

EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NAS NECESSIDADES ÚTEIS DE REGA NA BACIA DO GUADIANA

EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON CROP NET IRRIGATION REQUIREMENTS IN THE GUADIANA BASIN

Pedro Valverde

Bolseiro de investigação do Projeto FCT PTDC/AAC-AMB 115587/2009 /// email

Ricardo Serralheiro

ICAAM, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Universidade de Évora /// membro APRH nº 543

Mário de Carvalho

ICAAM, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Universidade de Évora

Shakib Shahidian

ICAAM, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Universidade de Évora

Carlos Rodrigues

ICAAM, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Universidade de Évora

RESUMO: Investigou-se a tendência de variação das necessidades úteis de rega com as alterações climáticas na bacia hidrográfica do Guadiana para as principais culturas agrícolas de regadio com mais importância na região. Nesta análise aplicou-se o modelo de balanço hídrico do solo ISAREG e utilizaram-se as séries de variáveis climáticas registadas localmente entre 1963 e 2009. Os resultados das séries climáticas indicam, para toda a bacia do Guadiana, um aumento da temperatura média do ar e uma diminuição da precipitação anual, que seguem a tendência das alterações climáticas identificadas a maior escala por vários autores. No período analisado verificou-se na bacia do Guadiana uma consistente e significativa tendência de aumento das necessidades úteis de rega das principais culturas de regadio, sendo previsível que nas próximas décadas as tendências verificadas se mantenham ou mesmo intensifiquem, refletindo-se em correspondentes impactos no consumo de água da agricultura de regadio, a não ser que se apliquem medidas que atenuem eficazmente os efeitos das alterações climáticas.

Palavras-chave: Alterações climáticas, necessidades úteis de rega, bacia hidrográfica do rio Guadiana.

ABSTRACT: *In this study the net irrigation requirements trends response to climate change were investigated, considering the most representative irrigated crops in the Portuguese part of the Guadiana river basin using the ISAREG water balance model and climate data recorded locally between 1963 and 2009. The climate series analysis results indicate two main climate change trends consisting in an increase in mean air temperature and a decrease in annual rainfall for the basin of the Guadiana, which is consistent with the climate change trends reported by various studies conducted at a wider scale. For the analyzed period, the majority of irrigated crops in the Guadiana basin showed a steady and significant increase in net irrigation requirements. Given the climate tendencies found it is expected that, in the coming decades, those trends will maintain or may even be intensified, with a corresponding high impact on water consumption in irrigated agriculture, unless effective adaptation measures are taken to lessen the effects of climate change.*

Keywords: *Climate change, net irrigation requirements, Guadiana river basin.*

1. INTRODUÇÃO

As alterações climáticas consistem em modificações significativas na distribuição estatística das variáveis climáticas à escala global, devido a processos naturais inerentes à atividade solar e à dinâmica da circulação atmosférica e oceânica, mas também ocorrem devido a processos induzidos pelas atividades humanas que afetam o balanço de radiação da Terra, principalmente pelo aumento de emissão de gases responsáveis pelo efeito de estufa.

As evidências das alterações climáticas a nível global com base em dados meteorológicos indicam que a temperatura média do ar subiu 0.8°C desde 1880, sendo que dois terços desse aquecimento se deram depois de 1975 (Hansen *et al.*, 2010). O Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2007) prevê que, sem qualquer ação para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, a temperatura média global da superfície da Terra suba ainda entre 1.8 e 4.0°C neste século, atingindo na pior das hipóteses até 6.4°C. As consequências do aquecimento global são impactos que se manifestam de forma variável em cada região do globo, mas são particularmente preocupantes nos climas temperados mediterrânicos, com características de semiaridez que os tornam suscetíveis de serem dos mais afetados de forma adversa pelas tendências de aumento de temperatura do ar e diminuição da precipitação.

De acordo com o relatório do projeto SIAM II (Santos e Miranda, 2006), as alterações climáticas mais relevantes observadas em Portugal consistem na subida da temperatura média do ar e uma tendência decrescente da precipitação anual, onde se identifica um decréscimo mais significativo durante a Primavera. Observou-se ainda que os 6 anos mais quentes no período entre 1931 e 2000 ocorreram nos últimos 12 anos do século XX. Um exemplo recente da ocorrência de seca foi no ano hidrológico 2004/2005, uma das mais notáveis de que há registo em Portugal continental (Botelho e Ganho, 2010), tendo sido a que afetou maior extensão territorial e a de maior intensidade. Mais recentemente, já nos primeiros 5 meses de 2012, voltou a verificar-se em grande parte do território Português uma situação de seca severa ou extrema, devido à baixa precipitação registada nos meses de Inverno.

O aumento da temperatura média do ar tem outras consequências para além do impacto direto no consumo de água pelas culturas, tendo também

efeitos sobre o processo de erosão do solo devido à diminuição dos teores de matéria orgânica, e consequentemente da agregação, da permeabilidade e da porosidade, com redução da cobertura vegetal do solo, contribuindo para intensificar os processos de desertificação. Estas alterações do solo produzem efeitos persistentes, duradouros e muito difíceis de reverter, que levam à redução da capacidade de armazenamento de água no solo e aumento do escoamento superficial e conduzem a uma perda importante de fertilidade. A estas tendências climáticas progressivas somam-se a ocorrência mais frequente de fenómenos meteorológicos extremos como secas, cheias e tempestades extemporâneas, que têm nos últimos anos surgido com mais frequência (Santos e Miranda, 2006), produzindo perdas muito significativas na atividade agrícola.

O aumento da ocorrência e intensidade de eventos extremos, bem como as alterações graduais, vão deslocando progressivamente as variáveis climáticas dos valores tidos como estatisticamente normais para uma dada região. O balanço hídrico do solo é afetado, nomeadamente na relação precipitação/escoamento, que determina a taxa de erosão do solo e a quantidade de água que se infiltra e fica disponível para as culturas. Do ponto de vista agrícola, as alterações verificadas podem ser desfavoráveis, se implicarem diminuição da produção ou um aumento dos custos dos fatores de produção.

A alteração das condições climáticas, com o previsível aumento das necessidades hídricas das culturas, tem um importante papel nas decisões de planeamento e gestão agrícola relativas à escolha das espécies vegetais a cultivar, às datas de sementeira e à duração dos ciclos culturais. O aumento da irregularidade climática – com aumento da temperatura e diminuição da quantidade e regularidade da precipitação – acresce incerteza e risco económico à atividade agrícola, somando-se às eventuais perdas em quantidade e qualidade das produções. As alterações climáticas influenciam também o custo dos fatores de produção associados à rega, nomeadamente os relacionados com a água e a energia, cujas necessidades previsivelmente tenderão a aumentar, implicando acrescido esforço de aumento da eficiência de aplicação, eventualmente com adaptação da tecnologia da rega.

