade da Água

Tal como a designação do projeto no qual este trabalho está integrado indica, “Aumento da produtividade do regadio através do uso sustentado do solo”, há a necessidade de aumentar a produtividade das culturas, reduzindo a quantidade de recursos utilizados, principalmente a água, sem comprometer a produção das culturas. Por este motivo é importante usar indicadores de produtividade da água, para avaliar as diferentes culturas. Esses indicadores englobam a produtividade da água (WP_{WU} , kg/m^3), a produtividade da água de rega (WP_{Irrig} , kg/m^3), a produtividade da água evapotranspirada (WP_{ETc} , kg/m^3) e a produtividade da água transpirada, ou seja, efetivamente usada pelas plantas (WP_T , kg/m^3).

As equações correspondentes a cada indicador encontram-se em Pereira *et al.* (2020):

$$WP_{WU} = \frac{Y_a}{TWU} = \frac{Y_a}{P + CR + R + \Delta SW} \quad (31)$$

$$WP_{Irrig} = \frac{Y_a}{IWU} \quad (32)$$

$$WP_{ETc} = \frac{Y_a}{ET_{c,r}} \quad (33)$$

$$WP_{Tc} = \frac{Y_a}{T_{cr}} \quad (34)$$

Onde:

Y_a – Produção das culturas em (kg/ha);

TWU – Total de água usada (m^3/ha);

P – Precipitação (m^3/ha);

R – Rega (m^3/ha);

CR – Ascensão capilar (m^3/ha);

ΔSW – Variação do armazenamento de água no solo (m^3/ha);

IWU – Água de rega usada (m^3/ha);

ET_{cr} – Evapotranspiração real da cultural (m^3/ha);

T_{cr} – Transpiração real da cultura (m^3/ha).

Os valores de Y_a foram obtidos através de um inquérito feito aos produtores referentes aos anos de 2019 e 2020 (Apêndices P e R).

Pode ainda ser adicionado o indicador da produtividade económica da água (EWP, €/m³) para calcular o quão rentável um metro cúbico de água é para as diferentes culturas (Fernández *et al.*, 2020).

$$EWP = \frac{\text{Valor } (Y_a)}{TWU} \quad (35)$$

Onde:

EWP - Produtividade económica da água (€/m³);

Valor (Y_a) – Valor económico da produção da cultura por ha (€/ha);

TWU – Total de água usada (m^3/ha).

Para chegar ao valor económico da produção por ha foram usados valores referentes às cotações agrícolas, na semana 50 de 2021 (Agronegocios.eu, 2022), para a região mais próxima do local onde se localizam os pomares. Os valores apresentam-se em preço por um kg de produto, pelo que depois esse valor tem que ser multiplicado pela produção por ha para se chegar ao valor da EWP.

Os valores dos indicadores da produtividade da água podem ser aumentados se os desperdícios de água forem minimizados, nomeadamente pela diminuição das perdas por percolação,

do escoamento superficial e da evaporação. Valores elevados de produtividade de água podem também ser obtidos através da aplicação de uma gestão de rega diferente, como de uma rega deficitária, que visa a diminuição ou mesmo corte na aplicação de rega no final do ciclo de uma cultura, o que pode levar a algumas quebras de produção, mas em geral aumenta a EWP. Isto significa que o é mais rentável para o produtor.

3.10. Cenários Climáticos

3.10.1. Dados de reanálise

Os cenários climáticos foram definidos através de dados de reanálise meteorológicos do período de 1979 a 2020 (42 anos).

Para definir os cenários climáticos foi necessária a utilização do SIMDualKc onde foram calculadas as necessidades de rega em todos os anos para as culturas estudadas (Apêndices T a Y) e do HYDRUS-1D onde foram simulados o balanço de água e sais.

No SIMDualKc, foram utilizados os parâmetros calibrados e validados em 2019 e 2020. Como novos dados de entrada, tiveram-se em conta os dados do clima, da rega e do início das diferentes fases de desenvolvimento das culturas. Os valores diários da ET_0 não se encontravam disponíveis nos dados de reanálise pelo que tiveram de ser calculados através de uma calculadora baseada em Excel para a estimativa da ET_0 . Na Figura 3.22 encontra-se um gráfico onde está apresentada a evolução da precipitação e ET_0 durante o período no qual foram definidos os diferentes cenários climáticos.

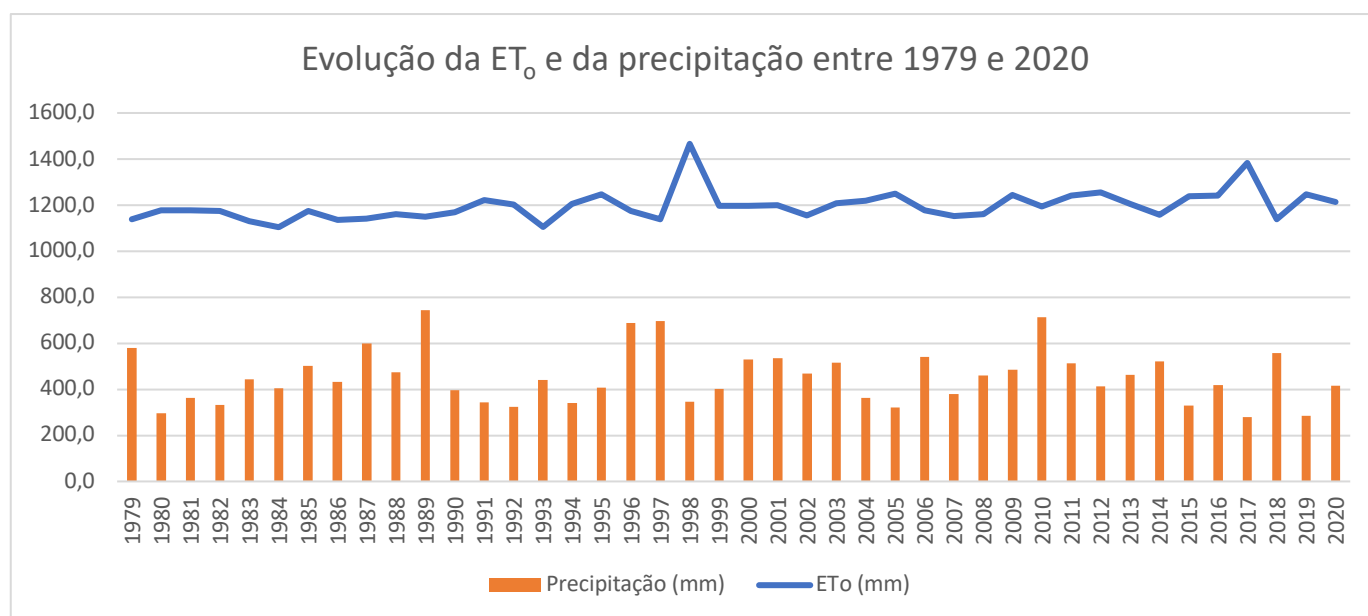


Figura 3.22 Gráfico dos valores anuais de evapotranspiração de referência e precipitação para o período de 1979 a 2020.

No HYDRUS-1D também foram utilizados parâmetros calibrados e validados em 2019 e 2020, respetivamente. As condições de fronteira superiores variaram consoante o ano estudado, servindo os resultados do modelo SIMDualKc como dados de entrada no modelo HYDRUS-1D.

3.10.2. Definição das datas dos diferentes ciclos das culturas

Para o período de 1979 a 2020 tiveram que ser definidas as datas em que as diferentes fases de crescimento das culturas tinham início, para servirem como *inputs* no SIMDualKc (Tabela 3.13). A forma de obter essas datas foi através de valores médios da acumulação de temperaturas médias durante os períodos das diferentes fases de crescimento das culturas nos anos de 2019 e 2020 (Tabela 3.14). A temperatura base, acima da qual se começa a fazer o somatório das temperaturas médias difere para cada cultura, sendo que para o amendoal, olival intensivo e clementinas é de 10 °C, 9,1 °C e 12,8 °C, respetivamente, segundo (Egea *et al.*, 2003; de Melo-Abreu *et al.*, 2004; Stenzel *et al.*, 2006).

Tabela 3.13 Duração dos diferentes estágios de crescimento das diferentes culturas para anos de necessidades de rega médias, altas e muito altas.

Fases de crescimento da cultura	Amendoal			Olival intensivo			Clementinas			
	Ano	1999	2004	2005	2000	2005	2013	1991	1999	2005
Sem crescimento	01/01	01/01	01/01	01/01	01/01	01/01	01/01	01/01	01/01	01/01
Inicial	15/01	10/01	25/01	09/03	07/03	10/03	15/02	15/02	16/02	
Desenvolvimento	09/02	02/02	17/03	18/03	21/03	01/04	17/03	18/03	17/03	
Médio	21/02	11/03	25/03	16/06	06/06	24/06	11/06	01/06	01/06	
Senescência	02/09	30/08	25/08	05/10	19/09	04/10	01/12	01/12	01/12	
Final	12/11	12/11	28/10	21/11	25/10	24/11	-	-	-	

Tabela 3.14 Acumulação de temperaturas para cada fase das culturas estudadas em 2019 e 2020.

Cultura	Ano	Acumulação de temperaturas das diferentes fases de crescimento das árvores (°C)				Acumulação de temperaturas total (°C)
		Inicial	Desenvolvimento	Média	Tardia	
Amendoal	2019	21,3	45,7	1.511,1	685,8	2.263,9
	2020	67,2	48,0	1.702,4	613,4	2.431,0
	Média	44,3	46,9	1.606,8	649,6	2.347,6
Olival intensivo	2019	58,8	541,7	1.446,6	366,1	2.413,2
	2020	76,4	695,5	1.462,4	360,9	2.595,2
	Média	67,6	618,6	1.454,5	363,5	2.504,2
Clementinas	2019	5,0	221,9	1.356,1	21,7	1.604,7
	2020	15,9	300,7	1.386,0	16,4	1.719,0
	Média	10,5	261,3	1.371,1	19,1	1.662,0

3.10.3. Definição da estratégia de rega

No SIMDualKc é definido o início de rega quando o coeficiente de gestão da depleção de água do solo permitido (MAD) durante a época de rega das culturas é igual ou menor que a fração de depleção de água no solo para o qual não há stresse para as plantas (p) ($MAD \leq \theta p$). de campo. As dotações de rega definidas para cada cultura diferiram entre si, sendo de 3 mm para o olival intensivo e de 5 mm para as clementinas e o amendoal. Foi assumido para todas as simulações que no início do ano não havia depleção inicial de água no solo, ou seja, o solo encontrava-se à capacidade de campo.

3.10.4. Definição dos anos de necessidades de rega médias, altas e muito altas

O cálculo das necessidades de rega pelo SIMDualKc, para os 42 anos teve como objetivo identificar um ano com necessidades de rega normais, altas e muito altas para cada cultura, assumindo uma probabilidade de não excedência de 50%, 80% e 95%, respetivamente (Pereira *et al.*, 2009). Anos com necessidades de rega altas e muito altas devido às alterações climáticas que se vêm vindo a sentir poderão ser cada vez mais recorrentes, por isso, foi usado o modelo HYDRUS-1D para simular o balanço de água e sais no solo para esses anos.

4. Resultados e Discussão

4.1. Parametrização do Modelo SIMDualKc

Na parametrização do modelo SIMDualKc a maioria dos parâmetros sofreram alterações após calibração, com maior destaque nos K_{cb} e nos p que ficaram com os seus valores iguais ou mais baixos que os valores padrão, o que indica que houve uma ligeira sobrestimação dos valores recolhidos, das diversas fontes, para as culturas. Mostra também que os valores tabulados são insuficientes para uma caracterização adequada do processo evapotranspirativo nas culturas perenes, face à diversidade encontrada nestes sistemas.

Valores mais baixos de K_{cb} significam que para a mesma cultura a ET_c no PRR é mais baixa e no p significam que a fração de RAW disponível para as plantas é inferior, ou seja, há uma menor tolerância ao stresse hídrico.

No olival a diminuição do valor de CN quer dizer que existe menos escoamento superficial.

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros calibrados usados no SIMDualKc para o ano de 2019 que foram depois validados em 2020.

Tabela 4.1 Valores padrão de diversos parâmetros e os respetivos valores calibrados para as diferentes culturas.

