CÁLCULO DAS NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS PELA METODOLOGIA DOS COEFICIENTES CULTURAIS DUAIS: O MODELO SIMDualKc

P. Godinho*, B. Sequeira*, P. Paredes* e L.S. Pereira*

*Centro de Estudos de Engenharia Rural, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal, Fax: +351 21 362 1575; lspereira@isa.utl.pt

Resumo

A programação e condução da rega requerem a disponibilidade de ferramentas de cálculo exactas, fáceis e rápidas de utilizar. Com este objectivo foi desenvolvida a aplicação informática SIMDualKc, que efectua o cálculo da evapotranspiração cultural e a calendarização da rega de acordo com a metodologia dos coeficientes culturais duais (K_{cb} + K_e). O SIMDualKc efectua o balanço hídrico do solo ao nível da parcela, utilizando um passo de tempo diário. Para a validação do modelo foram utilizados dados de ensaios de campo realizados com diferentes culturas e em diversos países, nomeadamente na Ásia central (Usbequistão) e na bacia do Mediterrâneo, incluído Portugal. A validação foi realizada com os dados culturais, edáficos e meteorológicos recolhidos durante as campanhas de rega nas referidas parcelas experimentais, comparando os valores observados e simulados dos teores de água armazenados no solo, através de uma regressão linear forçada à origem. Os resultados apresentam, para todos os casos de estudo, uma boa concordância entre os dados observados e simulados, o que indica que o modelo prediz adequadamente a humidade do solo durante o ciclo de desenvolvimento das culturas e que a evapotranspiração cultural foi bem determinada.

Palavras-chave: Evapotranspiração cultural, coeficientes culturais duais, balanço hídrico do solo, modelos de simulação.

Abstract

Proper irrigation planning and scheduling require the availability of accurate, quick and easy to use tools. The SIMDualKc software application was developed with this purpose to compute crop evapotranspiration and irrigation scheduling using the dual crop coefficient approach (K_{cb} + K_e). SIMDualKc performs the soil water balance at field level, using a daily time step. This model was validated using data from several experimental fields in Portugal and various Mediterranean countries and Central Asia.The validation was performed with crop, soil water field and meteorological data collected in those experimental fields by comparing the observed and simulated soil water content values using a regression through the origin. Results show a good agreement for all studied cases, which indicates that the model adequately predicts soil moisture during the growing season. It could be concluded that crop evapotranspiration

was properly estimated and the model is able to predict crop evapotranspiration and irrigation requirements for planning and environmental studies.

Key words: crop evapotranspiration, dual crop coefficients, irrigation scheduling, soil water balance, simulation models.

1. Introdução

A correcta programação e condução da rega requerem a disponibilidade de ferramentas de cálculo exactas, fáceis e rápidas de utilizar. O modelo SIMDualKc foi desenvolvido tendo em vista o cálculo da evapotranspiração cultural (ET_c) e a calendarização da rega, usando a metodologia dos coeficientes culturais duais (K_{cb} + K_e) proposta por Allen *et al*. (1998, 2005a). Este método considera separadamente a evaporação do solo e a transpiração da cultura, analisando o modo como a água da precipitação e da rega são usadas pelas culturas.

O cálculo da evapotranspiração cultural, utilizando a metodologia dos coeficientes culturais (K_c) médios relativos às várias fases das culturas, fornece resultados satisfatórios para cálculos com diferentes passos temporais, incluindo a estimativa da evapotranspiração diária para a maioria das aplicações (Pereira, 2004). No entanto, para regas de alta-frequência e para culturas com cobertura parcial do solo, assim como para regiões com precipitação frequente, o uso da metodologia dos coeficientes culturais duais permite produzir estimativas da evapotranspiração cultural mais exactas (Allen *et al*., 2005b). De facto, dividir o coeficiente cultural (K_c) nas componentes de evaporação do solo (K_e) e de coeficiente cultural basal (K_{cb}) permite uma melhor percepção das fracções de água, provenientes da precipitação ou da rega, utilizadas pela cultura, assim como avaliar as vantagens de manter uma fracção do solo seca ou a utilização de "*mulches*" para controlar a evaporação do solo (E).