Sendo a água um recurso crescentemente escasso e indispensável a todas as atividades económicas e ambientais, é simultaneamente um recurso e um fator

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em janeiro de 2014, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em abril de 2014. Este artigo é parte integrante da **Revista Recursos Hídricos**, Vol. 35, Nº 1, #-#, maio de 2014.
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh35n1-numero

de produção que em todas as circunstâncias tem de ser otimizado, garantindo-se sempre a sustentabilidade de qualquer uso que dele se faça. Ora, a agricultura é uma das atividades económicas que mais dependem da água e aquela que mais água consome. Portanto, espera-se naturalmente do setor agrícola a integração de tecnologias adequadas ao uso sustentável da água, bem como a adoção de métodos de gestão que tenham em conta os efeitos das alterações climáticas que se têm vindo a registar.

O objetivo deste trabalho é contextualizar o impacto das alterações climáticas na atividade agrícola, em particular nas suas consequências sobre as necessidades úteis de rega das principais culturas, na bacia hidrográfica do Guadiana. A avaliação das necessidades úteis de rega foi, neste contexto, efetuada com base no balanço hídrico do solo, utilizando os dados de precipitação e temperatura registados localmente nas últimas décadas. Deve aqui salientar-se que, baseando-se a presente análise da evolução das necessidades de rega nas alterações climáticas observadas nas últimas décadas e não em condições simuladas por modelação, a fiabilidade da sua projeção para o futuro dependerá do grau em que se mantiverem as condições da variação climática observada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Localização e caracterização da área de análise

A bacia hidrográfica do Guadiana ocupa uma área total de 66800 km², da qual cerca de 17% (11580 km²) em Portugal (INAG, 2000). A análise das variáveis climáticas foi efetuada dividindo a totalidade da parte portuguesa da bacia hidrográfica do Guadiana em seis unidades de análise (UAs) definidas com base nas sub-bacias hidrográficas dos afluentes do rio Guadiana. Esta subdivisão da bacia hidrográfica em unidades de análise foi a definida por Vivas *et al.* (2010) e adotada também pela equipa que desenvolveu um Sistema de Previsão e Gestão de Secas, SPGS (Serralheiro *et al.*, 2010). Desta forma, ficaram definidos os seis polígonos de análise cuja localização e identificação se representam na Figura 1.

A divisão da bacia do Guadiana em várias unidades de análise foi efetuada para permitir inferir os impactos das alterações climáticas nas diferentes sub-bacias do Guadiana, que na sua extensão inclui uma parte considerável do Alentejo e do interior Algarvio. Estas unidades de análise definidas apresentam diferenças no que diz respeito à forma de implementação do regadio, capacidade de armazenamento de água no solo e heterogeneidades climáticas, que justificam

uma análise separada das necessidades de rega, ainda que os respetivos resultados sejam também apresentados após agregação relativa a toda a bacia do Guadiana. A Tabela 1 caracteriza cada uma das unidades de análise consideradas relativamente à sua área total, superfície agrícola utilizada (SAU) e precipitação anual média (*P*).

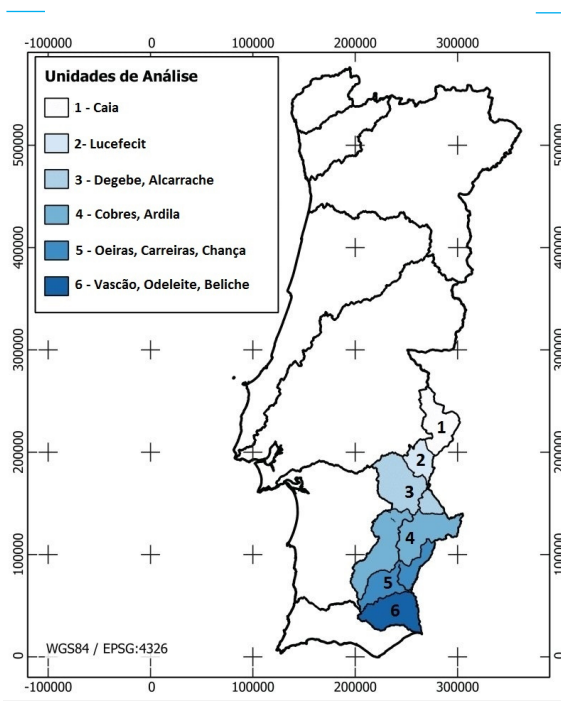


Figura 1 - Localização das 6 unidades de análise na bacia hidrográfica do Guadiana.

Para completar a caracterização da região em estudo é também importante descrever a agricultura de regadio em função das áreas de exploração das culturas. Tendo em conta a diversidade de culturas exploradas em regime de regadio na bacia do Guadiana, é necessário definir grupos de culturas que constituam referência nas análises subseqüentes, com o objetivo de estimar os efeitos das alterações climáticas na gestão da rega. Para representar estes grupos, selecionaram-se cinco culturas, mais representativas em função da área de ocupação agrícola atual e que apresentam relevante importância social e económica: milho, trigo, olival, vinha e citrinos. A Tabela 2 apresenta a superfície de regadio das culturas selecionadas, descrita pelo INE no último recenseamento agrícola, de 2009 (INE, 2011).

Tabela 1 - Caracterização das unidades de análise.

Unidade de análise	Sub-bacias	Área (Km ²)	SAU (Km ²) ^(*)	P (mm) ^(**)
1	Caia	1.376	1.047	619
2	Lucefecit	753	575	617
3	Degebe, Alcarrache	2.351	1.777	535
4	Cobres, Ardila	3.857	2.998	503
5	Oeiras, Carreiras, Chança	1.664	1.170	479
6	Vascão, Odeleite, Beliche	1.581	475	596
Total		11.581	8.042	-----

Notas:

^(*) Superfície agrícola utilizada ponderada por unidade de análise (fonte: INE Recenseamento Agrícola 2009);

^(**) Precipitação anual média nos anos hidrológicos entre os anos de 1963 a 2009 (fonte: SNIRH).

Tabela 2 - Superfícies agrícolas de regadio (ha) das culturas selecionadas para estimar os efeitos das alterações climáticas na bacia do Guadiana (Fonte: RA 2009).

Unidade de análise	Milho	Trigo	Olival	Vinha	Citrinos
1	1.872	1.026	3.510	374	89
2	390	527	572	1.061	32
3	1.382	1.128	3.802	3.902	76
4	1.459	158	18.407	2.463	222
5	121	11	2.411	137	43
6	6	10	47	63	1.366
Total	5.231	2.860	28.749	8.000	1.829

As culturas analisadas têm características culturais diversas, existindo diferenças de impacto das alterações climáticas nas suas necessidades de rega. O olival é uma cultura tradicionalmente de sequeiro, bem adaptada ao clima mediterrânico, verificando-se que o regadio tem sido cada vez mais adotado nesta cultura com o objetivo de melhorar a quantidade e qualidade da produção. O trigo é uma cultura tradicionalmente de sequeiro e com necessidades hídricas relativamente baixas, mas que pode, em regadio de complemento,

registar uma boa produtividade da água aplicada. No caso do trigo, o regadio permite regularizar a produção em anos secos e reduzir os efeitos negativos da distribuição irregular da precipitação característica do clima mediterrânico, que se tem acentuado sob o efeito das alterações climáticas.