Culturas Parâmetros	Amendoal		Olival intensivo		Clementinas	
	Padrão	Calibrados	Padrão	Calibrados	Padrão	Calibrados
$K_{cb\ ini}$	0,20	0,20	0,35	0,30	0,80	0,40
$K_{cb\ mid}$	0,85	0,55	0,35	0,35	0,80	0,40
$K_{cb\ end}$	0,60	0,35	0,30	0,30	0,85	0,40
p_{ini}	0,60	0,40	0,65	0,55	0,50	0,50
p_{mid}	0,45	0,40	0,65	0,55	0,50	0,50
p_{end}	0,60	0,40	0,65	0,55	0,50	0,50
TEW (mm)	19	24	32	32	25	17
REW (mm)	10	10	12	12	7	7
Z_e (m)	0,12	0,15	0,15	0,10	0,15	0,10
a_D	220	220	-	470	-	200
b_D	-0,018	-0,018	-	-0,0173	-0,0173	-0,0173
CN	-	75	85	72	68	68

Onde:

K_{cb} – Coeficiente cultural basal (-);

- p – Fração de depleção de água no início do stresse (-);
- TEW – Água total evaporável (mm);
- REW – Água facilmente evaporável (mm);
- Z_e – Profundidade da camada de evaporação do solo (m);
- a_D e b_D – Parâmetros empíricos da percolação profunda (mm, -);
- CN – Número de escoamento (-).

4.2. Parametrização do Modelo HYDRUS-1D

No HYDRUS-1D os parâmetros que foram alvos de calibração foram os parâmetros hidráulicos do solo, esses incluem o teor residual de água no solo, θ_r , o teor de água do solo saturado, θ_s , o parâmetro da função de retenção de água, α , o índice de distribuição do tamanho dos poros, n , a condutividade hidráulica saturada, K_{sat} e o parâmetro de tortuosidade na função da condutividade, l .

A calibração do modelo foi realizada por modelação inversa dos teores de água do solo medidos às diferentes profundidades, em cada cultura, em 2019 (Tabelas 4.2, 4.3, 4.4). As previsões do modelo foram depois validadas com os dados medidos em 2020.

Para os parâmetros hidráulicos do solo (excluindo o l) é necessário fornecer a estimativa inicial e um limite máximo e mínimo para os valores dos mesmos, para cada horizonte do solo de forma a otimizar os diferentes parâmetros.

Tabela 4.2 Parâmetros hidráulicos de solo usados no HYDRUS-1D para o solo da parcela com o amendoal.

Profundidade cm	θ_r cm ³ /cm ³	θ_s cm ³ /cm ³	α cm ⁻¹	n	K_{sat} cm/dia	l
0 - 20	0,149	0,426	0,029	1,96	3.205	0,5
20 - 40	0,150	0,230	0,010	2,46	66,9	0,5
40 - 60	0,132	0,211	0,013	2,08	145	0,5
60 - 200	0,145	0,305	0,265	1,49	5.929	0,5

Tabela 4.3 Parâmetros hidráulicos de solo usados no HYDRUS-1D para o solo da parcela com o olival intensivo.

Profundidade cm	θ_r cm ³ /cm ³	θ_s cm ³ /cm ³	α cm ⁻¹	n	K_{sat} cm/dia	l
0 - 20	0,319	0,548	0,014	1,483	4.036	0,5
20 - 40	0,191	0,510	0,021	1,144	86,9	0,5
40 - 60	0,367	0,414	0,008	1,130	23,5	0,5
60 - 200	0,384	0,432	0,010	1,182	67,9	0,5

Tabela 4.4 Parâmetros hidráulicos de solo usados no HYDRUS-1D para o solo da parcela com as clementinas.

Profundidade cm	θ_r cm ³ /cm ³	θ_s cm ³ /cm ³	α cm ⁻¹	β	K_{sat} cm/dia	I
0 - 20	0,100	0,310	0,049	1,39	150	0,5
20 - 40	0,137	0,522	0,036	1,56	24,96	0,5
40 - 60	0,140	0,220	0,031	1,54	624	0,5
60 - 200	0,146	0,204	0,050	1,46	61,35	0,5

4.3. Comportamento dos Modelos

4.3.1. O modelo SIMDualKc

Na Tabela 4.5 encontram-se os valores dos indicadores estatísticos que relacionam os dados medidos com os simulados do teor de água no solo de cada cultura no SIMDualKc.

Tabela 4.5 Indicadores estatísticos de 2019 e 2020 para os resultados de balanço de água diário das culturas no SIMDualKc.

Cultura	Amendoal		Olival intensivo		Clementinas		
	Ano	2019	2020	2019	2020	2019	2020
R^2		0,468	0,510	0,688	0,657	0,927	0,758
RMSE cm ³ /cm ³		0,003	0,004	0,011	0,010	0,001	0,001
NRMSE		0,014	0,020	0,029	0,025	0,004	0,005
PBIAS %		2,177	2,769	-0,554	0,679	0,889	-0,096
EF		0,234	0,428	0,669	0,608	0,855	0,744
b_0		0,977	0,968	1,001	0,989	0,989	0,999

O coeficiente de determinação (R^2) variou bastante de cultura para cultura. Os valores de R^2 quanto mais perto estiverem de um, indicam que o modelo explica bem a variabilidade das observações. Tendo em conta os dados da tabela acima, a cultura com melhores resultados neste indicador são as clementinas, seguidas do olival intensivo e por fim do amendoal com valores relativamente baixos.

Por outro lado, temos os valores do erro quadrático médio (RMSE) e do rácio de RMSE para o desvio padrão dos dados medidos (NRMSE) que foram todos muito próximos de zero o que indica a existência de pequenos erros de estimativa e que as previsões dos modelos são boas.

Já o desvio percentual de estimativa (PBIAS) assumiu valores muito variados, positivos e negativos, para as diferentes culturas, onde o objetivo é que os valores se aproximem o máximo de zero. Porém, os valores estão todos relativamente próximos de zero o que indica que as simulações do modelo são precisas.

A eficiência de modelação (EF) é tão melhor quanto mais os valores se aproximarem de um o que acontece para todas as culturas menos para o amendoal, logo as previsões do modelo do amendoal não serão tão boas como as restantes.

Por fim, o coeficiente de regressão (b_0) apresentou para todas as culturas valores muito próximos de um o que é indicador que os valores simulados são estatisticamente próximos dos observados em campo do teor de água no solo.

Em suma, pode-se dizer que a calibração realizada nos diversos parâmetros usados no SIMDualKc, foi bem concretizada, pois os indicadores estatísticos da cultura do olival intensivo e das clementinas apontam que os dados simulados explicam bem os dados observados. Porém para o amendoal a calibração não foi tão boa, uma das razões pelas quais isto aconteceu foi pela existência de grandes lacunas nos dados observados (Apêndices I e J), o que tornou a calibração do modelo mais difícil.

4.3.2. O modelo HYDRUS-1D

No modelo HYDRUS-1D foi feita a análise estatística para quatro das profundidades de observação, (0,1, 0,3, 0,5 e 0,7 m) definidas no editor gráfico. Após a obtenção dos valores de cada indicador para cada profundidade foram unidos num só de modo a ter apenas um valor para cada cultura por ano.

Na Tabela 4.6 encontram-se os valores dos indicadores estatísticos que relacionam os dados medidos com os simulados do teor de água no solo de cada cultura no HYDRUS-1D.

Tabela 4.6 Indicadores estatísticos de 2019 e 2020 para os resultados de balanço de água diário das culturas no HYDRUS-1D.

Cultura	Amendoal		Olival intensivo		Clementinas	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Ano	2019	2020	2019	2020	2019	2020
R²	0,709	0,626	0,692	0,439	0,729	0,803
RMSE cm³/cm³	0,008	0,021	0,019	0,023	0,005	0,004
NRMSE	0,042	0,113	0,048	0,056	0,025	0,022
PBIAS %	0,468	-4,795	-0,396	-0,248	-0,371	0,661
EF	0,705	0,565	0,689	0,355	0,667	0,693
b₀	0,990	1,036	1,001	1,000	1,002	0,995

O indicador R² apresentou valores bons para todas as culturas, menos para o ano de 2020 do olival intensivo onde o modelo não explica tão bem a variância das observações, mas mesmo assim tem um valor razoável.

Tal como para o último modelo os valores de RMSE e NRMSE são próximos de zero o que é indicador de existência de pequenos erros de estimativa e de boas previsões dos modelos.

No PBIAS apenas o ano de 2020 do amendoal tem um valor negativo alto indicador de uma sobre estimativa dos valores da tendência, os restantes valores indicam que as simulações do modelo são precisas.

A EF tem valores aceitáveis, menos para o ano de 2020 do olival intensivo, o que indica uma má previsão do modelo para esse ano.

Os resultados de b₀ foram bons, equiparáveis aos obtidos no modelo SIMDualKc.

Conclui-se, embora a análise estatística realizada para o ano de 2020 do olival intensivo não fosse tão positiva, causada por lacunas grandes existentes nos dados observados (Apêndice L), em geral os indicadores apontaram para um bom comportamento de todos os indicadores simulados em relação aos observados.

4.4. O Balanço de Água no Solo

Na Tabela 4.7 estão apresentados os valores necessários para o cálculo do balanço hídrico no solo, foi adicionado ainda o parâmetro T_p , que representa a transpiração potencial da cultura.

Tabela 4.7 Balanço hídrico das três culturas nos anos 2019 e 2020.

Ano	R mm	P mm	RO mm	ΔSW mm	T_p mm	T_r mm	E_r mm	$T_r + E_r$ mm	DP mm	Erro BH %
Amendoal										
2019	649	337	11	-10	697	650	219	869	117	-2,15
2020	772	484	38	-8	543	540	306	846	444	-6,57
Olival intensivo										
2019	356	337	5	50	418	274	216	490	161	12,65
2020	323	484	22	5	413	337	241	578	282	-8,92
Clementinas										
2019	635	337	11	7	505	473	217	690	288	-1,04
2020	858	484	36	4	499	482	219	701	661	-3,98

$$\text{Erro BH (\%)} = (\text{entradas} - \text{saídas}) / \text{entradas} \times 100$$

O ano de 2020, em comparação com 2019, foi um ano mais húmido e com uma ET_o inferior (2019 – 1.263 mm; 2020 – 1.248 mm). Como consequência verificou-se uma diminuição geral da T_p das culturas.

Os resultados na tabela acima indicam que a cultura com um valor de $T_r + E_r$ mais elevado é o amendoal, seguido das clementinas e por fim do olival intensivo, mas quanto às dotações de rega realizadas notou-se que no ano de 2020, as clementinas tiveram uma rega total superior à do amendoal. Isto num ano em que a precipitação foi superior à do ano anterior, demonstra que terá sido feita uma má gestão de rega que resultou em perdas por percolação muito elevadas. No amendoal o aumento de rega de 2019 para 2020 também causou perdas por percolação altas.

Os valores de T_r são muito próximos dos valores de T_p para o amendoal e para as clementinas, significando que as culturas sofreram pouco stresse quer hídrico, quer salino (Apêndices O e Q). O mesmo não aconteceu para o olival intensivo, onde as diferenças da T_r para a T_p são significativas, isto deve-se principalmente à gestão de rega implementada ser uma rega deficitária (Apêndice P) que induz as plantas em stresse com o objetivo de reduzir consideravelmente as dotações de rega sem

comprometer a produção da cultura, permitindo assim aumentar a eficiência do uso da água e também a qualidade do fruto.

No olival intensivo e nas clementinas, a T_r em 2020 foi mais alta mesmo com a T_p mais baixa, por ter havido mais água disponível para as árvores.

A E_r subiu para todas as culturas de um ano para o outro mesmo sendo esse um ano com uma ET_o inferior, a causa é ter havido mais precipitação e também mais rega no caso do amendoal e clementinas aumentando assim o período de tempo em que o solo está humedecido.

O armazenamento de água no solo presente no fim e no início dos anos sofreu variações em todos os casos e os *inputs* de água no solo não coincidiram com os *outputs* tendo sido necessário calcular a percentagem do erro do balanço hídrico.

4.5. O Balanço de Sais

A Tabela 4.8 apresenta o balanço de sais nos três locais monitorizados durante os anos de 2019 e 2020. As entradas correspondem aos sais adicionados pela rega e pela chuva, as saídas correspondem aos sais lixiviados da zona das raízes (profundidade de 1,2 m), calculados pelo modelo HYDRUS-1D e a componente solo representa o armazenamento de sais no solo, que é a diferença entre as entradas e saídas.