As primeiras aplicações da metodologia dos coeficientes culturais duais proposta por Allen *et al*. (1998), relatadas por Allen (2000), foram à cultura do algodão e outras num estudo desenvolvido na Turquia para a comparação de diversas metodologias do cálculo da evapotranspiração cultural, e por Liu e Pereira (2000), às culturas de trigo e milho na China. Uma outra aplicação de sucesso à cultura de algodão, cultura de cobertura parcial do solo, é relatada por Howell *et al*. (2004), que não só confirmaram a exactidão do método, como o consideram vantajoso na comparação da evapotranspiração cultural entre rega deficitária, rega para a produção máxima e sem rega, ao permitir dividir a evapotranspiração cultural em evaporação do solo e transpiração da cultura. A exactidão das estimativas para culturas com cobertura total do solo foi relatada recentemente por Er-Raki *et al*. (2007) para a cultura do trigo. Outros estudos referem bons resultados na utilização desta metodologia em pomares e culturas com cobertura parcial do solo como sejam os de Goodwin *et al*. (2006) e Paço *et al*. (2006), este último referente a pomares no Oeste de Portugal. Estes estudos confirmam o interesse em dispor de uma ferramenta de confiança que permita a adopção fácil da metodologia dos coeficientes culturais duais.

O objectivo principal do modelo SIMDualKc é desenvolver opções para a calendarização da rega, nomeadamente para culturas com cobertura parcial do solo, especialmente hortícolas e pomares, e/ou para sistemas com regas de alta-frequência como é o caso da microrrega. No presente estudo apresenta-se o modelo e a sua validação para diversas culturas, com cobertura do solo parcial e completa, recorrendo a vários métodos de rega, incluindo a rega por gravidade, a aspersão e a microrrega, usando dados do campo recolhidos em várias regiões do Mediterrâneo e na Ásia Central.

2. Descrição do modelo

Esta aplicação foi desenvolvida em Visual Basic 6.0 e a base de dados em Access 2000, proporcionado uma interface gráfica "*user friendly*" que facilita a análise e a visualização dos resultados. A aplicação foi estruturada segundo uma arquitectura de três camadas (Fig. 1), onde existe uma base de dados, o modelo computacional e a interface gráfica (Rolim *et al*., 2006). A base de dados permite guardar a informação relativa ao solo, cultura, clima, sistema de rega e características da simulação, permitindo construir o campo da simulação.

O módulo computacional foi desenvolvido de modo a permitir uma fácil integração com o modelo WINISAREG (Teixeira e Pereira, 1992; Pereira *et al*., 2003) e com o modelo GISAREG (Fortes *et al*., 2005), por forma a facilitar o uso da metodologia do K_c dual por estes modelos, operando sozinhos ou usando a interface gráfica. Esta função foi concebida usando duas interfaces abstractas: uma que liga o módulo computacional com a interface gráfica ou com um módulo previamente seleccionado e outra que realiza a ligação entre a base de dados e o programa em si (módulos numéricos). Esta ligação é feita através de "*queries*" que permitem a adopção de diferentes bases de dados à estrutura do SIMDualKc.

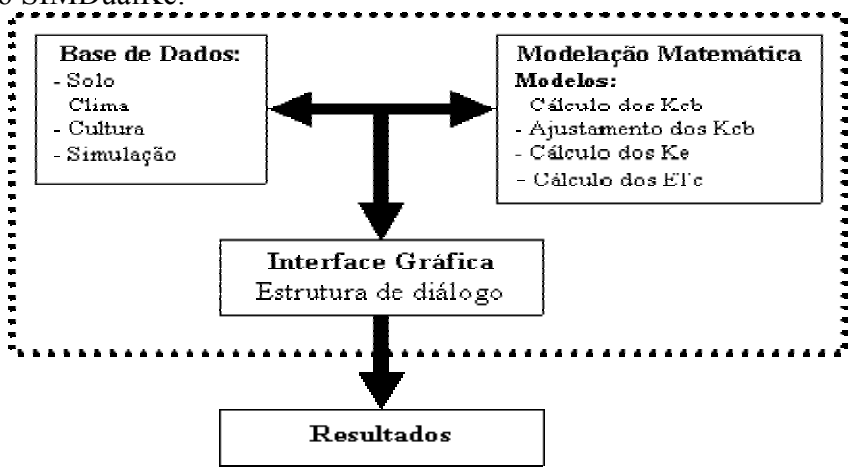

Fig. 1. Estrutura do modelo SIMDualKc.