O milho é uma das culturas arvenses principais da agricultura de regadio, apresentando um elevado potencial de retorno devido à crescente cotação que tem registado nos mercados e sua adoção é suscetível

de registar um incremento devido à disponibilidade de novas áreas de regadio que têm surgido na região do Guadiana, pela implementação do sistema de Alqueva. O milho é uma cultura muito exigente em água e muito sensível a condições de défice hídrico em várias fases do ciclo vegetativo, ainda que de curta duração, sendo por isso uma das culturas mais dependentes da rega para superar a irregularidade pluviométrica característica da região do Guadiana e tirar partido das temperaturas e número de horas de insolação, que lhe são favoráveis desde o período primaveril até ao final do verão.

A rega da vinha é atualmente uma prática corrente, que permite corrigir a quantidade de água disponível no solo, principalmente nas fases críticas, no início do crescimento vegetativo e na fase de maturação. Um efeito importante da rega nesta cultura é o controlo efetivo sobre a qualidade da produção, com evidentes reflexos nos rendimentos das explorações.

Os citrinos são uma cultura muito pouco expressiva no contexto dos perímetros de rega do Alentejo. No entanto, como se pode verificar na Tabela 2, esta cultura assume particular importância na região Algarvia da bacia do Guadiana (UA 6), onde se destaca por ser a principal cultura de regadio.

2.2. Informação meteorológica

A informação meteorológica que caracteriza a bacia hidrográfica do Guadiana foi reunida para o período temporal entre 1963 e 2009, utilizando conjuntamente a informação da rede SNIRH do ex-INAG (atualmente Agência Portuguesa do Ambiente, APA) e do Instituto de Meteorologia (IM), atualmente Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), com o objetivo de completar mutuamente as séries com dados em falta em cada uma das bases de informação. As séries meteorológicas utilizadas foram reunidas anteriormente no âmbito do Sistema de Prevenção e Gestão de Secas (SPGS) (Serralheiro *et al.*, 2010), para determinar as necessidades médias de rega das principais culturas da Bacia do Guadiana. Procedeu-se agora a uma análise mais detalhada, para determinar a sua evolução temporal como consequência das alterações climáticas e traçar as perspetivas de evolução futura. A Figura 2 descreve a localização dos postos udométricos que foram utilizados para caracterizar a precipitação na bacia do Guadiana e a representação dos polígonos obtidos através do método de Thiessen para definir as áreas utilizadas para obter a precipitação ponderada em cada unidade de análise. A Figura 3 mostra a localização das estações climatológicas utilizadas para reunir os dados necessários ao cálculo da evapotranspiração

de referência [ET_0], que inclui a rede de estações do SNIRH (APA) e do IPMA.

2.3. Determinação das necessidades hídricas e das necessidades úteis de rega das culturas

As necessidades úteis de rega foram determinadas através do modelo informático ISAREG desenvolvido no Instituto Superior de Agronomia, ISA (Teixeira e Pereira, 1992; Teixeira, 1994), que se baseia no método da FAO (Doorenbos e Pruitt, 1977; Doorenbos e Kassam, 1979) para a determinação das necessidades hídricas das culturas. O modelo ISAREG permite estimar as necessidades de rega através da realização do balanço hídrico do solo, utilizando como dados de entrada a precipitação efetiva, evapotranspiração de referência, dados do solo e as características de crescimento da cultura ao longo do ciclo cultural.

A água resultante da precipitação total é parcialmente perdida por escoamento superficial e drenagem profunda. Desta forma, a precipitação efetiva depende localmente da topografia, tipo de solo e interseção pelo coberto vegetal. A precipitação efetiva constitui assim a fração da precipitação total que contribui para o armazenamento de água no solo e fica disponível na zona radicular para ser utilizada pelas culturas.

Para efetuar o balanço hídrico do solo através do modelo ISAREG, foi necessário determinar para cada unidade de análise a precipitação efetiva [P_{ef}] através dos dados de precipitação total [P_t]. Para o efeito, utilizou-se o método definido pelo USDA Soil Conservation Service (USDA-SCS), que tem sido utilizado genericamente com êxito satisfatório, em alternativa a outros métodos também empíricos (Clarke, 1998). O procedimento é descrito pela Eq. 1, em que P_{ef} e P_t estão expressas em (mm):

$$\begin{aligned} P_{ef} &= (P_t (125 - 0.2 P_t)) / 125 && \text{(para } P_t < 250 \text{ mm)} \\ P_{ef} &= 125 + 0.1 P_t && \text{(para } P_t \geq 250 \text{ mm)} \end{aligned} \quad [1]$$

A precipitação total foi obtida através da média ponderada dos postos udométricos presentes em cada unidade de análise.

A evapotranspiração de referência [ET_0] é um parâmetro-chave em estudos hidrológicos envolvendo o balanço hídrico do solo e a determinação das necessidades de rega, permitindo ajustar as dotações de rega de acordo com as solicitações atmosféricas sobre as culturas. A FAO (Allen *et al.*, 1998) recomenda que ET_0 seja determinada pelo método FAO-Penman-Monteith (PM), que no entanto é um método muito exigente em informação de parâmetros de natureza

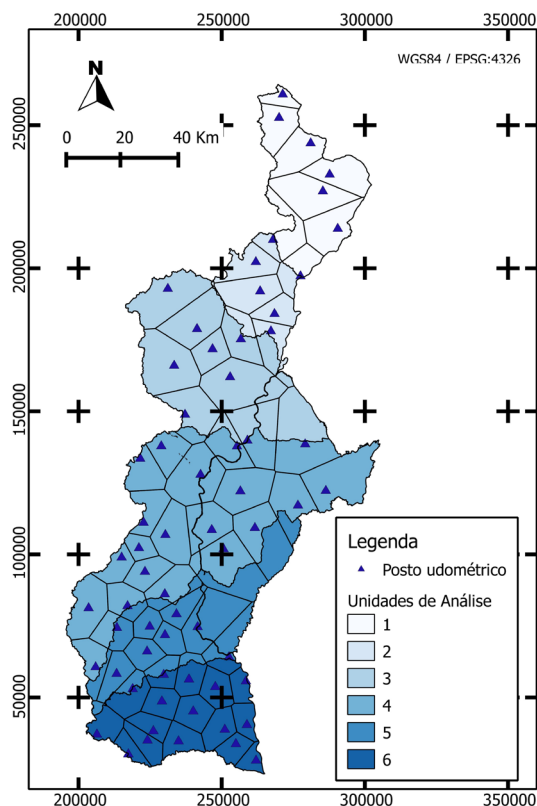


Figura 2 - Localização dos postos udométricos da APA (ex-INAG) utilizados para constituir a série de dados. (fonte:SNIRH)