O valor atribuído à EC_w foi 0,72 dS/m que corresponde ao valor médio medido pelo condutímetro, durante a investigação, para a EC da precipitação definiu-se um valor residual de 0,1 dS/m. Os valores de EC, tanto da rega como da precipitação, foram transformados em TDS (g/L) pela fórmula 3. O valor obtido em TDS é multiplicado pela rega aplicada e precipitação total, ($mm = L/m^2$) de cada ano. Por fim, os valores obtidos foram convertidos em unidades de massa de g/m^2 em ton/ha. O mesmo processo foi realizado para chegar às saídas, com as diferenças que o valor que multiplica pelo TDS ser o das perdas por percolação e da concentração de sais presentes na água lixiviada.

Tabela 4.8 Balanço de sais no solo para as diferentes culturas, em 2019 e 2020.

Ano	Entradas (ton/ha)	Saídas (ton/ha)	Solo (ton/ha)
Amendoal			
2019	3,2	2,7	0,5
2020	3,9	7,7	-3,7
Olival intensivo			
2019	1,8	2,5	-0,6
2020	1,8	4,8	-3,0
Clementinas			
2019	3,2	5,3	-2,0
2020	4,3	7,5	-3,2

Face às práticas de gestão de rega aplicadas nas diferentes culturas, verificou-se que os riscos de salinização do solo são baixos, visto que, em quase todos os casos há mais lixiviação de sais para fora da zona das raízes que entradas, tal conclusão já tinha sido feita por Alexandre *et al.* (2018) em 2016, que não considerou a salinização do solo no PRR um problema significativo.

O único caso onde houve um ligeiro aumento no teor de sais no solo foi em 2019 no amendoal. Esse aumento foi causado por ter sido um ano de precipitação baixa que obrigou a serem aplicadas dotações de rega elevadas com água mais salina que a da chuva. As perdas por percolação também foram baixas nesse ano em comparação com o ano seguinte, o que propiciou a acumulação de sais na zona das raízes.

Verifica-se um aumento nas entradas de sais no amendoal e nas clementinas em 2020 resultante da aplicação de uma dotação de rega superior à do ano anterior. As saídas também registaram um aumento significativo por ter sido um ano de maior precipitação e mais concentrada (Apêndice H), que se for conjugada com uma má gestão de rega com aplicações de água numa altura coincidente com queda de chuva ajuda a aumentar a lixiviação de sais.

O olival intensivo é um bom exemplo para perceber a importância que a chuva e a sua intensidade têm na lixiviação de sais, pois em ambos os anos tanto as dotações de rega como as entradas de sais no solo são muito semelhantes, mas os sais lixiviados no ano mais chuvoso são muito superiores.

O problema que advém dos valores elevados de lixiviação apresentados na Tabela 4.8 é a contaminação das águas subterrâneas, não só pelos sais da rega, mas também por outros contaminantes que serão eventualmente arrastados no processo, problema este que foi transversal para todas as culturas.

4.6. Análise da Produtividade da Água

Os diversos indicadores da produtividade da água foram calculados de acordo com as fórmulas enumeradas no capítulo 3.9. Produtividade da Água.

Os valores de produção (kg/ha) foram obtidos através de questionários feitos aos produtores (Apêndices R e S), enquanto os restantes valores são os mesmos utilizados para o cálculo do balanço de água no solo no capítulo 4.4., mas convertidos em m³/ha. É importante notar que há um aumento de produção em todas as culturas de 2019 para 2020 o que tem um grande impacto no valor dos indicadores de um ano para o outro.

Em Portugal, a produção média a nível nacional de amêndoas com casca foi de 655 kg/ha em 2019 e 604 kg/ha em 2020 (FAOSTAT, 2021), que são valores inferiores aos obtidos na Tabela 4.9 e o valor por kg das amêndoas com casca foi de 0,80 €, na semana 50 de 2021 (Agronegocios.eu, 2022).

Todos os indicadores de produtividade de água do amendoal, apresentaram valores muito baixos, dos quais se destaca a EWP onde por cada m³ de água usada num ha só teve retorno de 0,08 €. Um estudo realizado num amendoal instalado perto de Beja obteve valores de WP_{irrig} de 0,59 kg/m³, 1,16 kg/m³ e 0,75 kg/m³, em 2018, 2019 e 2020, respetivamente, (Moita, 2021) que são valores muito acima dos obtidos.

Tabela 4.9 Valor dos indicadores da produtividade de água para o amendoal.

Ano	Produção kg/ha	Produto €/kg	WP _{WU} kg/m ³	WP _{irrig} kg/m ³	WP _{ET} kg/m ³	WP _T kg/m ³	EWP €/m ³
2019	1.032	0,8	0,11	0,16	0,12	0,16	0,08
2020	1.287	0,8	0,10	0,17	0,15	0,24	0,08

Segundo a FAOSTAT (2021) em 2019 e 2020 a produção média dos olivais em Portugal foi de 2454 kg/ha e 1904 kg/ha, respetivamente, mas como o olival em estudo está sobre regime intensivo as produções superam em muito a média nacional (Tabela 4.10). O valor de um kg de azeitonas para azeite na semana 50 de 2021 era 0,3 €/kg (Agronegocios.eu, 2022).

O olival intensivo tem os indicadores da produtividade de água com valores superiores ao do amendoal, porque com menos total de água usada (TWU) conseguiram-se produções mais elevadas.

A EWP também demonstra que esta cultura tem um maior retorno económico por unidade de água usada, do que o amendoal.

Tabela 4.10 Valor dos indicadores da produtividade de água para o olival intensivo.

Ano	Produção kg/ha	Produto €/kg	WP _{WU} kg/m ³	WP _{irrig} kg/m ³	WP _{ET} kg/m ³	WP _T kg/m ³	EWP €/m ³
2019	7.188	0,3	0,98	2,02	1,47	2,62	0,32
2020	7.771	0,3	0,96	2,41	1,34	2,31	0,29

Para as clementinas não havia dados da produção média nacional por ha na FAOSTAT (2021), pelo que foram usados os valores da produção laranjas para contornar essa situação. Em 2019 a produção nacional média de laranjas era de 20.228 kg/ha e em 2020 era 20.631 kg/ha, que são valores bastante acima dos obtidos pela cultura das clementinas (Tabela 4.11). O valor de referência usado para as clementinas foi de 0,8 €/kg na semana 50 de 2021, (Agronegocios.eu, 2022).

Quanto aos indicadores da produtividade para as clementinas cresceram muito de 2019 para 2020, por causa do aumento em 13.000 kg/ha na produção. A TWU também aumentou, mas não o suficiente para fazer com que os indicadores diminuíssem o seu valor.

Tabela 4.11 Valor dos indicadores da produtividade de água para as clementinas.

Ano	Produção kg/ha	Produto €/kg	WP _{WU} kg/m ³	WP _{irrig} kg/m ³	WP _{ET} kg/m ³	WP _T kg/m ³	EWP €/m ³
2019	4.000	0,8	0,41	0,63	0,58	0,85	0,33
2020	17.000	0,8	1,26	1,98	2,43	3,53	1,01

4.7. Impacto dos Cenários Climáticos no Balanço de Água e Sais no Solo

4.7.1. Amendoal

Na Tabela 4.12 estão apresentados os dados dos diferentes cenários climáticos simulados para o amendoal, ordenados por ordem crescente da probabilidade de não excedência (50%, 80% e 95%).

No balanço de água do amendoal seria de esperar uma tendência decrescente nos valores das DP devido à precipitação ser menor conforme os cenários se tornam mais exigentes em necessidades de rega, no entanto essa tendência não se verificou, porque embora haja menos precipitação essa vem mais concentrada favorecendo as DP (Apêndices B, D e E). Apesar de ter sido definido, no SIMDualKc, que a gestão de rega da cultura era feita para que essa não entrasse em stress os valores

da T_r foram sempre inferiores aos da T_p , isto pode estar relacionado com períodos em que houve stresse causado por sais em excesso na zona das raízes.

Tabela 4.12 Balanço de água para os cenários simulados de alterações climáticas no amendoal.

Ano	R mm	P mm	RO mm	ΔSW mm	T_p mm	T_r mm	E_r mm	$T_r + E_r$ mm	DP mm	Erro BH %
1999	495	402	3	-19	670	621	184	805	103	-3,69
2004	550	360	9	-45	679	631	189	820	114	-8,66
2005	605	319	25	-6	665	617	172	789	114	-1,11

Quanto ao balanço de sais no solo (Tabela 4.13) houve um aumento gradual das entradas consoante o crescimento das necessidades de rega, as saídas variaram de ano para ano, o que fez com que a acumulação de sais no solo não aumentasse do ano de necessidades de rega altas para o ano de necessidade de rega muito altas, isto porque, em 2005 70% da chuva esteve concentrada nos últimos três meses do ano (Apêndice E), o que fez com que todos os sais que se tinham vindo a acumular ao longo do ano em camadas mais superficiais do solo fossem rapidamente lixiviados para fora da zona das raízes das plantas. Contudo, em todos os cenários verificou-se um aumento na concentração de sais no solo, que a longo prazo podem prejudicar a produção das culturas e a estrutura do solo.

Tabela 4.13 Balanço de sais para os diferentes cenários climáticos no amendoal.

Necessidades de rega	Ano	Entradas ton/ha	Saídas ton/ha	Solo ton/ha
Médias	1999	2,54	1,49	1,05
Altas	2004	2,76	1,20	1,56
Muito altas	2005	2,98	2,06	0,91

4.7.2. Olival intensivo

No balanço hídrico do olival intensivo (Tabela 4.14), tal como no amendoal as necessidades de rega aumentaram com a diminuição de precipitação anual, contudo as DP também diminuíram, porque os anos de probabilidade de não excedência de 50% e 80% não coincidiram com os do amendoal.

Tabela 4.14 Balanço hídrico dos cenários simulados de alterações climáticas no olival intensivo.

Ano	R mm	P mm	RO mm	ΔSW mm	T_p mm	T_r mm	E_r mm	T_r + E_r mm	DP mm	Erro BH %
2000	243	527	14	-6	401	379	202	581	207	-5,03
2013	288	462	8	-26	402	379	195	574	204	-8,36
2005	336	319	21	-34	418	381	167	548	118	-8,89

No balanço de sais do olival intensivo (Tabela 4.15) as entradas foram inversamente proporcionais às saídas, devido a haver maiores dotações de rega e às DP serem cada vez menores conforme os cenários ficavam mais exigentes, por consequência a acumulação de sais no solo aumentou de forma gradual. Sendo que para o ano das necessidades de rega médias houve uma diminuição ligeira na acumulação de sais no solo, seguido de 2013 e 2005 com acumulação de sais no solo.

Tabela 4.15 Balanço de sais para os diferentes cenários climáticos no olival intensivo.

Necessidades de rega	Ano	Entradas ton/ha	Saídas ton/ha	Solo ton/ha
Médias	2000	1,44	1,49	-0,05
Altas	2013	1,62	1,32	0,30
Muito altas	2005	1,74	0,86	0,88

4.7.3. Clementinas

Nas clementinas os parâmetros da rega e da precipitação no balanço hídrico (Tabela 4.16) tiveram o mesmo comportamento do que nas outras duas culturas. As DP, por sua vez, em 2005 não diminuíram com a ocorrência de menos precipitação, isto porque, a elevada concentração da chuva fez com que houvesse DP elevadas semelhantes às do ano 1999. O facto de o escoamento superficial ter sido mais elevado em 2005 em comparação com os outros anos é também indicativo que a precipitação foi muito concentrada.

Tabela 4.16 Balanço de água para os cenários simulados de alterações climáticas nas clementinas.

Ano	R mm	P mm	RO mm	ΔSW mm	T_p mm	T_r mm	E_r mm	T_r + E_r mm	DP mm	Erro BH %
1999	300	402	3	-16	479	417	174	591	126	-4,86
1991	350	343	2	-20	489	427	182	609	104	-6,08
2005	425	319	24	-3	500	436	173	609	122	-1,94

O balanço de sais nas clementinas foi positivo em todos os cenários, embora com valores baixos para as necessidades de rega médias e muito altas (Tabela 4.17). As entradas cresceram consoante o aumento das dotações de rega e as saídas variaram irregularmente, porque as DP no ano de necessidades de rega altas foram as mais baixas dos três cenários. A elevada concentração da precipitação em 2005 fez com que esse ano não tivesse as maiores acumulações de sais no solo.

