

Avaliação de desempenho do modelo ISAREG de simulação de balanço hídrico¹

Carmen Ilse Jobim² e José Antônio Louzada³

Resumo - O modelo ISAREG simula o balanço de água no solo. Seu desempenho nas condições do Planalto Médio do Rio Grande do sul, foi avaliado através da comparação do conteúdo de umidade do solo, obtido na simulação do balanço de água no sistema solo-planta-atmosfera, com os dados medidos por tensiômetros visando validar seu uso para a Região. A avaliação do modelo foi realizada utilizando como cultura de referência uma gramínea perene, adotando os parâmetros edáficos e agrometeorológicos da Embrapa Trigo, de Passo Fundo, RS. Os resultados mostraram o alto potencial de aderência do modelo. De acordo com os indicadores estatísticos obtidos na avaliação, coeficiente de correlação, índice de concordância e de desempenho, o modelo foi classificado como muito bom e pode ser utilizado para simular o balanço hídrico na região do Planalto Médio do RS..

Palavras-chave - ISAREG, tensiometria, umidade do solo.

Performance evaluation of the water balance simulation model ISAREG

Abstract - The ISAREG model simulates the soil water balance. The performance of the model was evaluate in the conditions of the "Planalto Medio" Region, in Rio Grande do Sul State (Brazil). Comparisons among soil water contents estimated by the water balance of the soil-plant-atmosphere system and observed data from tensiometers were performed, in order to validate the model for the Region. A perennial grass was used as reference crop for testing the model, while the soils and meteorological parameters were collected at the "Embrapa Trigo" Center, in Passo Fundo, RS (Brazil). The results showed a high potential adherence among simulated and observed data, so indicating an adequate performance of the model in those conditions. According the statistical indicators obtained from regression analyses, the performance of the ISAREG model was considered as very good and it can be used for the water balance of the "Planalto Medio" Region (RS).

Key words - ISAREG, tensiometry, soil water.

INTRODUÇÃO

O conhecimento de como as plantas utilizam a água do solo e de como respondem aos níveis de armazenagem é obtido a partir do balanço hídrico, na medida em que o consumo de água pelas plantas é um parâmetro importante para a determinação do rendimento e da necessidade hídrica de uma cultura. Assim, o balanço hídrico do solo é uma das formas de determinar este consumo. Segundo Ometto (1981), o balanço hídrico é o cômputo de toda água envolvida no sistema solo-planta-atmosfera. Conforme Reichardt (1996), o balanço hídrico completo no campo, apesar das inúmeras dificuldades e erros técnicos experimentais envolvidos na sua determinação, constitui uma importante forma de subsidiar o manejo da cultura, permitindo medir "in situ" os vários processos que envolvem a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera. O movimento cíclico do balanço hídrico começa com a infiltração da água no solo, continua com seu armazenamento na região do

sistema radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes. Conforme Pereira et al. (1997), o balanço contábil das entradas e saídas de água que ocorrem num volume de solo caracteriza a variação do armazenamento num determinado intervalo de tempo onde o solo representa o reservatório de água. De acordo com os autores, numa situação ideal, as possibilidades de entradas no sistema são: a chuva, o orvalho, o escoamento lateral subterrâneo, a ascensão capilar e a irrigação. As possíveis saídas de água são representadas pela evapotranspiração e a percolação ou drenagem profunda.