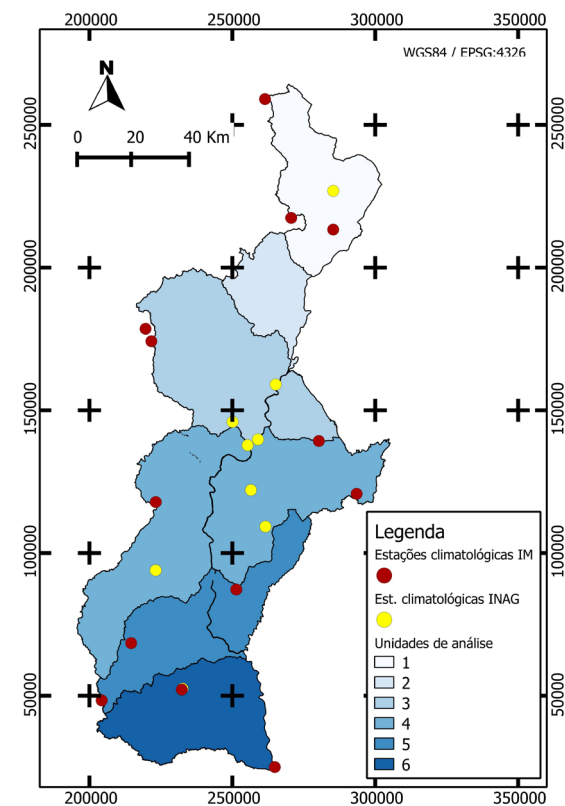


Figura 3 - Rede de estações meteorológicas do IPMA. (ex-IM) e da APA (ex-INAG) (fonte: SNIRH e IPMA).

climática, que frequentemente não estão disponíveis. Em alternativa, outros métodos têm sido usados, com base empírica, requerendo parâmetros climáticos mais amplamente disponíveis, abrangendo em geral a temperatura do ar e, por vezes, alguma forma da radiação solar. Inclui-se nestas metodologias o método (H-S) de Hargreaves - Samani (Hargreaves e Samani, 1985). Santos e Maia (2005) procederam à análise dos dados meteorológicos de nove estações automáticas da rede SAGRA-COTR e encontraram uma elevada correlação, com coeficiente de determinação da ordem dos 0.9, entre os resultados de ET_0 calculados pela equação de Hargreaves-Samani e os determinados pelo método da FAO-Penman-Monteith. Outros autores [Droogers e Allen, 2002; Shahidian *et al.*, 2012] têm encontrado correlações semelhantes entre os dois métodos de cálculo da ET_0 .

Verificou-se que, na bacia do Guadiana, a maioria das estações climatológicas com registos em período já razoavelmente longo (1963-2009), sendo pouco numerosas (Figura 3), não possuía registos de todas as variáveis necessárias para calcular a ET_0 através do método FAO-Penman-Monteith. Por seu lado, a rede de estações meteorológicas automáticas do COTR disponibiliza dados muito completos, mas só entrou em funcionamento em 2001, pelo que dispõe ainda de poucos dados para a análise de tendências climáticas de longo prazo.

Apesar da relativa escassez de dados climáticos com origem na rede do COTR, o método Hargreaves-Samani permitiu, para a região em estudo, obter valores de ET_0 muito próximos dos obtidos pelo método FAO-Penman-Monteith, não induzindo significativas perdas de rigor. Com efeito, da análise da ET_0 efectuada no âmbito

do SPGS [Serralheiro *et al.*, 2010], num conjunto de dados provenientes de três estações meteorológicas do Guadiana pertencentes à rede de estações SAGRA (Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo) do COTR, obteve-se uma correlação entre os resultados dos dois métodos com coeficiente de determinação de 0,97. Desta forma, optou-se por utilizar no presente trabalho a equação de Hargreaves e Samani [1985] expressa na Eq. 2, que apenas requer valores das temperaturas do ar [máximas, médias e mínimas], geralmente disponíveis, e da radiação extraterrestre (que pode ser calculada em função da latitude e dia do ano). Na Eq. 2, K_T é um coeficiente empírico; Ra é a radiação extraterrestre em (mm/dia) e T_{max} , T_{min} e T_{med} correspondem respetivamente às temperaturas máxima, mínima e média diárias do ar (°C):

$$ET_o = 0.0135 (K_T) (Ra) (T_{max} - T_{min})^{1/2} (T_{med} + 17.8) \quad [2]$$

O coeficiente empírico K_T assume o valor $K_T = 0,17$ para as regiões semi-áridas, como as de características mediterrânicas, pelo que a Eq. 2, pode ser simplificada assumindo a forma da Eq. 3:

$$ET_o = 0.0023 (Ra) (T_{max} - T_{min})^{1/2} (T_{med} + 17.8) \quad [3]$$

Na caracterização dos solos e atendendo à área de análise, é necessário ter em conta que há uma diversidade muito grande de situações pedológicas, pelo que, para o objetivo comparativo do presente estudo, foi necessário reduzir a análise, assumindo apenas duas situações padrão: uma para as culturas anuais, outra para as culturas permanentes lenhosas, considerando-se que estas duas situações representarão razoavelmente a situação padrão dos solos pouco espessos da bacia do Guadiana. Assim, para as culturas anuais, considerou-se no modelo ISAREG um solo de 60 cm de profundidade, com capacidade utilizável total de 100 mm; para as lenhosas permanentes, um solo de 100 cm de profundidade, com capacidade utilizável de 200 mm.

As necessidades hídricas das culturas podem ser definidas como equivalentes à evapotranspiração cultural ET_c , que corresponde à evapotranspiração registada por uma cultura na situação ideal de conforto hídrico e pode ser descrita como função da evapotranspiração de referência ET_o e de um coeficiente cultural K_c :

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad [4]$$

Para as culturas que não cobrem o terreno de forma uniforme, e em que os valores de K_c disponíveis não especificam a taxa de cobertura utilizada como referência, o ET_c pode ser afetado por um coeficiente adicional de redução, que define a fração da área coberta pela copa da cultura (K_r), resultando assim na Eq. 5:

$$ET_c = K_c \times K_r \times ET_o \quad [5]$$

O modelo ISAREG considera para o cálculo de ET_c apenas o coeficiente cultural K_c . Sendo assim, nas situações em que foi necessário utilizar no cálculo o coeficiente de redução K_r , nomeadamente no olival, utilizou-se como coeficiente de entrada o produto [$K_c \cdot K_r$], em substituição do coeficiente único K_c .

Para o olival, tomou-se como referência os coeficientes culturais descritos nos trabalhos publicados por Pastor *et al.* [1996], obtidos para a província de Córdoba em Espanha, que constituem as referências de consumo de água do olival mais próximas e mais adotadas para a gestão da rega nas condições e clima do sul de Portugal. Pastor *et al.* [1996] descreve também o coeficiente de redução K_r através da Eq. 6:

$$K_r = 2 Sc / 100 \quad [6]$$

O parâmetro Sc corresponde à percentagem de solo coberta pela copa das árvores descrita pela Eq. 7, sendo D o diâmetro médio da copa e N a densidade da cultura expressa em (nº árvores/ha).

$$Sc = (\pi \cdot D^2 \times N) / (4/100) \quad [7]$$

Para as restantes culturas estudadas, foram assumidos os coeficientes culturais da FAO [Allen *et al.*, 1998] para as condições mediterrânicas, tendo-se considerado para as culturas que não cobrem de forma uniforme o terreno, as densidades de ocupação tidas como mais comuns na região. A Tabela 3 indica os coeficientes culturais e de cobertura do solo utilizados nas simulações das necessidades de rega, através do modelo ISAREG.