As DP em 2005 são inferiores às de 1999, mas há uma maior lixiviação de sais porque a acumulação de sais nas camadas superiores do solo onde estão as raízes é superior.

Tabela 4.17 Balanço de sais para os diferentes cenários climáticos nas clementinas.

Necessidades de rega	Ano	Entradas ton/ha	Saídas ton/ha	Solo ton/ha
Médias	1999	1,64	1,57	0,07
Altas	1991	1,83	0,84	0,99
Muito altas	2005	2,15	1,83	0,32

5. Conclusão

A salinização é um problema crescente nas áreas de regadio por todo o mundo e as alterações climáticas previstas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), com valores de temperatura e da evapotranspiração de referência mais elevados e de precipitação mais baixa, favorecem o aumento do risco de salinização do solo.

Devido às alterações climáticas e à maior escassez dos fatores de produção é necessário aumentar a sua eficiência de aplicação, nomeadamente da água de rega. Através das simulações realizadas, verificou-se que há uma grande margem para redução das dotações de rega aplicadas, quando comparadas com os dados recolhidos de 2019 e 2020. Esta diminuição implica que têm que ser implementadas melhores estratégias de gestão de rega, que visem a diminuição da utilização de água sem comprometer a produção das culturas e aumentando o retorno económico.

A gestão de rega aplicada nos anos 2019 e 2020 mostrou-se em algumas situações mal gerida e em excesso, isto porque, no amendoal e nas clementinas no ano de menor evapotranspiração de referência (2020) foram aplicadas dotações de rega superiores à do ano de maior evapotranspiração de referência, (2019) o que levou a perdas por percolação significativas. Fazer aplicações de rega em excesso leva não só a um consumo excessivo de água de rega, cada vez mais escassa, como também à entrada, desnecessária, de mais sais no solo.

O balanço de sais no solo para 2019 e 2020 demonstrou que o risco de salinização do solo é muito baixo, pois a lixiviação de sais é quase sempre superior às entradas de sais, no entanto a quantidade de sais lixiviados da zona das raízes é preocupante não só pelo perigo de contaminação das águas subterrâneas, mas também pelos contaminantes que acabam por ser arrastados no processo. A razão da grande lixiviação de sais está, em parte, relacionada com a má gestão de rega que em conjunto com a precipitação leva a perdas por percolação elevadas, pelo que deve ser feita uma proposta de calendário de rega alternativa ao produtor.

Nos cenários climáticos simulados de necessidades de rega médias, altas e muito altas, a gestão de rega foi feita sempre para que a cultura não sofresse stresse hídrico, no entanto as dotações de rega aplicadas, mesmo nos anos de necessidades de rega muito altas eram mais baixas que as dotações aplicadas pelos agricultores em 2019 e 2020, confirmando assim que foi feita uma má gestão de rega pelos agricultores.

Quanto ao balanço de sais nos cenários simulados, verificou-se para todos os anos de necessidades de rega altas e muito altas um aumento no teor de sais no solo. Porém nem sempre o ano onde havia maiores necessidades de rega, correspondeu ao ano de maior acumulação de sais na zona das raízes. Pode-se assim concluir que anos com maior precipitação, mas pouco concentrada

representam um maior risco de salinização do solo que anos mais secos, mas com a precipitação muito concentrada.

O estudo contou com algumas limitações, como o início da monitorização da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (EC_e) ter tido início apenas em maio de 2019 o que fez com que o valor da EC_e usado para as condições iniciais do solo no HYDRUS-1D para esse ano não tenha correspondido à realidade. Há também lacunas nos dados recolhidos do teor de água no solo pelas sondas capacitivas às diferentes profundidades, o que depois se traduziu na análise estatística com valores de alguns dos indicadores baixos.

A obtenção dos resultados neste trabalho foi através de dois modelos que por muito precisos que sejam, acabam sempre por ter algum erro, quer ao nível dos dados de entrada, quer ao nível dos conceitos e simplificações utilizadas no modelo. A versão do modelo HYDRUS-1D usada é a mais simples de todas, pelo que há outras versões mais complexas que contam com mais variáveis.

Um futuro estudo que poderá ser realizado no seguimento deste trabalho é, usar os dados fornecidos pelo IPCC das previsões de diferentes cenários climáticos para estimar o quão comuns se vão tornar os anos de necessidades de rega altas e muito altas, assumindo uma probabilidade de não excedência de 80% e 95%, respetivamente, e prever a existência de cenários ainda mais extremos.

6. Referências Bibliográficas

- Alexandre, C., Borralho, T., & Durão, A. (2018). Evaluation of salinization and sodification in irrigated areas with limited soil data: Case study in southern Portugal. *Spanish Journal of Soil Science* 8, 102-120. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2018.V8.N1.07>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M., (1998). Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, FAO, Rome, Italy, 300.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., & Wright J.L., (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(1), 2–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2))
- Allen, R.G., & Pereira, L.S., (2009). Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Sciences* 28, 17–34. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z>
- Allen, R.G., Wright, J.L., Pruitt, W.O., Pereira, L.S., & Jensen, M.E., (2007). Water requirements. In: Hoffman, G.J., Evans, R.G., Jensen, M.E., Martin, D.L., Elliot, R.L. (Eds.), *Design and Operation of Farm Irrigation Systems.*, 2nd edition. ASABE, St. Joseph, MI, 208–288.
- Alvim, A.J. (1980). Qualidade da água e riscos de salinização do solo nos perímetros de Campilhas e do Roxo. In: Congresso 80, Ordem dos Engenheiros, Coimbra.
- ARH (2012). Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas integradas na Região Hidrográfica - Parte 2, Caracterização e Diagnóstico, 6, 246.
- Associação de Beneficiários do Roxo. (2022). *O perímetro*. Retrieved September 16, 2022, from <https://www.abroxo.pt/index.php/o-perimetro>
- Ayers, R.S. & Westcot, D.W. (1985) Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage*, Paper 29, Food and Agriculture Organization, Rome.
- Ben-Gal, A., Lazarovitch, N., & Shani, U. (2004). Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. *Vadose Zone Journal* 3(4), 1407–1413. <https://doi.org/10.2113/3.4.1407>
- Cardoso, J. V. J. C. (1965). Os solos de Portugal: Sua classificação caracterização e génese. Lisboa: Secretaria de estado da agricultura. Direção-geral dos serviços agrícolas.
- Cholpankulov, E.D., Inchenkova, O.P., Paredes, P., & Pereira, L.S. (2008). Cotton irrigation scheduling in Central Asia: model calibration and validation with consideration of groundwater contribution. *Irrigation Drainage*, 57, 516–532

- Meteoblue. (2022). Conjunto de Dados de Reanálises. Retrieved September 15, 2022, from <https://content.meteoblue.com/pt/especificacoes/fontes-de-dados/dados-de-simulacao-meteorologica/conjunto-de-dados-de-reanalises>
- Corwin, D. L., Rhoades, J. D., & Šimůnek, J. (2007). Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models. *Agricultural Water Management*, *90*(3), 165–180. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2007.02.007>
- Agronegocios.eu. (2022). *Cotações Agrícolas*. Retrieved September 22, 2022, from <http://www.agronegocios.eu/ferramentas/cotacoes-agricolas/>
- Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J., & Thorburn, P.J. (2003). Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*, *22*, 143–156. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0080-8>
- Dabach, S., Lazarovitch, N., Šimůnek, J., & Shani, U. (2013). Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. *Irrigation Science* *31*, 27–36. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0289-x>
- Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G. P., & Ritsema, C. J. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of The Total Environment*, *573*, 727–739. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.08.177>
- Dane, J.H. & Hopmans, J.W. (2002). Pressure Plate Extractor. In: Dane, J.H. and Topp, G.C., Eds., *Methods of Soil Analysis: Physical Methods, Part 4, Soil Science Society of America*, Madison, 688–690.
- de Melo-Abreu, J. P., Barranco, D., Cordeiro, A. M., Tous, J., Rogado, B. M., & Villalobos, F. J. (2004). Modelling olive flowering date using chilling for dormancy release and thermal time. *Agricultural and Forest Meteorology*, *125*(1–2), 117–127. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2004.02.009>
- Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural. (2022). *Regadio e Aproveitamentos Hidroagrícolas*. <https://www.dgadr.gov.pt/regadio>
- Egea, G., Diaz-Espejo, A., & Fernández, J. E. (2016). Soil moisture dynamics in a hedgerow olive orchard under well-watered and deficit irrigation regimes: Assessment, prediction and scenario analysis. *Agricultural Water Management*, *164*, 197–211. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2015.10.034>

- Egea, J., Ortega, E., Martínez-Gómez, P., & Dicenta, F. (2003). Chilling and heat requirements of almond cultivars for flowering. *Environmental and Experimental Botany*, 50(1), 79–85. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(03\)00002-9](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(03)00002-9)
- Engelhardt, I., Sittig, S., Šimůnek, J., Groeneweg, J., Pütz, T., & Vereecken, H. (2015). Fate of the antibiotic sulfadiazine in natural soils: Experimental and numerical investigations. *Journal of Contaminant Hydrology*, 177–178, 30–42. <https://doi.org/10.1016/J.JCONHYD.2015.02.006>
- FAO. (2015). Status of the world's soil resources. Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy.
- FAOSTAT. (2021). *Crops - Food and Agriculture Organization of the United Nations Stats*. Retrieved October 5, 2022, from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Farzamian, M., Gonçalves, M. C., Castanheira, N., Paz, A. M., Martínez-Moreno, F. J., Monteiro Santos, F. A., Alexandre, C. A., Ramos, T. B., & Oliveira, A. (2021). Mapeamento digital do teor de argila do solo, combinando levantamentos eletromagnéticos não invasivos com informações de sondagens. *Vida Rural nº 1872, Ano 69*, 68-74.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. & Zaradny, H. (1978). Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Centre for Agricultural Publishing and Documentation.
- Fernández, J. E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V., & Cuevas, M. v. (2020). Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. *Agricultural Water Management*, 237, 106074. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106074>
- Gärdenäs, A. I., Hopmans, J. W., Hanson, B. R., & Šimůnek, J. (2005). Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, 74(3), 219–242. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2004.11.011>
- Gomes, M. P., & Silva, A. A. (1962). Um novo diagrama triangular para a classificação básica da textura do solo. *Garcia da Orta*, 10, 171–179.
- Gonçalves, M. C., Castanheira, N., Farzamian, M., Paz, A.M., Ramos, T.B., & Alexandre, C. (2022). Evolução da salinidade do solo no perímetro de rega do Roxo. Livro de comunicações do *Congresso Ibérico da Ciência do Solo*, 566–569, 22 a 24 de junho de 2022, Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, Oeiras, Portugal.