A estrutura deste modelo, separando o procedimento de cálculo da base de dados, torna a ligação desta aplicação a diferentes bases de dados bastante fácil, incluindo bases de dados georeferenciados como a do sistema HidroGest (Mateus *et al*., 2005).

3. Funcionamento do modelo

Os dados de base são inseridos no modelo, no inicio da simulação através de uma base de dados em MSAccess (Fig. 2) e referem-se a:

- *Dados meteorológicos*: temperaturas mínima, T_{min}, e máxima, T_{max}, diárias, [ºC]; velocidade do vento, u_2 [m s^{-1}]; evapotranspiração de referência, ET_o [mm]; precipitação efectiva, P_e [mm];
- *Dados de cultura*: data de plantação, duração dos diferentes estágios culturais, L [dias]; valores tabelados (ou observados) do coeficiente cultural basal, K_{cb}; comprimento máximo e mínimo da raiz, Z_r [m]; altura da cultura [m]; fracção de solo molhada pela rega, f_w; fracção de solo coberta, f_c; fracção de solo molhado que se encontra exposto há radiação solar, f_{ew}; fracção de esgotamento da água do solo em conforto hídrico, p, e
- *Dados de solo*: profundidade da camada evaporativa, d [mm]; água facilmente evaporável, REW [mm]; água totalmente evaporável, TEW [mm]; total de água disponível, TAW [mm m^{-1}].

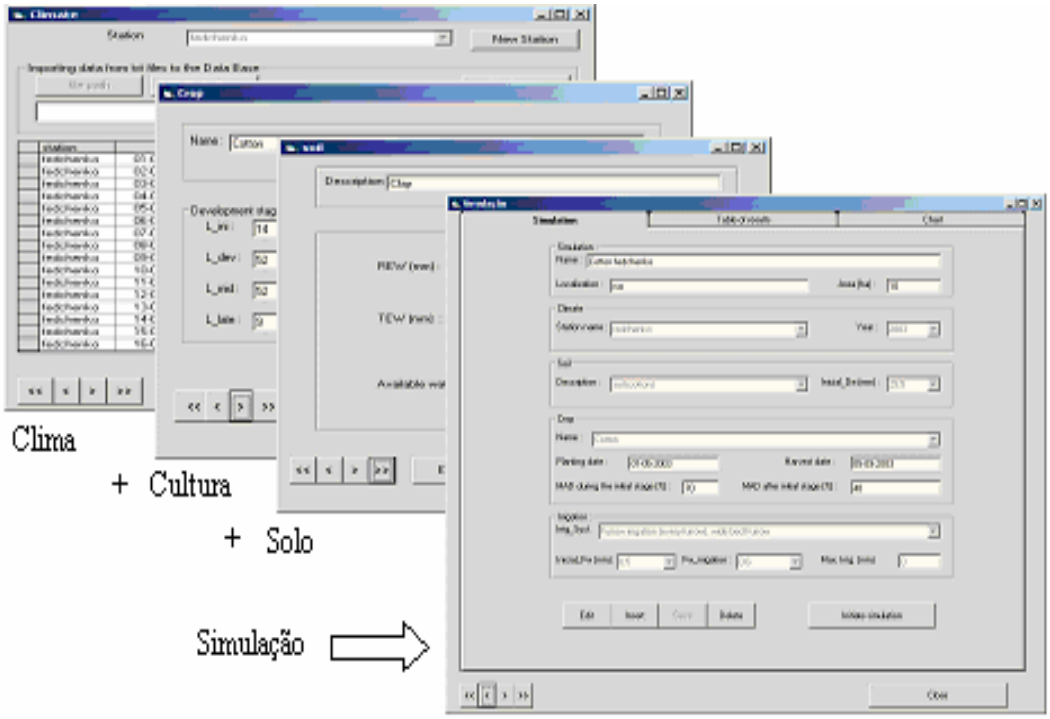

Fig. 2. Sequência de janelas de inserção de dados do modelo referentes ao clima, cultura, solo e gestão da simulação.