O balanço hídrico do solo foi efetuado ano a ano, entre 1963 e 2009, com o modelo ISAREG, para cada unidade de análise, com as séries completas de precipitação efetiva e ET_o , assumindo a continuidade entre anos consecutivos, ou seja, considerando que a água armazenada no solo no fim de cada ano é a disponível

Tabela 3 - Coeficientes culturais (Kc) e de cobertura de solo (Kr).

Cultura	Coef. cob. do solo (Kr)	Coef. culturais (Kc) por fase cultural		
		Inicial	Desenvolvimento	Final
Trigo	100%	0.30	1.15	0.25
Milho	100%	0.30	1.20	0.35
Vinha	50%	0.30	0.70	0.00
Olival Adulto (*)	59%	0.65	0.50	0.50
Citrinos	70%	0.70	0.65	0.70

(*) Para o olival adulto considerou-se uma densidade de ocupação do terreno de 238 árvores/ha

no início do ano seguinte. As necessidades (úteis) de rega são determinadas pelo modelo para cada cultura, de forma a repor o conteúdo de água no solo que a cultura vai consumindo, equivalendo à *ETc*.

2.4. Análise de tendência e de significância

A análise das tendências em séries climatológicas apresenta algumas dificuldades, porque estas variáveis apresentam frequentemente flutuações significativas ao longo do tempo, que se sobrepõem à tendência de longo prazo que se pretende analisar. Com efeito, na análise da evolução das variáveis climáticas e das necessidades de rega é difícil detetar se ocorreram sequências ou ciclos de anos com predominância de uma determinada tendência, devido à presença de flutuações que, manifestando-se pontualmente, não traduzem uma tendência a longo prazo. Um dos métodos para identificar a presença de uma tendência numa série de dados é a utilização de filtros capazes de reduzir a variabilidade da série. Para atingir este objetivo, utilizaram-se médias móveis de 10 anos para suavizar as oscilações das séries e evidenciar as tendências de longo prazo.

A quantificação das tendências foi efetuada sobre as séries temporais completas, recorrendo a regressões lineares calculadas pelo método dos mínimos quadrados, correspondendo a tendência ao declive da equação da reta de ajustamento assim obtida. Estes métodos permitem evidenciar e quantificar as tendências das séries analisadas, mas não permitem inferir da significância das tendências identificadas.

Para a determinação da significância da tendência nas séries a longo prazo, utilizou-se o teste estatístico não-paramétrico Mann-Kendall (Mann, 1945), amplamente

referenciado na análise de tendências de séries temporais de variáveis climáticas e hidrológicas (Hipel e McLeod, 2005). O teste estatístico de Mann-Kendall é definido para uma série temporal de n elementos, em que x são os dados sequenciais da série, por:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_i) \quad [8]$$

em que *Sgn* é a função que traduz o sinal da variação entre dados x consecutivos, definida como:

$$\text{Sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & , x_j > x_i \\ 0 & , x_j = x_i \\ -1 & , x_j < x_i \end{cases} \quad [9]$$

Um valor de S positivo indica assim uma tendência positiva na série, enquanto um valor de S negativo indica uma tendência negativa. Considerando uma amostra de grande dimensão com inexistência de dados iguais consecutivos e assumindo que a hipótese nula H_0 corresponde à ausência de tendência da série de dados, a estatística S segue uma distribuição normal com média nula: $E(S)=0$, sendo a variância definida por:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} n(n-1)(2n+5) \quad [10]$$

A significância da estatística S pode ser testada através de:

$$Z(t) = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & , S > 0 \\ 0 & , S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & , S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

Adotando-se um nível de significância de $\alpha = 0.05$ (nível de confiança de 95%), a hipótese nula H_0 não será rejeitada sempre que $-1.96 < Z(t) < 1.96$, em que 1.96 corresponde ao valor crítico da distribuição normal para um teste bilateral de $\alpha = 0.05$.

Para a realização das análises de tendência através do teste de Mann-Kendall, utilizou-se o módulo "Kendall" (McLeod, 2011) para o *software* estatístico R (R Core Team, 2012), tendo-se considerado um nível de significância de $\alpha = 0.05$ como critério de rejeição da hipótese nula.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Tendências de precipitação identificadas

A Figura 4 descreve a precipitação anual média acumulada nas unidades de análise consideradas na bacia do Guadiana.

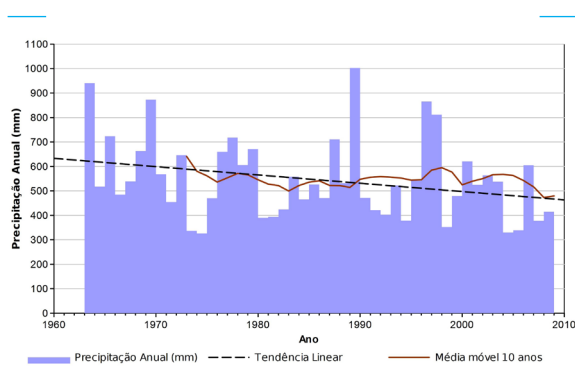


Figura 4 - Precipitação anual (mm) e tendência linear entre 1963 e 2009 na bacia do Guadiana.

Verifica-se que a precipitação descreve uma tendência decrescente significativa (com um nível de significância $\alpha = 0.05$) na série representada. O declive que resulta do

ajustamento de uma reta com o método dos mínimos quadrados indica um decréscimo médio de 3.4 mm/ano na precipitação média na bacia do Guadiana, constituindo um decréscimo total de 156 mm na precipitação anual média no período analisado.

A evolução da distribuição mensal da precipitação é muito importante para definir o impacto das alterações climáticas no padrão da reposição das reservas de água no solo e nas estruturas de armazenamento que servem o regadio. A Figura 5 descreve a distribuição média da precipitação anual ao longo dos meses do ano.

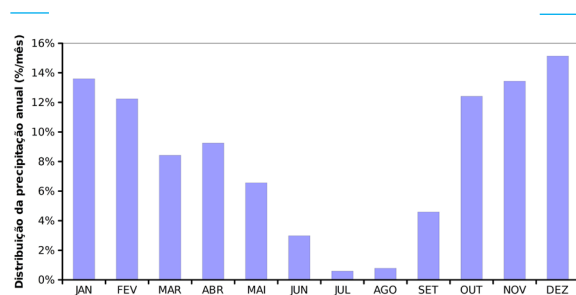


Figura 5 - Distribuição média da precipitação anual pelos meses do ano na bacia do Guadiana (%/mês).

Na Figura 5 verifica-se que a maior parte da precipitação acumulada anualmente na bacia do Guadiana se distribui nos meses de Outono e Inverno. A Figura 6 descreve as tendências verificadas na série de dados completa para cada mês e a sua significância de acordo com o teste estatístico de Mann-Kendall:

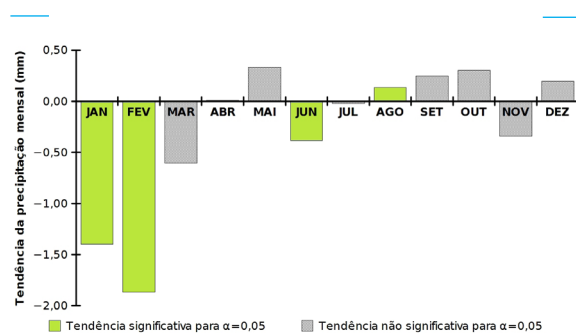


Figura 6 - Quantificação da tendência da precipitação mensal (mm/mês) na bacia do Guadiana ao longo do período analisado e descrição do resultado do teste de significância.