- Gonçalves, M. C., Farzamian, M., Castanheira, N., Paz, A. M., Martínez-Moreno, F., Monteiro Santos, F., Alexandre, C., Ramos, T. B., & Oliveira, A. (2020). Evolução da salinidade do solo em culturas regadas no perímetro de rega do Roxo. *Vida Rural nº 1860, Ano 68*, 40–44
- Gonçalves, M. C., Martins, J. C., & Ramos, T. B. (2015). A salinização do solo em Portugal. Causas, extensão e soluções. *Revista de Ciências Agrárias*, 38(4), 574–586. <https://doi.org/10.19084/rca15140>
- Hanson, B. R., Hopmans, J.W. & Šimůnek, J. (2008). Leaching with Subsurface Drip Irrigation under Saline, Shallow Groundwater Conditions. *Vadose Zone Journal* 7, 810–818 <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0053>
- Hanson, B. R., Šimůnek, J., & Hopmans, J. W. (2006). Evaluation of urea–ammonium–nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management*, 86(1–2), 102–113. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2006.06.013>
- Hopmans, J.W., Šimůnek, J., Romano, N. & Durner, W. (2002). 3.6.2. Inverse Methods. In *Methods of Soil Analysis* (eds J.H. Dane and G. Clarke Topp). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c40>
- INE (2021). *Recenseamento Agrícola - Análise dos principais resultados – 2019*. Retrieved July 25, 2022, from <https://www.ine.pt/xurl/pub/437178558>
- IUSS Working Group WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Legates, D., & McCabe, G. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resource Research* 35(1), 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Liu, Y., Pereira, L. S., & Fernando, R. M. (2006). Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. *Agricultural Water Management*, 84(1–2), 27–40. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2006.01.018>
- Maas, E.V., & Hoffman, G. J. (1984). Crop salt tolerance – Current Assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*.
- Maas, E.V. (1990). Crop Salt Tolerance. In: Tanji, K.K., Ed., *Agricultural Salinity Assessment and Management, ASCE Manual Reports on Engineering Practices*, 71, ASCE, New York, 262–304

- Martins, J.C., Vilar, M.T., Neves, M.J., Pires, F.P., Ramos, T.B., Prazeres, A.O., & Gonçalves, M.C. (2005). Monitorização da salinidade e sodicidade de solos regados por rampas rotativas nos perímetros do Roxo e de Odivelas. 1.º Congresso Nacional e Rega e Drenagem.
- Minhas, P.S., Ramos, T.B., Ben-Gal, A., & Pereira, L.S. (2020). Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. *Agriculture and Water Management* 227, 105832
- Moita, R. A. D. (2021). *Avaliação das necessidades de rega de um amendoal na área de influência do Alqueva*. Dissertação
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12(3), 513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. v. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neto, D.C., Chang, H.K. & van Genuchten, M. Th. (2016). A Mathematical View of Water Table Fluctuations in a Shallow Aquifer in Brazil. *Groundwater*, 54(1), 82–91. <https://doi.org/10.1111/gwat.12329>
- Paz, A. M., Castanheira, N., Gonçalves M. C., Fernandes, M., Pires, F., Farzaminan, M., Paz, M. C., & Santos, F. M. (2020). Determinação da salinidade e sodicidade do solo por métodos de indução eletromagnética. *Revista de Ciências Agrárias*, 43(1), 151–160 <https://doi.org/10.19084/rca.18658>
- Peddinti, S.R., Kambhammettu, B., Ranjan, S., Suradhaniwar, S., Badnakhe, M.R., Adinarayana, J. & Gade, R. (2018). Modeling Soil–Water–Disease Interactions of Flood-Irrigated Mandarin Orange Trees: Role of Root Distribution Parameters. *Vadose Zone Journal*, 17, 1-13 170129. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.06.0129>

- Pereira, L. S., Paredes, P., & Jovanovic, N. (2020). Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, 241, 106357. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106357>
- Pereira, L. S., Paredes, P., Sholpankulov, E. D., Inchenkova, O. P., Teodoro, P. R., & Horst, M. G. (2009). Irrigation scheduling strategies for cotton to cope with water scarcity in the Fergana Valley, Central Asia. *Agricultural Water Management*, 96(5), 723–735. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2008.10.013>
- Phogat, V., Pitt, T., Cox, J. W., Šimůnek, J., & Skewes, M. A. (2018). Soil water and salinity dynamics under sprinkler irrigated almond exposed to a varied salinity stress at different growth stages. *Agricultural Water Management*, 201, 70–82. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.01.018>
- Rallo, G., Paço, T. A., Paredes, P., Puig-Sirera, Massai, R., Provenzano, G., & Pereira, L. S. (2021). Updated single and dual crop coefficients for tree and vine fruit crops. *Agricultural Water Management*, 250, 106645. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106645>
- Ramos, T.B., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., van Genuchten, M. Th., & Pires, F.P. (2006), Estimation of Soil Hydraulic Properties from Numerical Inversion of Tension Disk Infiltrometer Data. *Vadose Zone Journal*, 5, 684–696. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0076>
- Ramos, T. B., Šimůnek, J., Gonçalves, M. C., Martins, J. C., Prazeres, A., Castanheira, N. L., & Pereira, L. S. (2011). Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline waters. *Journal of Hydrology*, 407(1–4), 129–144. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.07.016>
- Ramos, T. B., Šimůnek, J., Gonçalves, M. C., Martins, J. C., Prazeres, A., & Pereira, L. S. (2012). Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agricultural Water Management*, 111, 87–104. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2012.05.007>
- Richards, L.A. (Ed.) (1954) – Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. *Agricultural Handbook No. 60*. United States Department of Agriculture.
- Romano, N., Hopmans, J.W., & Dane, J.H. (2002). 3.3.2.6 Suction Table. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods*. *Soil Science Society of America, Inc.*, Madison, WI, USA, 692–698

- Rosa, R. D., Paredes, P., Rodrigues, G. C., Alves, I., Fernando, R. M., Pereira, L. S., & Allen, R. G. (2012). Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agricultural Water Management*, 103, 8–24. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.10.013>
- Rosa, R.D., Paredes, P., Rodrigues, G.C., Alves, I., & Pereira, L.S., (2010). O modelo SIMDualKc para a simulação da rega e geração de calendários de rega. In: Pereira, LS, Mexia, JT, Pires, CA (Eds) *Gestão do Risco em Secas. Métodos, Tecnologias e Desafios*. Edições Colibri e CEER, Lisboa, pp. 279–30
- Šimůnek, J., & Hopmans, J. W. (2009). Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecological Modelling*, 220(4), 505–521. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2008.11.004>
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., & van Genuchten, M. Th. (2013). The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. *Department of Environmental Sciences University of California Riverside*, Riverside, California, USA, 340.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th. & Šejna, M. (2008). Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal*, 7, 587–600. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0077>
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., & Šejna, M. (2016). Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal*, 15, 1–25. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>
- SOIL4EVER. (2022). *Descrição*. Retrieved July 17, 2022, from <http://soil4ever.pt/>
- SROA (1970). Carta dos Solos de Portugal - I Volume. Classificação e caracterização morfológica dos solos (6th ed).
- Stenzel, N. M. C., Neves, C. S. V. J., Marur, C. J., Scholz, M. B. dos S., & Gomes, J. C. (2006). Maturation curves and degree-days accumulation for fruits of “Folha Murcha” orange trees. *Scientia Agricola*, 63(3), 219–225. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000300002>
- Tanji, K. K. & Kielen, N. C. (2002). *Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas*. Food and Agriculture Organization of the United Nations

- Turkeltaub, T., Dahan, O., & Kurtzman, D. (2014). Investigation of Groundwater Recharge under Agricultural Fields Using Transient Deep Vadose Zone Data. *Vadose Zone Journal*, 13, 1–13. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.10.0176>
- Unold, M., Šimůnek, J., Kasteel, R., Groeneweg, J., & Vereecken, H. (2009). Transport of manure-based applied sulfadiazine and its main transformation products in soil columns. *Vadose Zone Journal*, 8, 677–689. <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0122>
- USDA-SCS. (1972). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Department of Agriculture, Washington DC, 762 p.
- van Genuchten, M. Th., (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(3), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- van Genuchten, M. Th. (1987). A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Res. Rep. 121, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Wehrhan, A., Kasteel, R., Šimůnek, J., Groeneweg, J., & Vereecken, H. (2007). Transport of sulfadiazine in soil columns — Experiments and modelling approaches. *Journal of Contaminant Hydrology*, 89(1–2), 107–135. <https://doi.org/10.1016/J.JCONHYD.2006.08.002>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). The nature and properties of soils, (15th ed.) Pearson.

Apêndice A: Dados de reanálise da precipitação (1991). Apêndice B: Dados de reanálise da precipitação (1999).

Ano/Mês	Precipitação (mm)
1991	344,19
1	18,85
2	66,42
3	66,76
4	44,21
5	1,61
6	9,15
7	1,20
8	1,56
9	11,35
10	53,32
11	19,96
12	49,81
Total	344,19

Ano/Mês	Precipitação (mm)
1999	401,92
1	36,51
2	6,87
3	46,57
4	38,70
5	29,52
6	0,72
7	0,88
8	7,87
9	60,88
10	94,87
11	55,23
12	23,30
Total	401,92

Apêndice C: Dados de reanálise da precipitação (2000). Apêndice D: Dados de reanálise da precipitação (2004).

Ano/Mês	Precipitação (mm)
2000	528,32
1	9,64
2	18,50
3	15,94
4	126,30
5	88,99
6	1,86
7	3,56
8	1,60
9	7,17
10	24,34
11	66,52
12	163,90
Total	528,32

Ano/Mês	Precipitação (mm)
2004	361,52
1	42,43
2	57,18
3	38,21
4	16,80
5	35,54
6	0,49
7	0,03
8	6,93
9	20,58
10	96,97
11	21,67
12	24,69
Total	361,52

Apêndice E: Dados de reanálise da precipitação (2005). Apêndice F: Dados de reanálise da precipitação (2013).

Ano/Mês	Precipitação (mm)	Ano/Mês	Precipitação (mm)
2005	320,37	2013	462,07
1	0,23	1	52,17
2	20,16	2	34,81
3	27,91	3	168,62
4	6,89	4	21,40
5	25,12	5	11,29
6	1,09	6	3,75
7	1,93	7	1,09
8	1,10	8	0,78
9	4,03	9	28,41
10	112,54	10	77,53
11	76,46	11	8,91
12	42,89	12	53,31
Total	320,37	Total	462,07

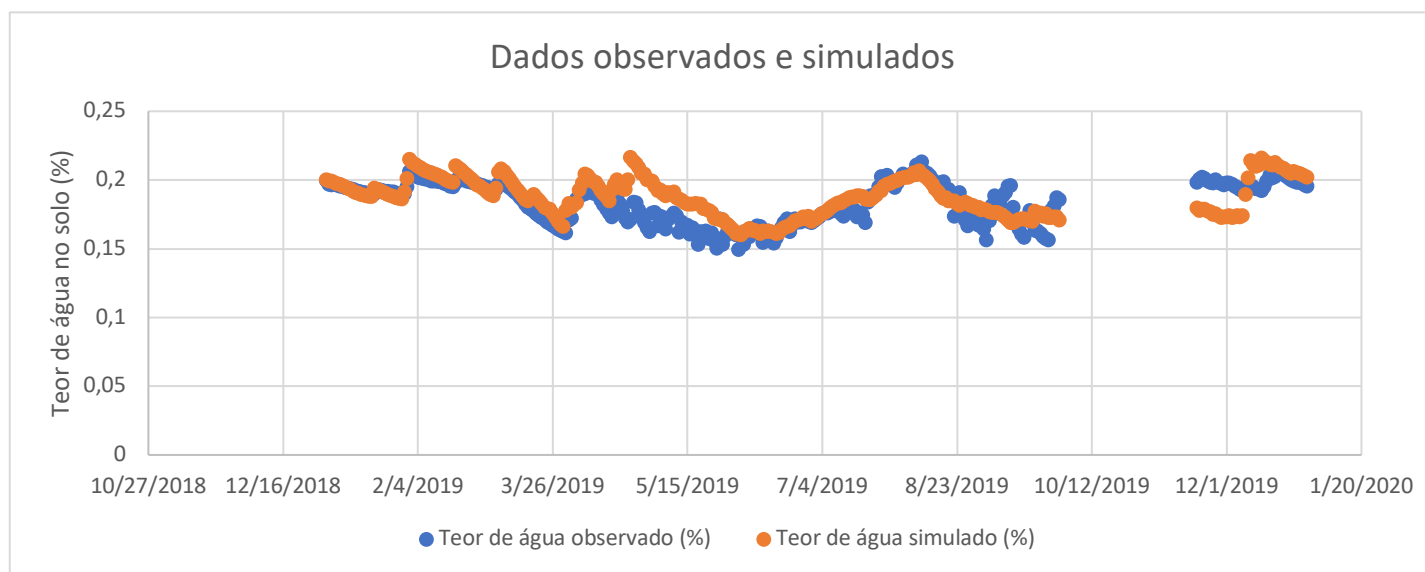
Apêndice G: Dados da precipitação da estação meteorológica local em 2019.