Vários métodos têm sido desenvolvidos para quantificar o balanço hídrico visando o planejamento e o gerenciamento das culturas na agricultura irrigada. Eles podem ser classificados, conforme Souza (2001), em modelos pedológicos, baseados na determinação dos teores de água no solo; modelos físicos, que analisam a relação do teor de umidade com a tensão da água no solo;

¹Parte da Tese de Doutorado apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS

²Eng^a Agr^a, Doutora, Pesquisadora da Fepagro Sede/SCT/RS, Rua Gonçalves Dias, 570. Bairro Menino Deus, Porto Alegre, CEP:90130-060, carmen-jobim@fepagro.rs.gov.br

³Eng^o Civil, Doutor, Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, louzada@iph.ufrgs.br

modelos fisiológicos, que relacionam a deficiência hídrica do solo com as reações das plantas; modelos irrigacionistas, que utilizam valores de evapotranspiração determinados por algum método de estimativa, como Penman-Monteith, Thornthwaite, tanque “Classe A” ou outros; e modelos climatológicos, baseados no balanço entre a precipitação e a evapotranspiração da cultura. Atualmente, a ênfase dos balanços hídricos tem sido dada à disponibilidade de água no solo relacionada com os elementos meteorológicos e com o desenvolvimento vegetal. Souza (2001) relata que o balanço hídrico climatológico mais citado na literatura é o modelo desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955). O método fornece como resultado os valores das deficiências e dos excessos hídricos de uma determinada área, em milímetros de água, e tem se mostrado eficiente para definir e programar demandas de irrigação.

Considerando o custo e o tempo necessários em procedimentos experimentais, predições de balanço hídrico vêm sendo satisfatoriamente realizadas através de modelos de simulação (LOUZADA, 2004). Para Pereira et al. (1995), simular significa imitar, reproduzir resultados, aparentar semelhanças, fazer analogias e é prática comum a várias áreas do conhecimento. Na agricultura, a simulação tem sido uma importante ferramenta para a previsão de resultados do manejo de sistemas sob determinadas condições ambientais. À medida que os recursos hídricos estão cada vez mais escassos, as informações sobre os componentes do balanço hídrico de solos sob cultivo são consideradas cruciais para o planejamento da irrigação (JI et al., 2007). A quantificação da variação das necessidades hídricas durante a estação de crescimento é de suprema importância para o manejo da irrigação. A partir do entendimento das relações entre o sistema radicular, a camada de absorção e a hidrologia do solo, o modelo do balanço hídrico pode proporcionar um melhor conhecimento conceitual dos problemas e atuar como uma ferramenta interpretativa para tomada de decisão no manejo da agricultura irrigada (PEREIRA et al., 2002; DAM e FEDDES, 2000).

Várias estratégias para culturas irrigadas têm sido desenvolvidas através de modelos que simulam o balanço hídrico, visando aperfeiçoar o uso da água pelas culturas, evitar perdas de água pela irrigação e melhorar

o desempenho dos sistemas de irrigação (PEREIRA et al., 2003). Modelos de simulação do balanço hídrico são considerados ferramentas importantes para garantir o melhor uso da água, na medida em que todos os elementos do balanço possam ser avaliados, bem como avaliações de longo período possam ser facilmente desenvolvidas (DROOGERS et al., 2000). Ji et al. (2007) consideram que modelos de simulação desempenham um importante papel no cálculo do balanço hídrico, na medida em que os processos físicos envolvidos são conhecidos, podendo ser usados para prever o impacto da irrigação sobre os recursos hídricos disponíveis bem como auxiliar na avaliação de sua viabilidade. Estes modelos podem incluir, além de relações ajustadas de água-rendimento, submodelos de crescimento e rendimento, que avaliam o impacto dos déficits hídricos sobre as culturas. Segundo Pereira et al. (1995), os modelos podem ser, essencialmente, de dois tipos: modelos de simulação do fluxo de água quando o balanço hídrico é computado através dos fluxos de entrada e saída e da retenção da água do solo na zona radicular; e modelos de simulação volumétrica de balanço de água do solo, quando o balanço hídrico é obtido pela simulação dos volumes de água que entram e saem do reservatório do solo num predeterminado intervalo de tempo. Conforme relatam Pereira et al. (1995), os modelos de simulação do fluxo de água do solo são usados quando os fluxos são bem conhecidos ou quando as quantidades de solutos transportados devem ser determinadas. Em geral, estes modelos têm sua base teórica na equação de Richards e requerem uma completa definição das propriedades hidráulicas do solo, descritas, usualmente, pelas equações de Genuchten (GENUCHTEN, 1980), bem como requerem detalhadas características do dossel da cultura e outros parâmetros que influenciam a extração de água pelas raízes. Segundo os autores, estes modelos de fluxo estão associados à simulação de processos e à parametrização de índices complexos de crescimento e de rendimento da cultura, necessitando cuidadosa calibração dos vários parâmetros e da adoção do que denominam ‘auto-calibração’ de muitos outros parâmetros difíceis de serem obtidos a campo. O modelo SWAP (DAM et al., 1997) é um exemplo amplamente aplicado e documentado deste tipo de simulação (LOUZADA, 2004; DROOGERS et al., 2000).