Verifica-se que os meses de janeiro, fevereiro e março são os que apresentam a mais acentuada descida de precipitação mensal ao longo do período analisado, sendo que as tendências decrescentes determinadas como significativas ocorreram nos meses de janeiro, fevereiro e junho. O mês de junho regista uma tendência de precipitação decrescente, contribuindo para elevar as necessidades de rega das culturas neste período de maior solicitação atmosférica. No entanto, o mês de agosto apresenta uma pequena tendência de crescimento, considerada significativa pelo teste estatístico de Mann-Kendall. Porém, o valor absoluto da precipitação neste mês não é suficiente para lhe conferir importância na gestão da rega. Pode concluir-se que os meses de Inverno, onde os valores absolutos de precipitação são mais elevados e assumem maior importância para a reposição dos níveis de armazenamento superficial, têm sofrido um importante decréscimo.

3.2. Variação da temperatura média do ar

Existe uma relação direta entre a temperatura do ar e a ET_0 , sendo por isso uma das variáveis climáticas com maior importância para determinar o consumo de água das culturas. A temperatura média do ar registada nas seis unidades de análise consideradas na bacia do Guadiana está representada na Figura 7:

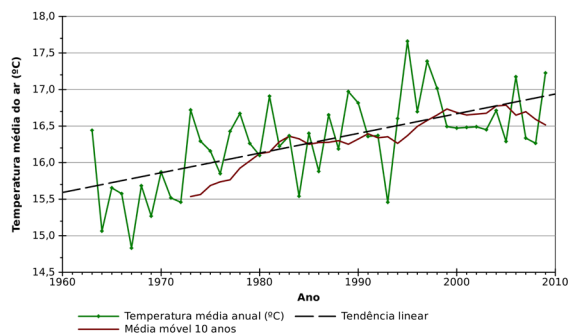


Figura 7 - Temperatura média do ar (°C) expressa anualmente e tendência linear registadas entre 1963 e 2009.

Apesar da tendência crescente verificada nos valores da temperatura média do ar, observam-se oscilações com intervalos irregulares traduzindo anos mais e menos quentes que contribuem para atenuar a percepção empírica que resulta do aumento da temperatura nas séries climáticas descritas. A linha

de tendência aponta claramente para um aumento da temperatura média anual do ar na bacia do Guadiana, tendo-se verificado pelo teste de Mann-Kendall que este aumento é estatisticamente significativo para um nível de significância de $\alpha = 0.05$.

3.3. Evolução da evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (ET_0) traduz a água perdida pelo solo devido à evaporação e transpiração de uma cultura de referência. A Figura 8 descreve a ET_0 diária média determinada para cada ano do período de 46 anos analisados e para o conjunto das unidades de análise da bacia do Guadiana, verificando-se uma tendência de aumento estatisticamente significativa ($\alpha = 0.05$).

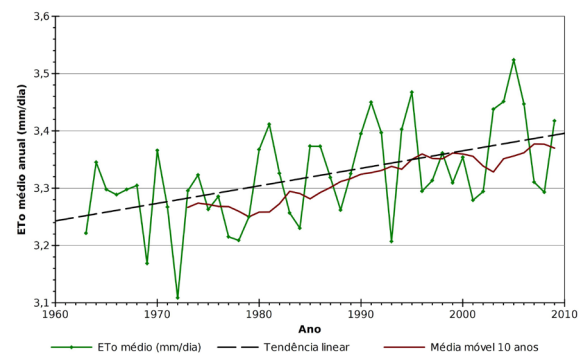


Figura 8 - Evapotranspiração de referência diária média (mm/dia) no período analisado.

3.4. Evolução nas necessidades úteis de rega

As necessidades úteis de rega foram estimadas através do modelo ISAREG, para as culturas mais representativas da bacia do Guadiana, tendo-se considerado em todos os casos que a rega é definida com vista a obter o máximo rendimento da cultura. A Figura 9 descreve a evolução das necessidades úteis de rega do milho para a média do conjunto das unidades de análise consideradas na bacia do Guadiana, verificando-se claramente uma tendência de aumento não só evidenciada na tendência linear dos dados mas também nas médias móveis de 10 anos. O declive da tendência linear dos dados indica, para a média das seis unidades de análise consideradas, um aumento médio das necessidades de rega em $4.4 \text{ m}^3/\text{ha}$ em cada ano ao longo do período considerado,

verificando-se que a média móvel nos últimos dez anos corresponde ao maior valor das necessidades úteis de rega de toda a série de resultados. No período em análise, as necessidades anuais de rega do milho aumentaram em média cerca de 202 m³/ha. O facto de a média móvel a dez anos cruzar a linha de tendência linear indica uma aceleração no crescimento das necessidades de rega do milho nos últimos anos representados.

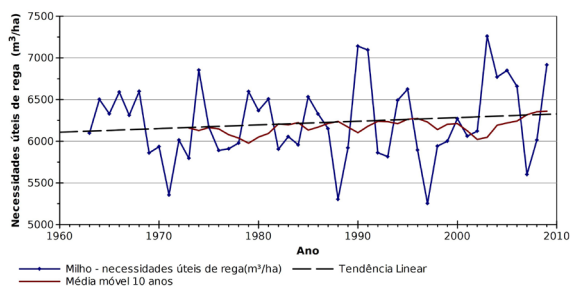


Figura 9 - Evolução das necessidades úteis de rega do milho (m³/ha) na bacia do Guadiana, considerando a média das seis unidades de análise.

A Figura 10 representa a variação das necessidades hídricas do trigo de Inverno, identificando-se também nesta cultura uma clara tendência de aumento das necessidades úteis de rega.

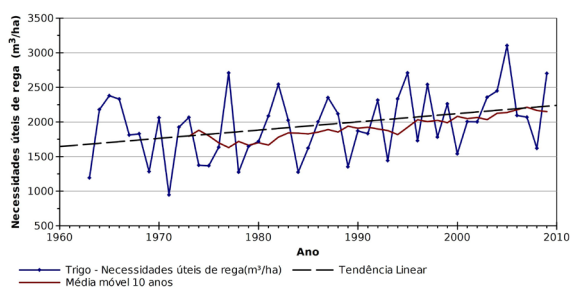


Figura 10 - Evolução das necessidades úteis de rega do trigo de inverno (m³/ha) na bacia do Guadiana, considerando a média das seis unidades de análise.