Ano/Mês	Precipitação (mm)
2019	326,0
1	23,5
2	33,8
3	34,5
4	65,0
5	1,4
6	0,0
7	0,8
8	0,6
9	8,2
10	32,2
11	75,3
12	50,7
Total	326,0

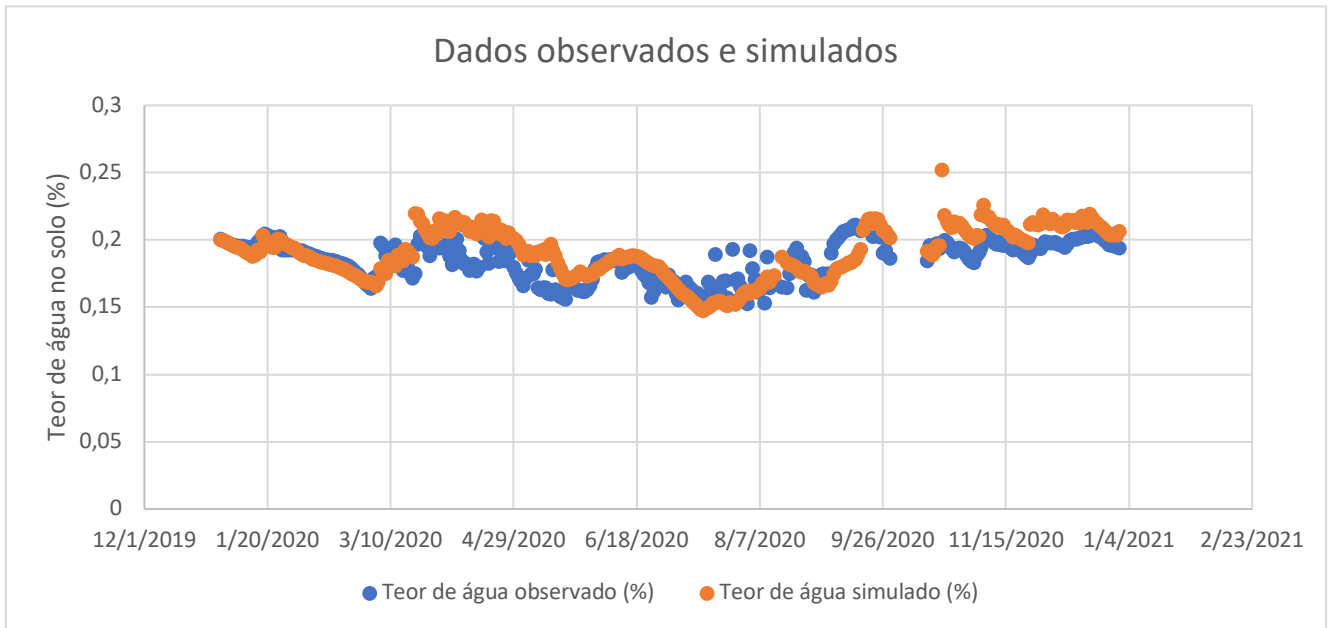
Apêndice H: Dados da precipitação da estação meteorológica local em 2020.

Ano/Mês	Precipitação (mm)
2020	483,6
1	31,3
2	2,5
3	66,4
4	90,7
5	26,3
6	1,3
7	0,8
8	0,0
9	14,5
10	67,2
11	124,3
12	58,3
Total	483,6

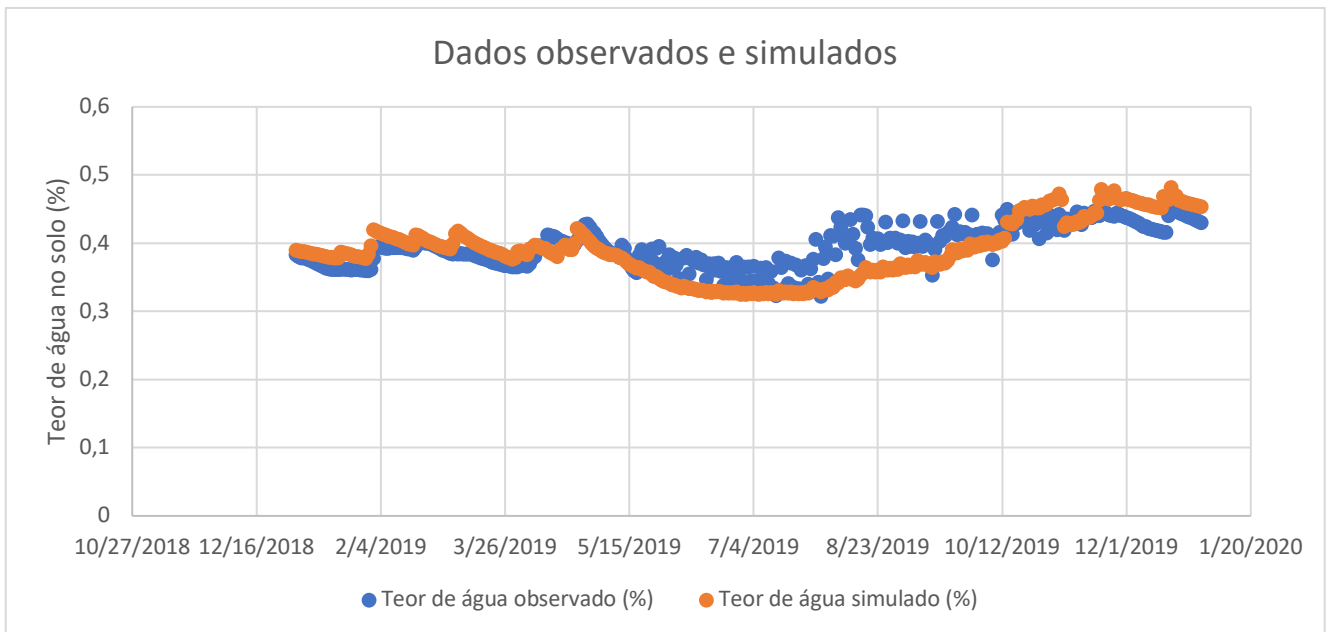
Apêndice I: Teor de água no solo diária (%) observada e simulada no SIMDualKc para o amendoal em 2019.



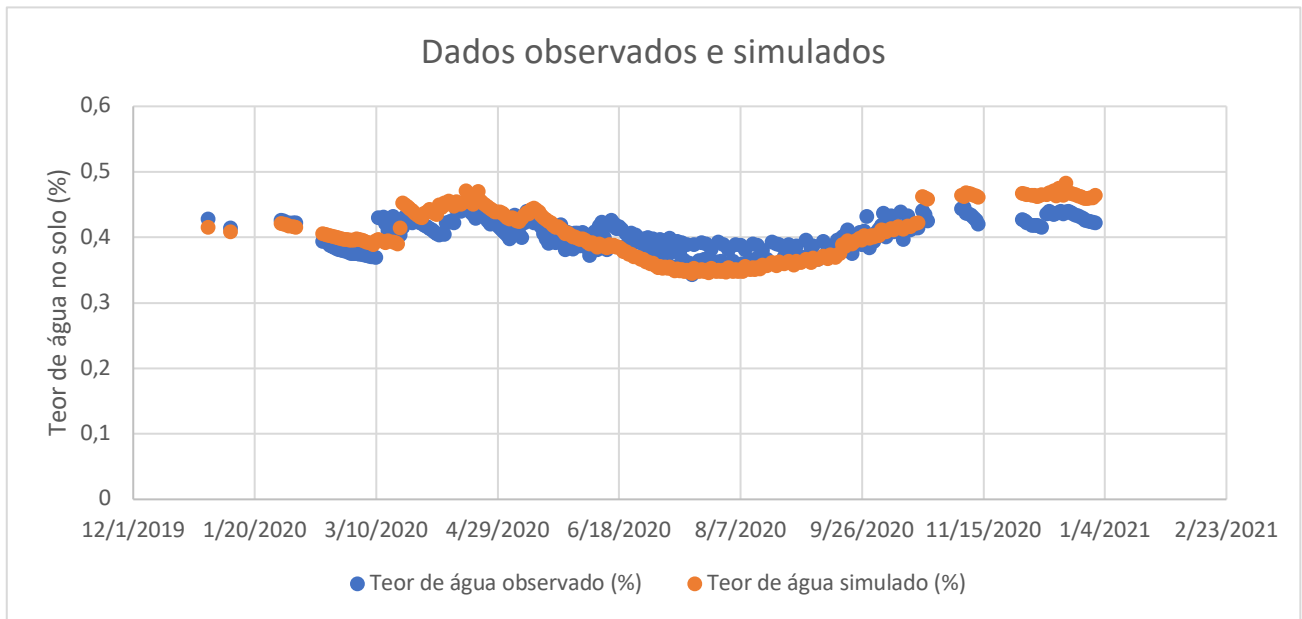
Apêndice J: Teor de água no solo diária (%) observada e simulada no SIMDualKc para o amendoal em 2020.



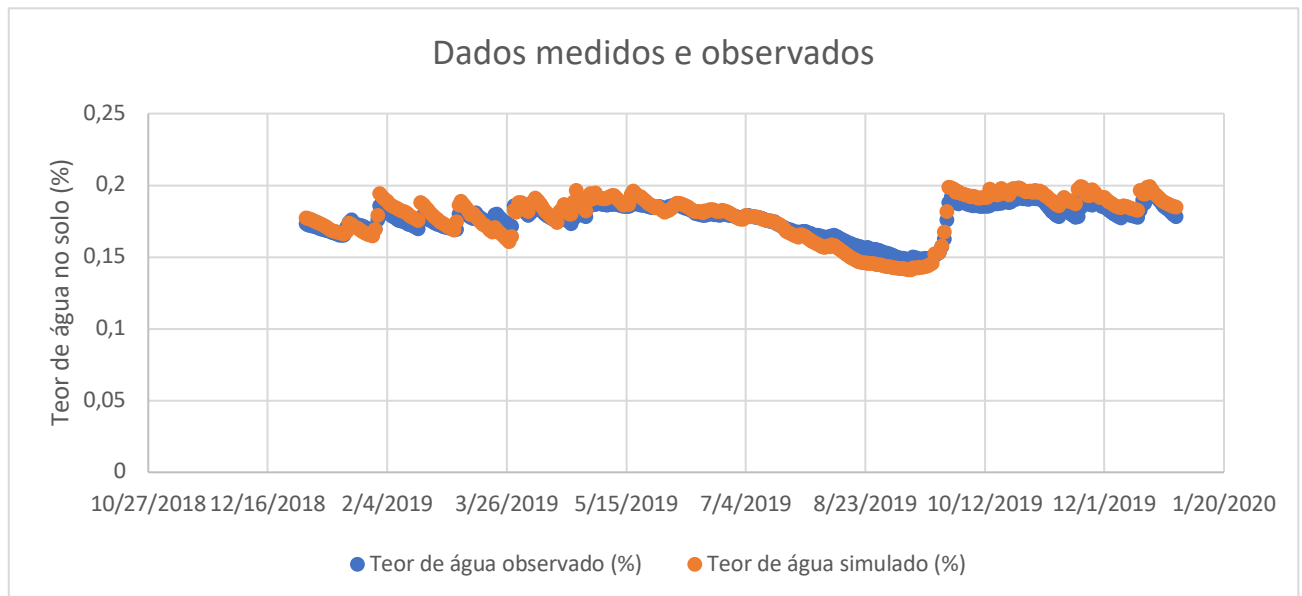
Apêndice K: Teor de água no solo diária (%) observada e simulada no SIMDualKc para o olival em 2019.



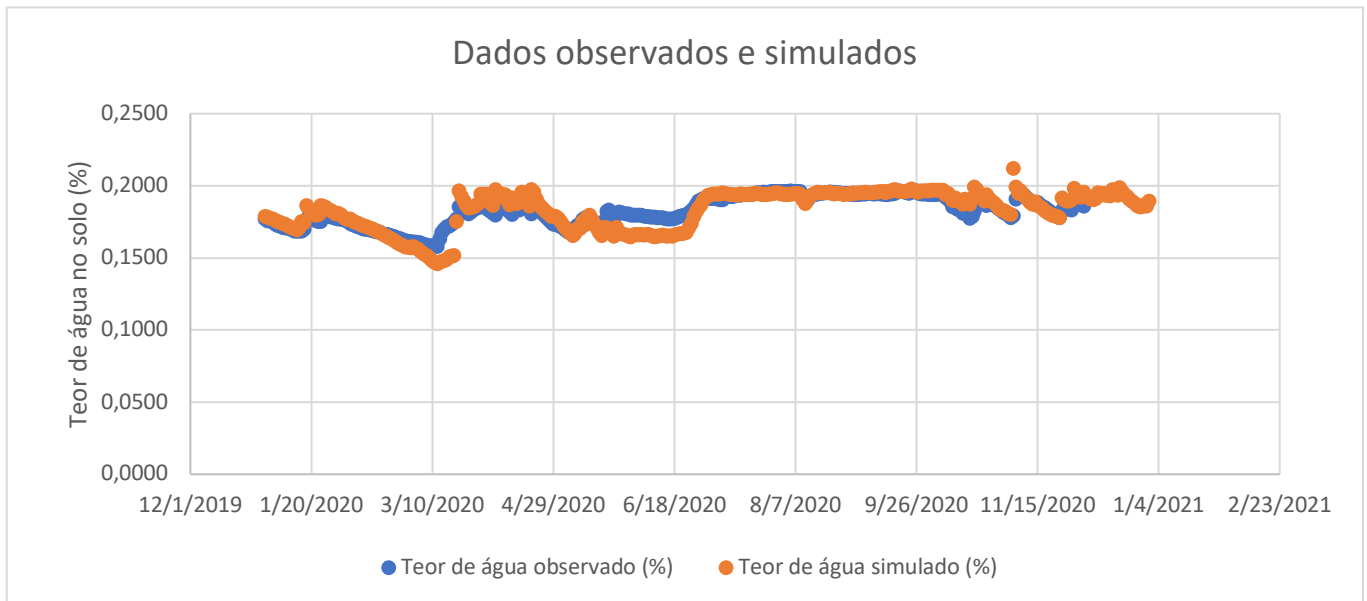
Apêndice L: Teor de água no solo diária (%) observada e simulada no SIMDualKc para o olival em 2020.