Por outro lado, Pereira et al. (1995) consideram que os modelos volumétricos de balanço hídrico são facilmente parametrizados e requerem apenas a caracterização hidráulica essencial do solo e dados básicos da cultura, além de adotar funções simplificadas da relação água-rendimento para avaliar os efeitos dos déficits hídricos nas reduções do rendimento. Entretanto, os autores reconhecem que estes modelos também necessitam de validação de seus pressupostos antes de sua utilização.

Conforme Paz et al. (1996), no ISAREG, e em modelos do mesmo tipo, o balanço hídrico é baseado no método proposto por Doorenbos e Pruitt (1980) e Doorenbos e Kassan (1980), requerendo dados meteorológicos, edáficos e agronômicos. Nestes modelos, a equação do balanço hídrico considera um prisma quadrado como unidade horizontal de área, cuja altura é ajustada ao crescimento radicular. Assim, o volume do solo que irá expressar a água disponível, poderá permanecer constante, como no caso de pastagem estabelecida, ou variar, quando modelar uma cultura anual. Além disso, a simulação do perfil do solo é desenvolvida em multicamadas, permitindo uma representação razoavelmente precisa dos compartimentos do solo do sistema.

ISAREG é um modelo de simulação do balanço hídrico do solo desenvolvido por Teixeira e Pereira (1992) que, na sua versão mais atual, apresenta-se combinado com outros dois programas, o EVAP56 que calcula a evapotranspiração de referência (ET_0) usando o método de Penman-Monteith e o KCISA para cômputo dos parâmetros da cultura requeridos pela metodologia FAO (ALLEN et al., 1998). As simulações podem ser realizadas para períodos diários, decendiais ou mensais. O modelo simula o balanço da água do solo para a profundidade total da zona radicular efetiva através da equação:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + (P_i + Qr_i + I_n_i + ETa_i + Dp_i + G_i) / (1000z_i)$$

onde: θ_i é umidade volumétrica média do solo na zona radicular, em mm^3 / mm^3 , no dia i e θ_{i-1} , no dia prévio; P_i é a precipitação, em mm, no dia i ; Qr_i é o escoamento superficial, em mm, no dia i ; I_n_i é a lâmina líquida de irrigação, em mm, no dia i ; ETa_i é a evapotranspiração real, em mm, no dia i ; Dp_i é a percolação profunda, em mm, no dia i ; G_i é a contribuição da água subterrânea, em mm, no dia i e z_i é o comprimento radicular, em m, no dia i . A partir de θ_i , o modelo calcula a lâmina líquida de irrigação requerida, I_n_i , quando o limite designado de restrição é atingido. A evapotranspiração máxima foi calculada com base no produto da evapotranspiração de referência, ET_0 , pelo coeficiente de cultura, Kc , conforme ALLEN et al. (1998). A contribuição da água subterrânea, G_i , não foi considerada devido à profundidade do lençol freático do solo ser maior que 6m. O escoamento superficial, Qr_i , foi predito usando o método do Número de Curva (CN) do SCS (Soil Conservation Service), como descrito em Yu et al. (2000).