A Figura 11 descreve a evolução das necessidades úteis de rega do olival adulto, verificando-se uma tendência ligeiramente decrescente das necessidades de rega. Esta é, das culturas analisadas, a única com tendência decrescente das necessidades de rega, o que se deverá não só à natural adaptação da oliveira ao clima mediterrâneo mas também à sua capacidade de adaptação (nomeadamente por controlo estomático) a condições especialmente gravosas de carência hídrica, o que se reflete nos respetivos coeficientes culturais utilizados.

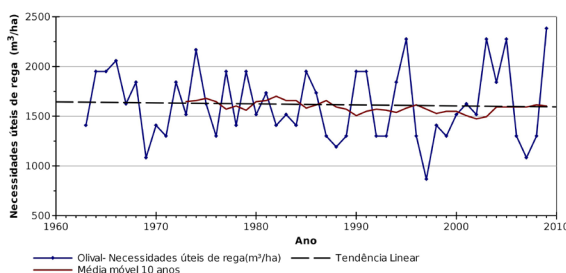


Figura 11 - Evolução das necessidades úteis de rega do olival (m³/ha) na bacia do Guadiana, considerando a média das seis unidades de análise.

A vinha (Figura 12) é a cultura que apresenta menor amplitude nas oscilações das necessidades úteis de rega ao longo do tempo embora, na totalidade do período analisado, apresente uma tendência ascendente.

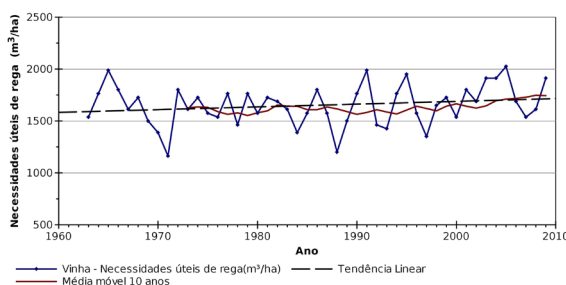


Figura 12 - Evolução das necessidades úteis de rega da vinha (m³/ha) na bacia do Guadiana, considerando a média das seis unidades de análise.

A Figura 13 descreve as necessidades úteis de rega dos citrinos ao longo do período analisado, verificando-se que é uma das culturas com maiores necessidades de rega e que regista, para a bacia do Guadiana, uma pequena tendência de crescimento nos volumes de água necessários para rega.

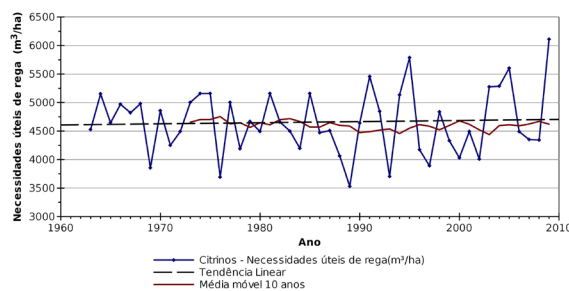


Figura 13 - Evolução das necessidades úteis de rega dos citrinos (m³/ha) na bacia do Guadiana, considerando a média das seis unidades de análise.

No contexto do regadio importa referir que as necessidades úteis de rega apenas se reportam ao consumo de água pela cultura visando o rendimento máximo e não incluem as perdas de eficiência próprias do sistema de rega e do modo de aplicação da água ao solo. As necessidades totais de rega vão ainda depender da eficiência do método de aplicação: gravidade (tipicamente cerca de 50%, até mais de 75% com sistemas automatizados), aspersão (60 a 75%), e gota-a-gota (até 95%).

A Tabela 4 descreve os resultados das tendências das necessidades úteis de rega das culturas em cada unidade de análise, determinadas através da aplicação de uma regressão linear sobre os valores anuais médios das necessidades de rega obtidos pelo modelo ISAREG.

De um modo geral a tendência das necessidades úteis de rega no período analisado foi de aumento, com a exceção da unidade de análise 6. Conclui-se, no entanto, que apenas as unidades de análise 3, 4 e 5 revelam tendências de crescimento das necessidades de rega com significado estatístico para as culturas do milho, trigo e vinha. No conjunto das culturas analisadas, apenas o trigo tem um aumento estatisticamente significativo das necessidades de rega na média resultante de todas as unidades de análise, o que se deverá por um lado aos reduzidos volumes necessários à rega (e conseqüente maior importância

relativa dos aumentos requeridos), por outro lado à crescente irregularidade das precipitações de inverno e primavera, de conseqüências muito diretas nas necessidades de rega do trigo.

A unidade de análise 6, correspondente à zona algarvia da bacia do Guadiana, é a única que descreveu uma tendência decrescente em todas as culturas, embora sem significado estatístico.

4. CONCLUSÕES

As tendências de variação verificadas nas séries climáticas analisadas das últimas cinco décadas na região da bacia hidrográfica do rio Guadiana apontam para um aumento da temperatura média do ar, diminuição da precipitação e alterações na distribuição sazonal da precipitação. Verificou-se também um aumento generalizado das necessidades úteis de rega das principais culturas com interesse económico na região, embora, à escala da bacia hidrográfica, apenas o trigo tenha apresentado um crescimento estatisticamente significativo. Observou-se também que o olival foi a única cultura que no conjunto da bacia do Guadiana apresentou uma tendência decrescente nas necessidades de rega, o que indica que as alterações climáticas registadas e as alterações na sazonalidade da precipitação não afetaram de forma significativa esta cultura, bem adaptada ao clima mediterrânico.

Os resultados obtidos também demonstram que a área em estudo apresenta alguma heterogeneidade nas tendências identificadas das necessidades úteis de rega, tendo-se observado que, em particular nas unidades de análise que limitam a bacia do Guadiana a norte (UA1), e a sul (UA6), não existe uma tendência bem definida (significativa) de variação das necessidades de rega das culturas. Poderá admitir-se que, talvez por influência geográfica, nomeadamente pelo relevo (UA1) e pela proximidade do mar (UA6), estas zonas apresentam características que oferecem mais resistência aos efeitos negativos das alterações climáticas sobre as culturas. Nas restantes unidades de análise, situadas em regiões interiores e predominantemente de planície (UAs 2,3,4), verificam-se as tendências de aumento das necessidades hídricas com mais significado estatístico.

Ao impacto das alterações climáticas, observado nas tendências crescentes das necessidades hídricas das culturas, poderão eventualmente juntar-se outras alterações associáveis às mudanças climáticas, nomeadamente antecipação de períodos de floração, alterações do período de crescimento e outras no ciclo cultural. A tendência de diminuição da precipitação total e de aumento da sua irregularidade, associada ao

Tabela 4 - Resumo das tendências de aumento das necessidades de rega para cada cultura e unidade de análise e resultado do teste de significância da tendência.