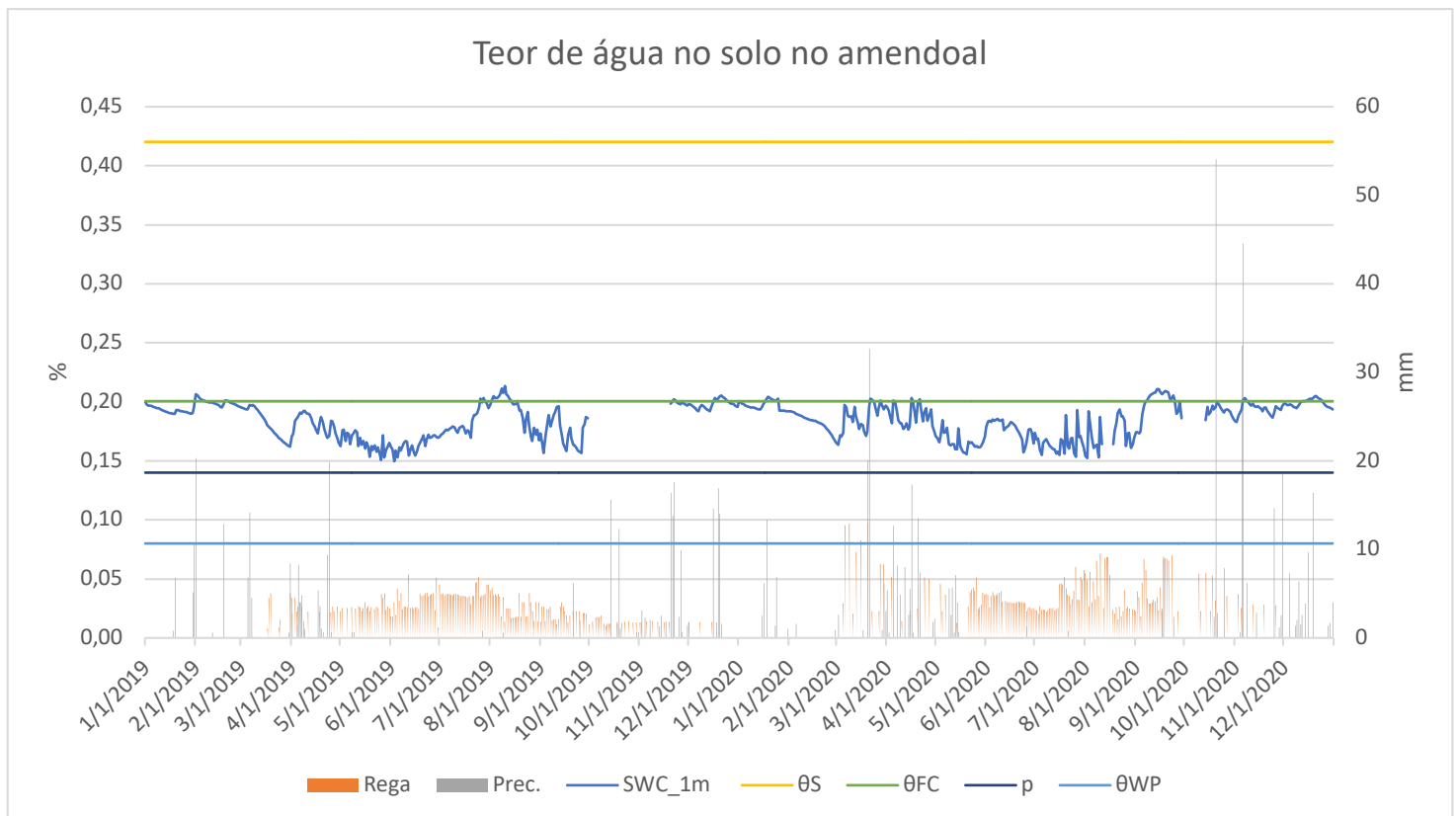
Apêndice M: Teor de água no solo diária (%) observada e simulada no SIMDualKc para as clementinas em 2019.



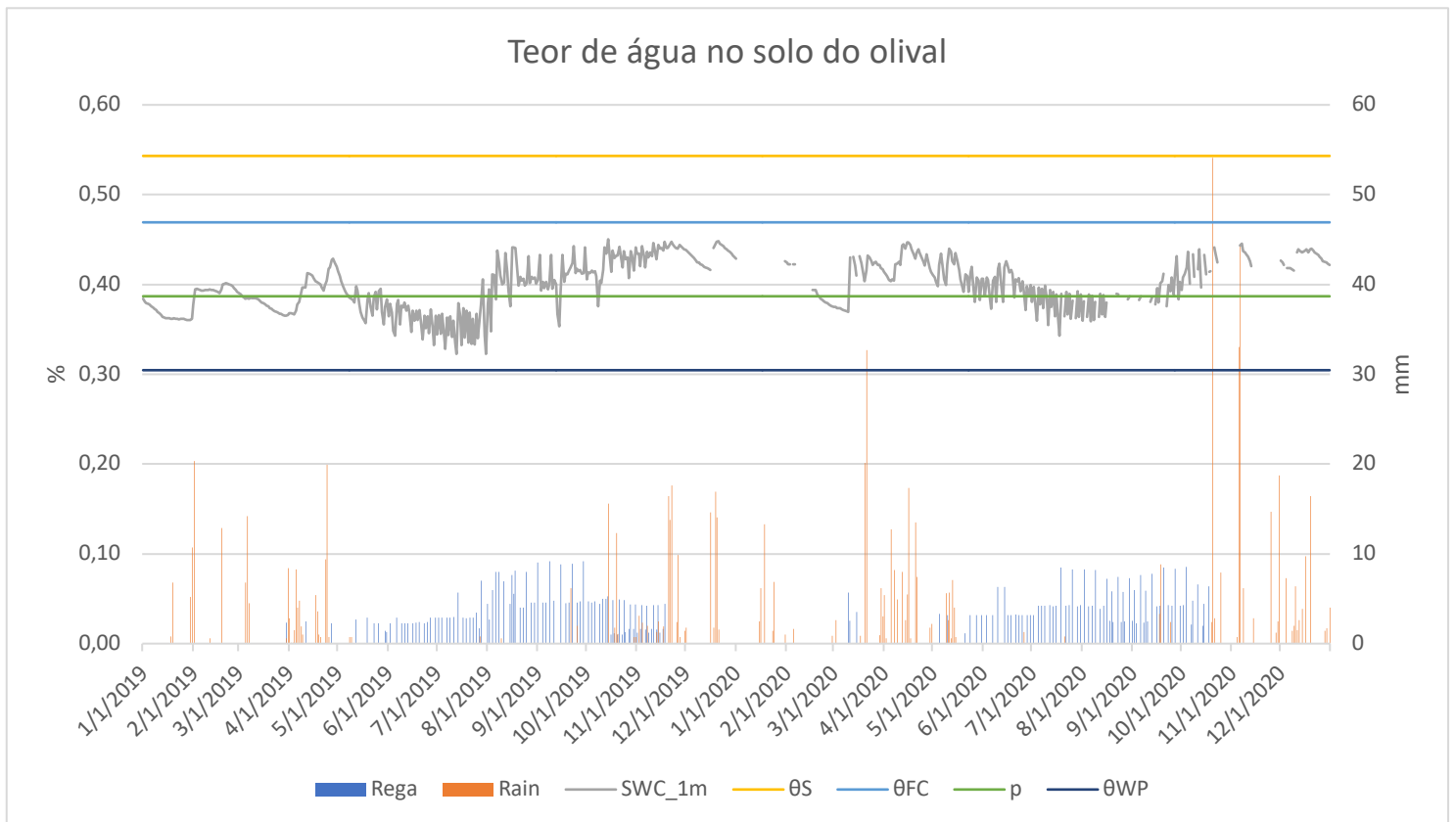
Apêndice N: Teor de água no solo diária (%) observada e simulada no SIMDualKc para as clementinas em 2020.



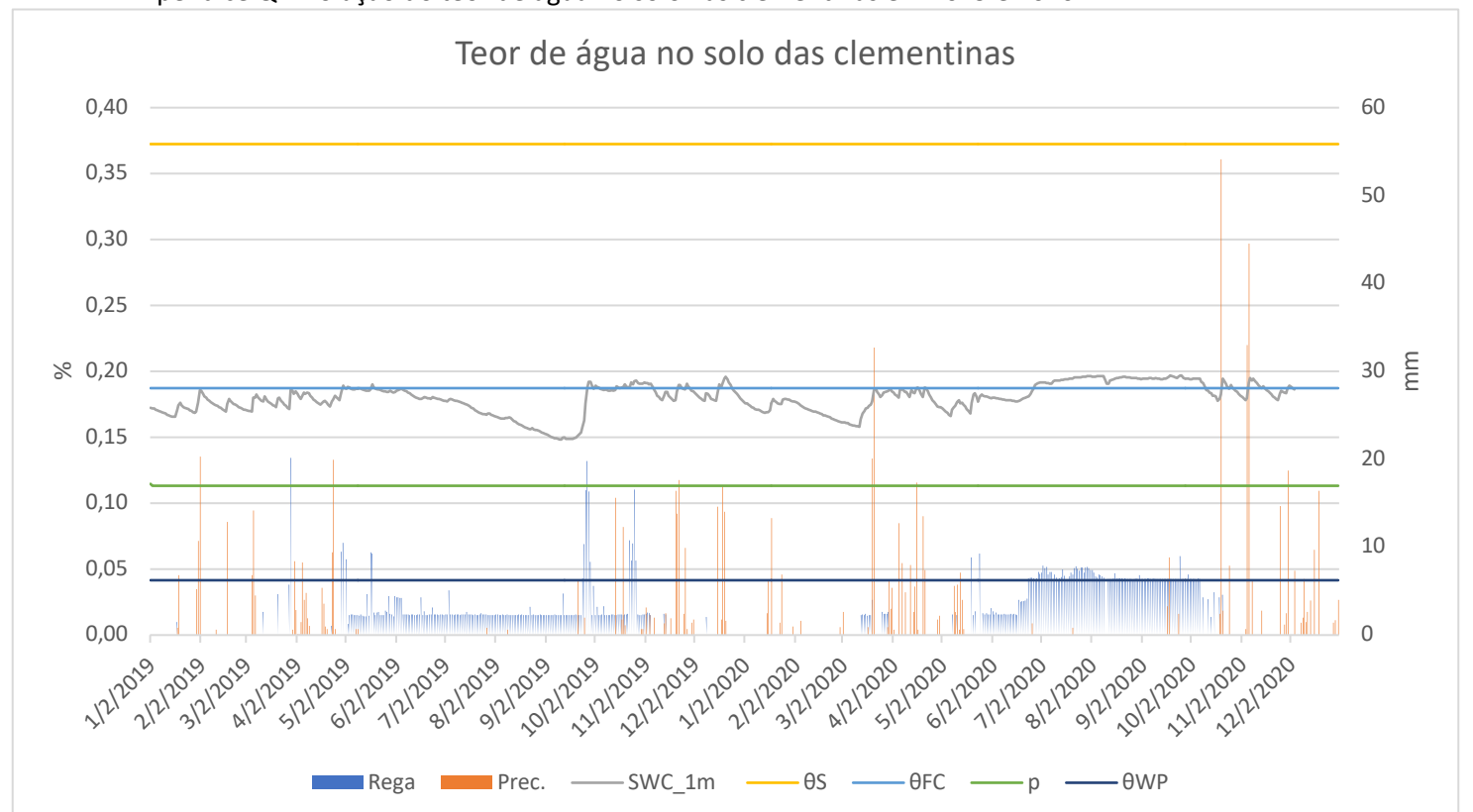
Apêndice O: Evolução do teor de água no solo no amendoal em 2019 e 2020.