Inicialmente o utilizador deverá preencher os dados relativos ao solo e à cultura nas interfaces correspondentes. Esta informação é armazenada na base de dados, ficando disponível para futuras simulações. Num segundo passo, o utilizador deverá importar os dados climáticos diários da região assim como uma descrição da estação climática. Poderá, ainda, escolher entre importar os valores de evapotranspiração de referência, ou efectuar o cálculo utilizando o modelo. Após a inserção dos dados e seleccionando os dados referentes ao solo, cultura, clima e o sistema de rega que irá ser utilizado, pode-se

dar inicio a uma simulação recorrendo à interface de simulação. Os resultados poderão ser visualizados sobre a forma de tabela ou sob a forma gráfica, mostrando a variação do teor de água no solo ao longo do ciclo da cultura (Fig. 3). Os resultados podem ser exportados sob a forma de um ficheiro de texto (.txt), para posterior utilização.

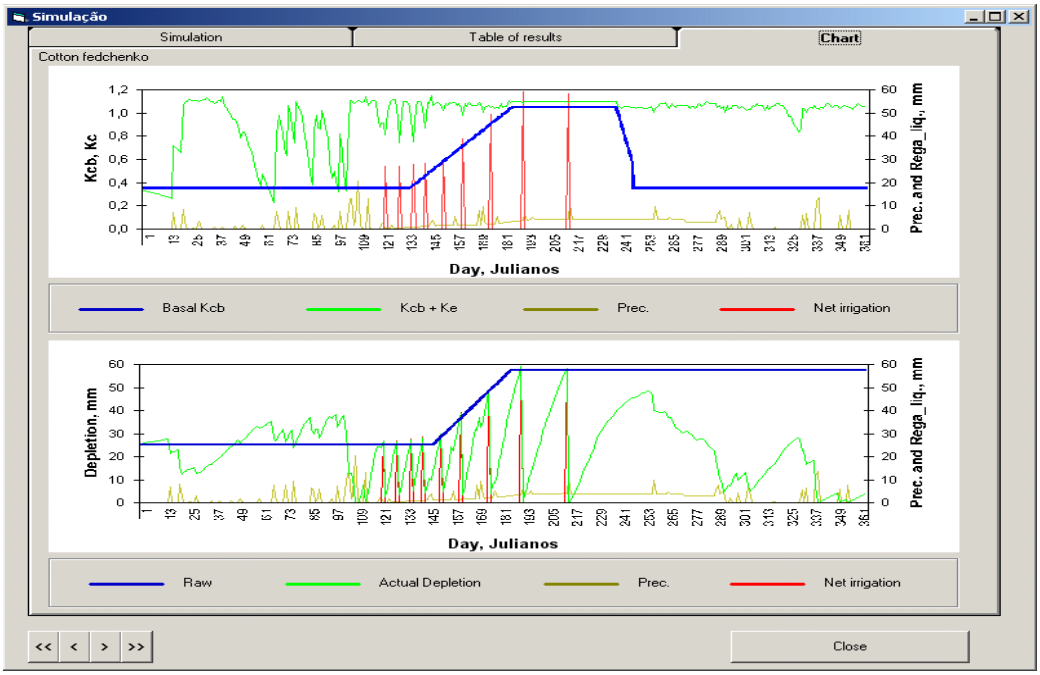

Fig. 3. Janela de apresentação gráfica dos resultados do modelo, mostrando os valores de K_c e a variação de teores de água no solo, para a cultura do algodão em Fergana.

4. Validação do modelo

Este modelo foi validado recorrendo a dados referentes a diversos ensaios de campo na zona do Mediterrâneo (Fig. 4): no Sorraia, Portugal, em milho regado através de rega de superfície com e sem stress hídrico (Fernando, 1993); em Catania, Sicília, Itália, em citrinos regados através de microrrega (Alba *et al*., 2003); em Tel Hadya, Aleppo, Síria, com trigo regado por rega de aspersão (Oweis *et al*., 2003), e em Hendi Zitoun, Tunísia Central, com trigo de Inverno, regado através de rega por sulcos (Zairi *et al*., 2003).

O modelo SimDualKc foi ainda calibrado e validado utilizando dados de campo recolhidos em Fergana Valley, Usbequistão, para as culturas do trigo de Inverno e do algodão, (Cholpankulov *et al*., 2005), utilizando rega por sulcos, com diversos tipos de gestão de rega (Fig. 5).