Cultura	Unidades de Análise:	1	2	3	4	5	6	Média
Milho	Tendência (m ³ /ha/ano)	-3.6	6.1	6.8	14.4	10.0	-7.4	4.4
	Teste de signif.	-	-	-	●	●	-	-
Trigo	Tendência (m ³ /ha/ano)	0.6	15.5	14.8	35.0	11.7	-6.0	11.9
	Teste de signif.	-	-	●	●	-	-	●
Olival	Tendência (m ³ /ha/ano)	-7.6	2.9	3.3	4.5	-1.7	-7.5	-1.0
	Teste de signif.	-	-	-	-	-	-	-
Vinha	Tendência (m ³ /ha/ano)	0.1	3.4	4.9	4.4	3.8	-0.7	2.7
	Teste de signif.	-	-	●	●	-	-	-
Citridos	Tendência (m ³ /ha/ano)	-3.2	3.1	11.0	10.8	2.8	-12.8	1.9
	Teste de signif.	-	-	-	-	-	-	-

Nota: As tendências das necessidades de rega que apresentaram significância estatística para $\alpha = 5\%$ estão assinaladas com o símbolo "●"

aumento de temperatura do ar na bacia do Guadiana nas últimas décadas, evidenciam também um risco de redução na disponibilidade dos recursos hídricos e um risco acrescido de intensificação dos processos de desertificação, que vão exigir maior integração na atividade agrícola de medidas mais eficazes para evitar a erosão e a degradação do solo.

A nível local, as medidas a tomar para compensar as alterações climáticas devem envolver o reforço das ações de conservação do solo, escolha adequada das espécies culturais e a aplicação de métodos de rega de precisão, utilizando sistemas automatizados que permitam em tempo real a aplicação da água de rega em função do estado hídrico do solo, do momento do ciclo cultural e da solicitação atmosférica. Os resultados obtidos e as tendências verificadas reforçam também a importância de manter uma rede adequada de estações de monitorização climática para seguir localmente as tendências meteorológicas e facultar informação útil no âmbito da gestão da rega às entidades gestoras das explorações agrícolas.

Os custos dos fatores de produção na atividade agrícola de regadio recaem largamente na energia e no custo da água. A diminuição da precipitação, associada ao aquecimento do ar, obriga a gastos acrescidos com a

rega, especialmente na rega sob pressão, devido ao maior tempo de funcionamento exigido aos sistemas de bombagem, para aplicar os volumes de água necessários. A otimização da eficiência de aplicação na rega é crucial para uma utilização racional da água na perspectiva de crescente escassez dos recursos hídricos. A título de exemplo, repare-se que a melhoria de 1% na eficiência do uso da água nas culturas com maior consumo de água, como o milho, pode significar, num ano quente, uma poupança de 70 m³ de água por hectare/ano.

As alterações climáticas identificadas na bacia do Guadiana nas últimas décadas seguem as tendências observadas no clima a escala mais ampla, da região mediterrânea, traduzindo-se por aquecimento do ar, redução da precipitação e aumento da sua irregularidade e também aumento da frequência de fenómenos climáticos extremos.

A utilização dos resultados do presente trabalho para projeção destas tendências no futuro na bacia do Guadiana só é viável assumindo que se manterão as tendências de alterações climáticas que se verificaram no período estudado (1963 – 2009).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido como parte da tarefa 4 do projeto FCT PTDC_AAC-AMB_115587/2009: "Desenvolvimento de uma Metodologia para a Integração dos Efeitos das Alterações Climáticas na Gestão de Recursos Hídricos para uma Bacia Hidrográfica Portuguesa".

BIBLIOGRAFIA

- Allen R., L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith, (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 56, Rome, Italy, 300 pp.
- Bautista F., Bautista D., Delgado-Carranza C., (2009). Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and sub-humid tropical climates for regional applications. *Atmósfera*, México, vol.22, n.4, pp.331-348, ISSN 0187-6236.
- Botelho F., Ganho N., (2010). Dinâmica anticiclónica subjacente à seca de 2004/2005 em Portugal Continental. Departamento de Geografia e Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT), Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra. VI Seminário Latino Americano de Geografia Física, II Seminário Ibero-americano de Geografia Física.
- Clarke D., (1998). CROPWAT for Windows: User guide. FAO, Rome
- COTR, (2009). Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio : www.cotr.pt
- Doorenbos J., Pruitt W.O., (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. FAO. Rome.
- Doorenbos J., Kassam A., (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO. Rome
- Hansen J., Ruedy R., Sato M., Lo K. , (2010). Global surface temperature change, *Rev. Geophys.*, 48, RG4004, doi:10.1029/2010RG000345.
- Hargreaves G.H., Samani. Z.A. , (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agric.* 1:96-99.
- Hipel K.W., McLeod A.I. , (2005). Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. Electronic reprint of our book originally published in 1994. <http://www.stats.uwo.ca/faculty/aim/1994Book/>.
- INAG, (2000). Plano de Bacia Hidrográfica do rio Guadiana. Instituto da Água, I.P. (INAG, I.P.) . Ministério do Ambiente.
- INAG, (2002). Plano Nacional da água, Instituto da Água, I.P. (INAG, I.P.). Ministério do Ambiente.
- INAG, (2009). SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Instituto da Água, I.P. (INAG, I.P.). Ministério do Ambiente. <http://snirh.pt>
- INE, (2011). Recenseamento Agrícola 2009, Dados definitivos. Informação à Comunicação Social. Lisboa, Instituto Nacional de Estatística (INE, I.P.), 17 Maio 2011, 13 pp.
- IM, (2009). Instituto de Meteorologia (IM, I.P.). <http://www.meteo.pt>
- IPCC, (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 [AR4]
- Mann H.B.,(1945). Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245-259
- McLeod A.I. ,(2011). Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test. R package version 2.2. <http://CRAN.R-project.org/package=Kendall>
- Pastor M., Castro J., García-Ortiz A., Martínez J., Mateos L., Navarro C., Orgaz F. ,Saavedra M., Vega V. ,(1996). Manejo del olivar com riego por goteo, *Informaciones técnicas N°41/96*, Dirección General de Investigación y formación agraria. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y pesca.
- R Core Team ,(2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Santos F.D., Miranda P. ,(2006). Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II, Gradiva, Lisboa.
- Santos M., Maia J., (2005). Calibração da ETo estimada pelo método de Hargreaves e tina evaporimétrica classe A. Atas do I Congresso Nacional de Rega e Drenagem. Beja. 2005.
- Serralheiro R., Carvalho M., Corte-Real J., Toureiro C., (2010). 1ª Fase do Sistema de Previsão e Gestão de Secas (SPGS) - Relatórios 1 a 4, 2009 e 2010, ICAAM, Universidade de Évora.
- Shahidian S., Serralheiro R., Serrano J., Teixeira J.L., Naim H., Santos F.L., (2012). Hargreaves and Other Reduced-set Methods for Calculating Evapotranspiration. Chapter in Ayse Irmak (editor).

Evapotranspiration – Remote sensing and Modeling. In Tech, January 2012, pp. 59-80. ISBN 978-953-307-808-3.

Teixeira J.L., Pereira L.S. ,(1992). ISAREG, an irrigation scheduling model. ICID Bulletin, 41(2): 29-48

Teixeira J.L. ,(1994). ISAREG – Manual do Utilizador. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa

Vivas E., Silva C., Correia L., Maia R. ,(2010). Definição de unidades de análise para prevenção, avaliação e gestão de situações de seca. Aplicação ao caso da bacia do rio Guadiana. Atas da Conferência 10º Congresso da Água - Marcas d'Água, Algarve, Março de 2010, ISBN 978-972-99991-9-2.