Apêndice P: Evolução do teor de água no solo no olival em 2019 e 2020.



Apêndice Q: Evolução do teor de água no solo nas clementinas em 2019 e 2020.



Projecto SOIL4EVER
Inquérito ao produtor

Local do ensaio – ensaio nº

CULTURA

Cultura: _____

Variedade: _____

Idade atual das árvores: _____

Distância das árvores na linha: _____ m

Distância entre linhas de árvores: _____ m

Produção obtida em 2019: _____ Kg/ha em 2020: _____ Kg/ha

Data da colheita em 2019: ____/____/____

Data da colheita em 2020: ____/____/____

Realização de podas:

Em 2019, Foi feita alguma poda ? _____ Data: ____/____/____

Em 2020, Foi feita alguma poda ? _____ Data: ____/____/____

Mondas de frutos:

Foram feitas ? _____ Datas: _____

SISTEMA DE REGA

Tipo de sistema de rega (ex. gota-a-gota, ...) _____

Características dos gotejadores:

Caudal: _____ L/h, Espaçamento: _____ m

REGA:

Data de Início e fim da rega 2019: Início: ____/____/____ Fim: ____/____/____

Data de Início e fim da rega 2020: Início: ____/____/____ Fim: ____/____/____

Apêndice S: Continuação do inquérito feito ao produtor.

Quantidade total de água gasta na rega (m³/ha) em 2019: _____

Quantidade total de água gasta na rega (m³/ha) em 2020: _____

Frequência (intervalo entre regas) e dotações aplicadas em 2019:

Frequência (intervalo entre regas) e dotações aplicadas em 2020:

Outra informação a obter junto do produtor ou da ABRoxo

Dados meteorológicos

Estação meteorológica mais perto do local do ensaio: _____

É possível obter dados meteorológicos referentes a 2019 e 2020: Sim ____ Não ____

Quem pode fornecer: _____

Dados da humidade do solo nas parcelas e anos em questão.

É possível obter esses dados: Sim ____ Não ____

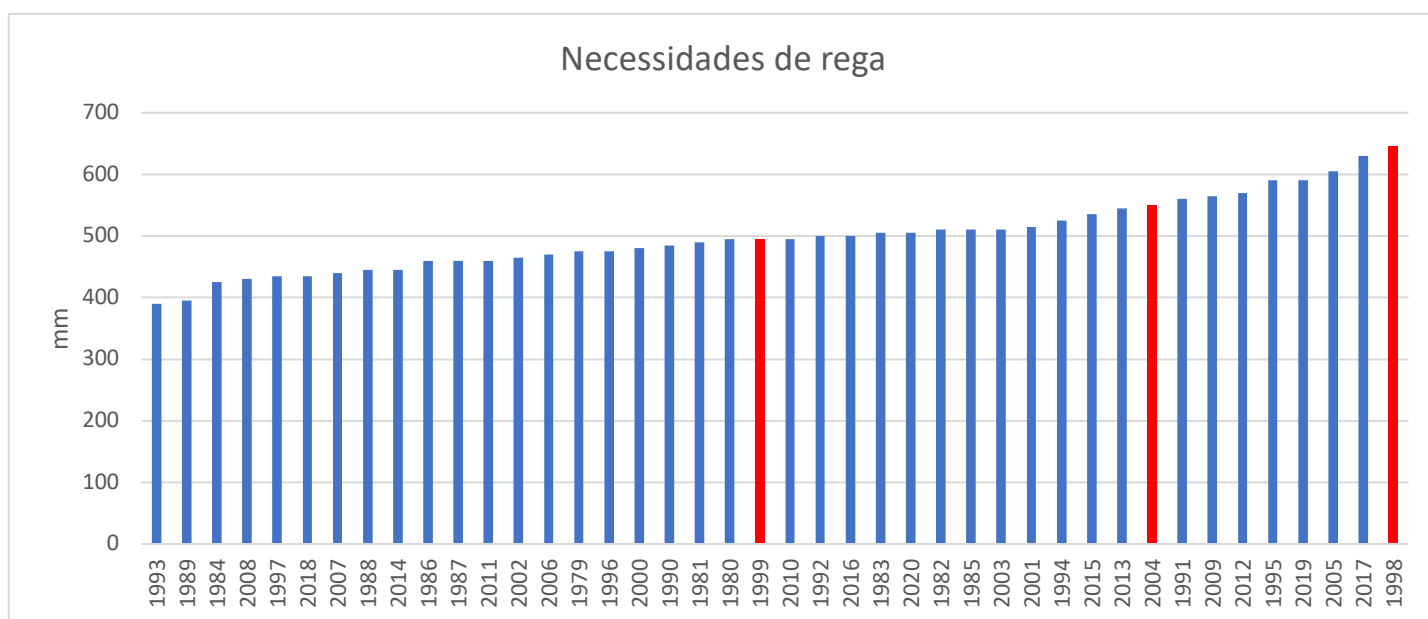
Quem pode fornecer: _____

Tipo de sonda utilizada na medição: _____

Apêndice T: Necessidades de rega anuais, calculadas no SIMDualKc, dos cenários climáticos, para o amendoal com as respectivas probabilidades de não excedência.

Ano	Rega (mm)	Prob. de não excedência	Ano	Rega (mm)	Prob. de não excedência
1993	390	2,4	2010	495	52,4
1989	395	4,8	1992	500	54,8
1984	425	7,1	2016	500	57,1
2008	430	9,5	1983	505	59,5
1997	435	11,9	2020	505	61,9
2018	435	14,3	1982	510	64,3
2007	440	16,7	1985	510	66,7
1988	445	19,0	2003	510	69,0
2014	445	21,4	2001	515	71,4
1986	460	23,8	1994	525	73,8
1987	460	26,2	2015	535	76,2
2011	460	28,6	2013	545	78,6
2002	465	31,0	2004	550	81,0
2006	470	33,3	1991	560	83,3
1979	475	35,7	2009	565	85,7
1996	475	38,1	2012	570	88,1
2000	480	40,5	1995	590	90,5
1990	485	42,9	2019	590	92,9
1981	490	45,2	2005	605	95,2
1980	495	47,6	2017	630	97,6
1999	495	50,0	1998	645	100,0

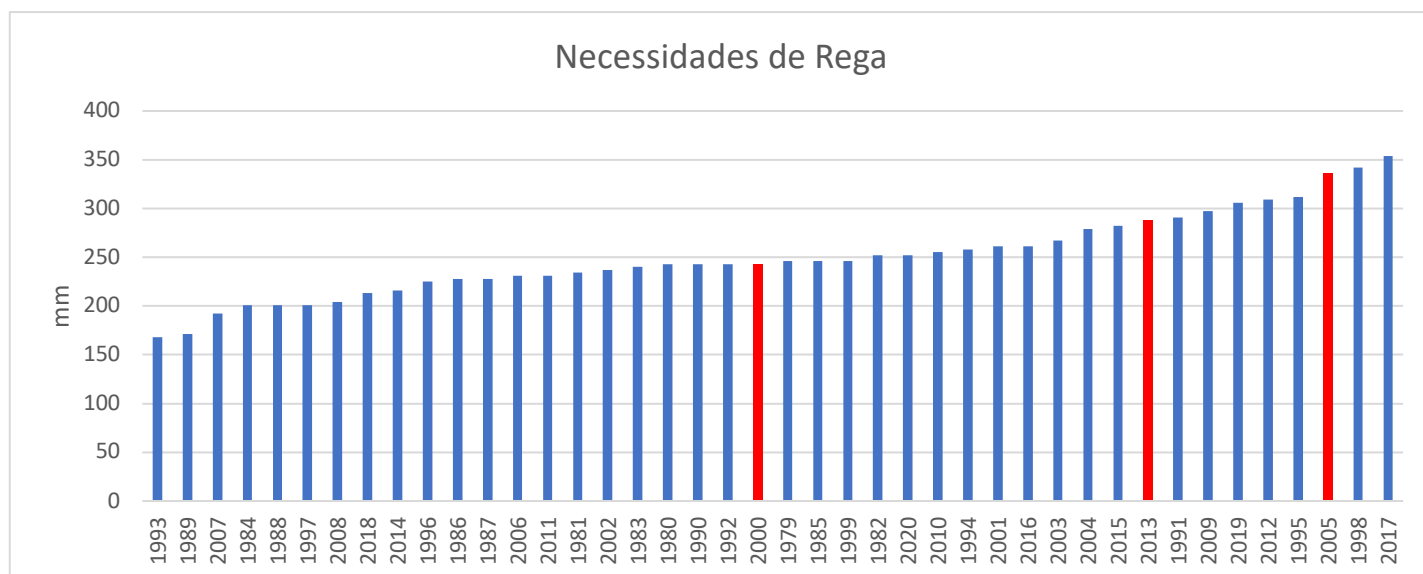
Apêndice U: Necessidades de rega anuais, calculadas no SIMDualKc, dos cenários climáticos (1979-2020), para o amendoal com as respectivas probabilidades de não excedência de 50%, 80% e 95% assinaladas a vermelho.



Apêndice V: Necessidades de rega anuais, calculadas no SIMDualKc, dos cenários climáticos, para o olival com as respetivas probabilidades de não excedência.

Ano	Rega (mm)	Prob. de não excedência	Ano	Rega (mm)	Prob. de não excedência
1993	168	2,4	1979	246	52,4
1989	171	4,8	1985	246	54,8
2007	192	7,1	1999	246	57,1
1984	201	9,5	1982	252	59,5
1988	201	11,9	2020	252	61,9
1997	201	14,3	2010	255	64,3
2008	204	16,7	1994	258	66,7
2018	213	19,0	2001	261	69,0
2014	216	21,4	2016	261	71,4
1996	225	23,8	2003	267	73,8
1986	228	26,2	2004	279	76,2
1987	228	28,6	2015	282	78,6
2006	231	31,0	2013	288	81,0
2011	231	33,3	1991	291	83,3
1981	234	35,7	2009	297	85,7
2002	237	38,1	2019	306	88,1
1983	240	40,5	2012	309	90,5
1980	243	42,9	1995	312	92,9
1990	243	45,2	2005	336	95,2
1992	243	47,6	1998	342	97,6
2000	243	50,0	2017	354	100,0

Apêndice W: Necessidades de rega anuais, calculadas no SIMDualKc, dos cenários climáticos (1979-2020), para o olival intensivo com as respetivas probabilidades de não excedência de 50%, 80% e 95% assinaladas a vermelho.



Apêndice X: Necessidades de rega anuais, calculadas no SIMDualKc, dos cenários climáticos, para as clementinas com as respectivas probabilidades de não excedência.

Ano	Rega (mm)	Prob. de não excedência	Ano	Rega (mm)	Prob. de não excedência
1989	205	2,4	1985	305	52,4
1993	215	4,8	2010	305	54,8
1984	245	7,1	2016	305	57,1
2007	245	9,5	2020	305	59,5
2008	245	11,9	1982	310	61,9
1988	250	14,3	1983	310	64,3
1997	255	16,7	1981	315	66,7
2018	260	19,0	1994	320	69,0
2014	265	21,4	2001	320	71,4
1987	270	23,8	2003	320	73,8
1986	275	26,2	2004	345	76,2
1996	275	28,6	2013	345	78,6
2006	275	31,0	1991	350	81,0
2011	280	33,3	2015	355	83,3
2002	285	35,7	2009	375	85,7
1979	290	38,1	1995	380	88,1
1990	290	40,5	2012	385	90,5
2000	290	42,9	2019	385	92,9
1980	295	45,2	2005	425	95,2
1992	300	47,6	1998	460	97,6
1999	300	50,0	2017	460	100,0

Apêndice Y: Necessidades de rega anuais, calculadas no SIMDualKc, dos cenários climáticos (1979-2020), para as clementinas com as respectivas probabilidades de não excedência de 50%, 80% e 95% assinaladas a vermelho