Nos dados de solo incluem-se as propriedades hidráulicas do solo e os teores de água observados a diferentes profundidades, durante os ciclos culturais. Os dados referentes à cultura incluem as datas de inicio de cada ciclo cultural, a evolução da cobertura do solo e do crescimento das raízes ao longo do desenvolvimento cultural. Para os dados climáticos utilizou-se a estação climática mais próxima dos locais de estudo, calculando-se a evapotranspiração de referência pelo método FAO-Penman-Monteith (Allen *et al*., 1998).

As validações foram efectuadas comparando os teores de água no solo simulados e os observados, utilizando uma regressão forçada à origem.

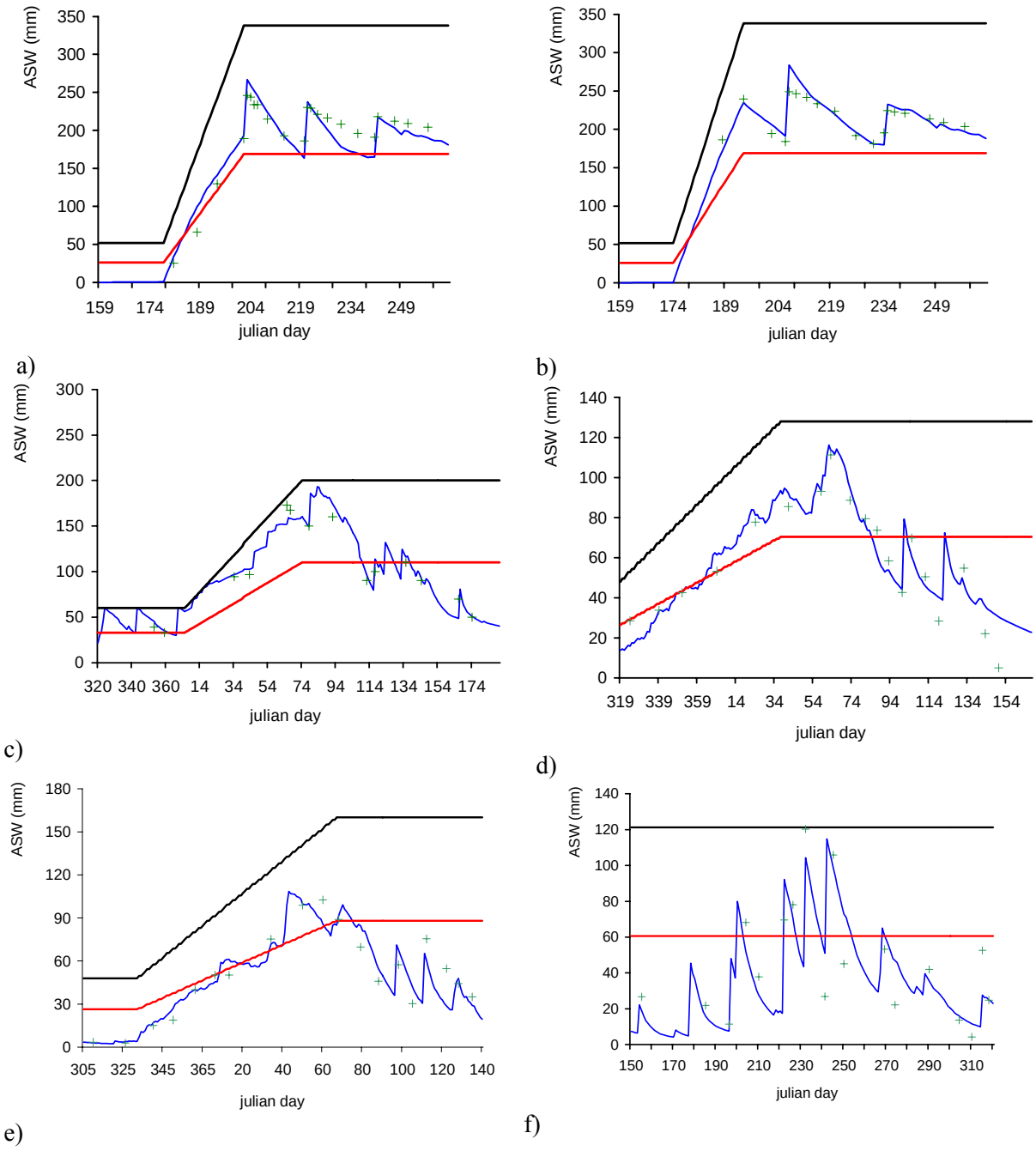

Fig. 4. Comparação entre os valores simulados e observados de teor de água disponível no solo (ASW) na zona do Mediterrâneo: (a) milho no Sorraia com 3 regas; (b) milho no Sorraia com 2 regas; (c) trigo em Hendi Zitoun; (d) trigo em Tel Hadya 1º ano; (e) trigo em Tel Hadya 2º ano e (f) pomar de citrinos em Catania, apresentando-se as curvas dos valores simulados de água disponível no solo e os pontos das observações feitas (+); as linhas representam a água disponível total e o limite de teor de água no solo para que não ocorra stress.

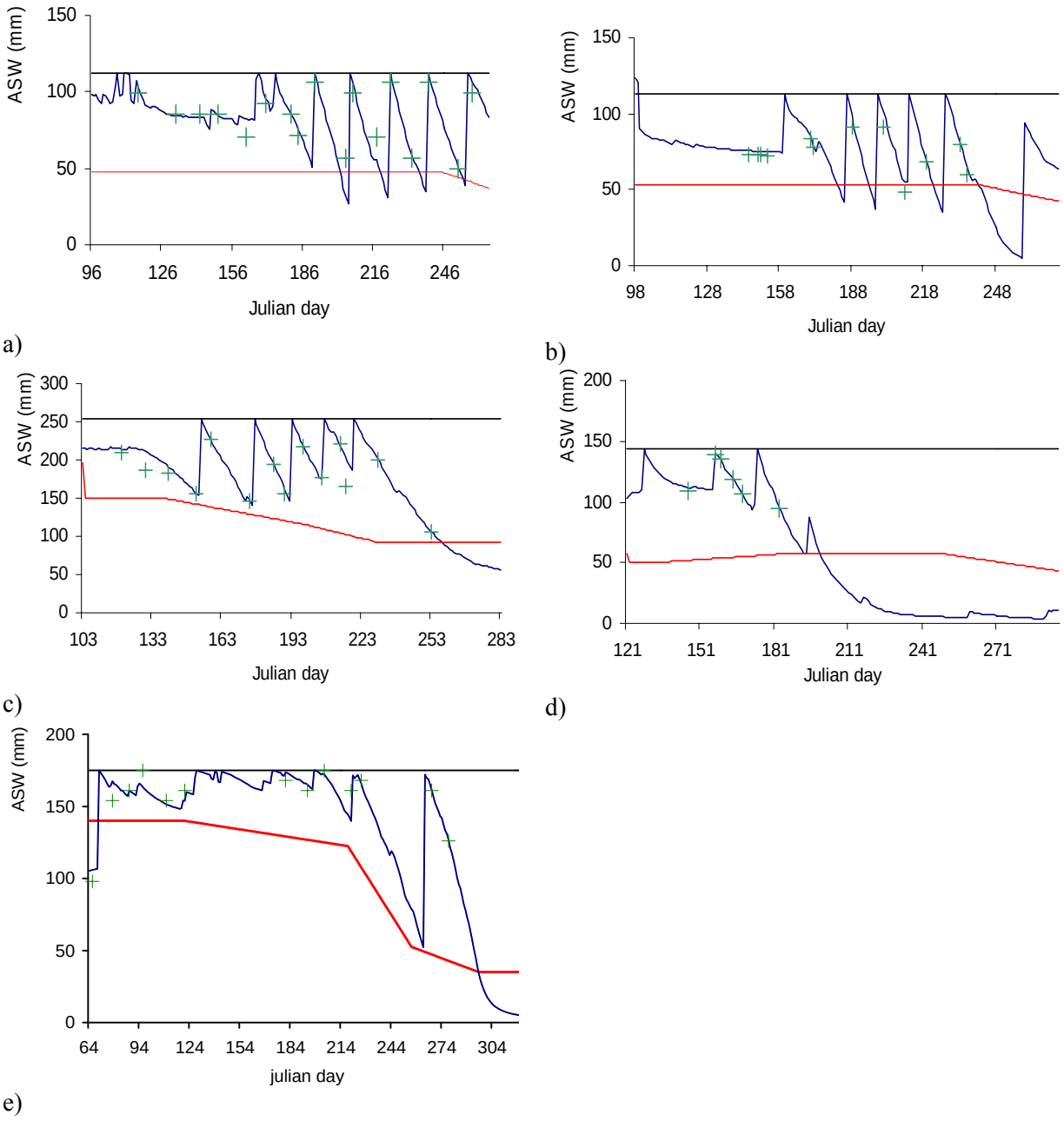

Fig. 5. Comparação entre os valores simulados e observados de teor de água disponível no solo (ASW) na zona da Ásia central: (a) algodão em Fergana, 2003; (b) algodão em Fergana, 2001, Parcela 1; (c) algodão em Fergana, 2001, Parcela 2; (d) algodão em Fedchenko, 2003, e (e) trigo em Fergana, 2001/02, apresentando-se as curvas dos valores simulados de água disponível no solo e os pontos das observações feitas (+); as linhas representam a água disponível total e o limite de teor de água no solo para que não ocorra stress.

5. Discussão de resultados

Os resultados obtidos das comparações entre os valores de água disponível no solo observados e simulados encontram-se sumariados na Tabela 1. Em todos os casos apresentados, o coeficiente de regressão (*b*) é próximo de 1.0, o que indica que o modelo não apresenta tendência para sobre ou subestimar o teor de água no solo. Os

valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos são todos próximos de 0.90, à excepção do pomar de citrinos, onde foram reconhecidos problemas de observação de teor de água no solo.

Para além deste facto, todos os casos estudados apresentavam uma vasta gama de valores de água no solo, o que permite uma melhor avaliação do desempenho do modelo.

Tabela 1. Sumário das comparações entre os valores observados de teor de água no solo e os simulados pelo modelo.

Cultura	Sistema de rega	*b*	R^2
Milho, Coruche, 3 regas	Rega por canteiros	0.99	0.90
Milho, Coruche, 2 regas	Rega por canteiros	1.02	0.85
Trigo, Hendi Zitoun	Rega por sulcos	1.00	0.94
Trigo, Tel Hadya, 1ª ano	Aspersão	1.00	0.82
Trigo, Tel Hadya, 2º ano	Aspersão	0.98	0.87
Citrinos, Catania	Micro-aspersão	0.96	0.75
Algodão, Fergana, 2003	Rega por sulcos	0.98	0.93
Algodão, Fergana, 2001 (Parcela 1)	Rega por sulcos	1.02	0.91
Algodão, Fergana, 2001 (Parcela 2)	Rega por sulcos	0.97	0.88
Algodão, Fedchenko, 2003	Rega por sulcos	1.01	0.93
Trigo, Fergana, 2001-02	Rega por sulcos	0.99	0.80

O uso dos dados obtidos nestes ensaios mostram um largo espectro de condições experimentais que suportam as conclusões apresentadas relativamente à capacidade do modelo de simular o balanço hídrico do solo e, consequentemente, estimar a evapotranspiração cultural, usando o método do coeficiente cultural dual.

Para além da validação do modelo confirmam-se, ainda, os resultados de Allen *et al.* (2005b), que indicam uma maior exactidão no cálculo da evapotranspiração cultural através do método do K_c dual, em detrimento do método dos K_c médios.

6. Conclusões

As simulações efectuadas com o modelo SIMDualKc demonstram uma boa concordância com os dados observados no campo. Os ensaios utilizados para a validação do modelo foram independentes e respeitantes a diversas culturas com gestão de rega diferentes, incluindo a rega deficitária e rega total, e a diferentes solos.

Os resultados obtidos através das diferentes regressões lineares forçadas à origem mostram que, para todos os casos, os coeficientes de regressão têm valores próximos de 1.0, revelando a ausência de tendência do modelo para sobre ou subestimar o teor de água do solo. Os coeficientes de determinação apresentam valores perto de 0.90 para todos os casos, à excepção de um caso de pomar de citrinos, onde foram reconhecidos problemas ao nível da observação dos teores de água no solo.
O modelo demonstra precisão na simulação do balanço hídrico do solo, para todos os estágios culturais, o que indica uma boa estimativa da evapotranspiração cultural usando o método do coeficiente cultural dual.

Futuros desenvolvimentos consistem em acrescentar novas funções para calibração e melhoramento ao nível da interface gráfica, tornando-a mais "*user frendly*".

A integração do modelo com um modelo de cálculo do balanço hídrico em tempo real e com uma plataforma GIS é outra das metas a alcançar num futuro próximo, bem como aproximar o modelo do seu utilizador mais importante: o agricultor.

Agradecimentos

O desenvolvimento do modelo e a sua validação para a bacia do Mediterrâneo, foi financiada pelos projectos POCTI/AGG/42698/2001 "Tecnologias de informação para a poupança de água e melhor desempenho da rega sob pressão" e MIPAIS, MEDOC 2004-04-4.4-1-108.

Bibliografia

Alba, I., Rodrigues, P.N., Pereira, L.S. (2003). Irrigation scheduling simulation for citrus in Sicily to cope with water scarcity. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L. S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (Eds.) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, pp. 223-242.

Allen, R.G. (2000). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. J. Hydrology 229: 27-41.

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 pp.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., Wright, J.L. (2005a). FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. J Irrig. Drain. Engng. 131: 2-13.

Allen, R.G., Clemmens, A.J., Burt, C.M., Solomon, K., O'Halloran, T. (2005b). Prediction Accuracy for Projectwide Evapotranspiration Using Crop Coefficients and Reference Evapotranspiartion. J Irrig. Drain. Engng. 131: 24-36.

Cholpankulov, E.D., Inchenkova, O.P., Paredes, P., Pereira, L.S. (2005). Testing the irrigation scheduling simulation model ISAREG for cotton and winter wheat in Central Asia. In: L.S. Pereira, V.A. Dukhovny, M.G. Horst (eds.) Irrigation Management for Combating Desertification in the Aral Sea Basin. Assessment and Tools. Vita Color Publish. Tashkent, pp. 97-124.

Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., Hadria, R. (2007). Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. Agric. Water Manage. 87: 41–54.

Fernando, R. (1993). Quantificação do balanço hídrico de um solo regado na presença de uma toalha freática. Simulação com o modelo SWATRER. Tese de doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, UTL, Lisboa.

Fortes, P.S., Platonov, A.E., Pereira, L.S. (2005). GISAREG - A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. Agric. Water Manage. 77: 159-179.

Goodwin, I., Whitfield, D.M., Connor, D.J. (2006). Effects of tree size on water use of peach (Prunus persica L. Batsch), Irrig. Sci. 24: 59–68.

Howell, T.A., Evett, R., Tolk, J.A., Schneider, A.D. (2004). Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dryland cotton on the Northern Texas High Plains, J Irrig. Drain. Engng., 130: 277-285

Liu, Y., Pereira, L.S. (2000). Validation of FAO methods for estimating crop coefficients. Transactions of the CSAE, 16 (5): 26-30. (in Chinese)

Mateus, P., Rolim, J., Pereira, L.S. (2005). HidroGest, a GIS application for irrigation projects management and model integration. In: J. Boaventura Cunha and R. Morais (Eds.) Proceedings of the EFITA/WCCA 2005 Joint Conference on Information Technologies in Agriculture, Food and Environment and Computers in Agriculture and Natural Resources, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, DVD, pp. 663-668.

Oweis, T., Rodrigues, P.N., Pereira, L.S. (2003). Simulation of supplemental irrigation strategies for wheat in Near East to cope with water scarcity. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L. S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (Eds.) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, pp. 259-272.

Paço, T.A., Ferreira, M.I., Conceição, N. (2006). Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: Comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach, Agric. Water Manage. 85: 305–313.

Pereira, L.S. (2004). Necessidades de Água e Métodos de Rega. Publ. Europa-América, Lisboa, 313 pp.

Pereira, L.S., Teodoro, P.R., Rodrigues, P.N., Teixeira, J.L. (2003). Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L.S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (Eds.) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, pp. 161-180.

Rolim, J., Godinho, P., Sequeira, B., Rosa, R., Paredes, P, Pereira, L.S. (2006). SIMDualKc, a software tool for water balance simulation based on dual crop coefficient. In: F. Zazueta, J. Xin, S. Ninomiya, G. Schiefer (Eds.) Computers in Agriculture and Natural Resources (Proc. 4th WCCA, Orlando, Florida), ASABE, St. Joseph. MI, pp. 781-786.

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

Zairi, A., El Amami, H., Slatni, A., Pereira, L.S., Rodrigues, P.N., Machado, T. (2003). Coping with drought: deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Central Tunisia. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L.S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (Eds.) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht, pp. 181-201.