No cômputo do balanço hídrico, a água do solo disponível para as plantas, R , em mm, está relacionada com três níveis de armazenamento: a zona da água em excesso, θ_s , acima da capacidade de campo, θ_{cc} , correspondente à água gravitacional que não está imediatamente disponível às plantas; a zona de rendimento ótimo, entre a θ_{cc} e o limite ótimo de água do solo, θ_p , onde a água realmente está disponível para a cultura e a zona de déficit hídrico, entre θ_p e o ponto de murcha permanente, θ_{pm} , onde ainda há água disponível para a planta, mas requer um gasto energético maior para sua extração pelas raízes. O tamanho das três zonas do reservatório-solo varia de cultura para cultura, com o estágio de desenvolvimento, a profundidade radicular e a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, expressado pela fração “p” de depleção sem estresse. Entretanto, o tamanho destas zonas depende, principalmente, das características hidráulicas do solo. O limite superior da zona de excesso de água é constante e corresponde ao ponto de saturação, θ_s , considerando a profundidade radicular máxima e resulta na capacidade total de armazenamento de água do solo.

O limite superior da zona de rendimento ótimo, R_{max} , em mm, que corresponde à água total disponível do solo (CAD) à profundidade radicular da cultura considerada (z) é dado por:

$$R_{max} = 1000z (\theta_c - \theta_{pm})$$

O limite inferior da zona de rendimento ótimo (R_{min}) é dado por:

$$R_{min} = (1-p) R_{max}$$

onde “p” é a fração de depleção de água disponível que

dia i ; G_i é a contribuição da água subterrânea, em mm, no dia i e z_i é o comprimento radicular, em m, no dia i . A partir de θ_i , o modelo calcula a lâmina líquida de irrigação requerida, I_n_i , quando o limite designado de restrição é atingido. A evapotranspiração máxima foi calculada com base no produto da evapotranspiração de referência, ET_0 , pelo coeficiente de cultura, Kc , conforme ALLEN et al. (1998). A contribuição da água subterrânea, G_i , não foi considerada devido à profundidade do lençol freático do solo ser maior que 6m. O escoamento superficial, Qr_i , foi predito usando o método do Número de Curva (CN) do SCS (Soil Conservation Service), como descrito em Yu et al. (2000).

No cômputo do balanço hídrico, a água do solo disponível para as plantas, R , em mm, está relacionada com três níveis de armazenamento: a zona da água em excesso, θ_s , acima da capacidade de campo, θ_{cc} , correspondente à água gravitacional que não está imediatamente disponível às plantas; a zona de rendimento ótimo, entre a θ_{cc} e o limite ótimo de água do solo, θ_p , onde a água realmente está disponível para a cultura e a zona de déficit hídrico, entre θ_p e o ponto de murcha permanente, θ_{pm} , onde ainda há água disponível para a planta, mas requer um gasto energético maior para sua extração pelas raízes. O tamanho das três zonas do reservatório-solo varia de cultura para cultura, com o estágio de desenvolvimento, a profundidade radicular e a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, expressado pela fração “p” de depleção sem estresse. Entretanto, o tamanho destas zonas depende, principalmente, das características hidráulicas do solo. O limite superior da zona de excesso de água é constante e corresponde ao ponto de saturação, θ_s , considerando a profundidade radicular máxima e resulta na capacidade total de armazenamento de água do solo.

O limite superior da zona de rendimento ótimo, R_{max} , em mm, que corresponde à água total disponível do solo (CAD) à profundidade radicular da cultura considerada (z) é dado por:

$$R_{max} = 1000z (\theta_c - \theta_{pm})$$

O limite inferior da zona de rendimento ótimo (R_{min}) é dado por:

$$R_{min} = (1-p) R_{max}$$

onde “p” é a fração de depleção de água disponível que

permite evapotranspiração sem causar déficit hídrico na cultura. Este limite inferior da zona de rendimento ótimo define o limite do nível ótimo de água do solo, θ_p , isto é, o mínimo conteúdo de água do solo antes do déficit hídrico da cultura. A diferença entre R_{max} e R_{min} consiste na fração de água do solo realmente disponível ou utilizável, FAD, onde:

$$FAD = (\theta_{cc} - \theta_p) z$$

A zona de estresse é limitada entre R_{min} e $R=0$, onde a reserva disponível de água do solo é nula ao atingir o ponto de murcha permanente, θ_{pm} . Quando a água disponível está na zona de rendimento ótimo, a evapotranspiração real, ET_a , é igual à evapotranspiração máxima, ET_m , sendo:

$$ET_m = KcET_0$$

onde Kc é o coeficiente de cultura e ET_0 é a evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998). Na zona de estresse hídrico, a evapotranspiração real, ET_a , é restringida por $ET_a < ET_m$ porque $R < R_{min}$, isto é, a água disponível está abaixo do limite mínimo de água no solo para evitar o estresse hídrico da cultura. A variação da água disponível, R , não é linear quando $R < R_{min}$, mas segue uma curva parabólica cujo expoente é função de R e ET_m (TEIXEIRA e PEREIRA, 1992). Os dados requeridos pelo modelo para computar o balanço hídrico do solo são armazenados em vários arquivos comandados por um menu principal. Eles referem-se a dados meteorológicos: evapotranspiração de referência e precipitação, em mm, a cada intervalo de tempo para o cálculo do balanço hídrico; temperaturas máxima e mínima, em °C; umidade relativa do ar, em %; radiação solar, em MJ/m²/dia; e velocidade do vento, em m/s, para cálculo da evapotranspiração de referência através da sub-rotina EVAP56; a velocidade do vento e a umidade relativa do ar são usadas também para ajustar o Kc às condições locais de clima com o módulo KCISA. Dados da cultura são: datas dos estádios de desenvolvimento da cultura; coeficiente de cultura; profundidade radicular efetiva, em m; altura do dossel vegetal, em m; fração “p” de depleção da água disponível do solo e fator de resposta do rendimento. Dados do solo, referindo-se a um solo com multicamadas, são: profundidade de cada camada do solo, em m; capacidade total de água disponível de cada camada, em mm, ou o conteúdo de água gravimétrico à capacidade de campo

e no ponto de murcha permanente, em %; densidade do solo de cada camada, em g cm⁻³; profundidade e textura da camada superficial evaporativa do solo que são necessárias para cálculo do Kc do período inicial de desenvolvimento da cultura.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo ISAREG na simulação do balanço hídrico nas condições do Planalto Médio do RS.

MATERIAL E MÉTODOS

O desempenho do modelo ISAREG foi avaliado, comparando conteúdo de umidade do solo, obtido na simulação do balanço de água no sistema solo-planta-atmosfera através do modelo, com os dados medidos por tensiômetros.

A medição do conteúdo de água do solo foi realizada, diariamente, no período de 16 de fevereiro a 31 de março de 2006, na Embrapa Trigo, em solo gramado. Para o monitoramento das tensões, foi utilizada uma bateria de três tensiômetros com vacuômetro, de leitura direta, instalados a 20, 40 e 60 cm de profundidade. As leituras dos tensiômetros em mm Hg foram transformadas para cm de água através da relação:

$$h = (-H * 1033/760)$$

onde h é o potencial matricial da água no solo em cm de água e H é a leitura do tensiômetro em mmHg. Os tensiômetros foram fluxados semanalmente com água destilada.

Para a comparação dos valores simulados através do modelo, os potenciais de pressão medidos foram transformados em umidade volumétrica através da equação apresentada por Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_{res} + (\theta_{sat} - \theta_{res}) / [1 + |\alpha * h|^n]^m$$

onde θ , θ_{res} e θ_{sat} são, respectivamente, a umidade volumétrica, a umidade volumétrica residual e a umidade volumétrica de saturação, em cm³/cm³ e α , m e n são parâmetros, todos apresentados na Tabela 1 e obtidos através do programa computacional RETC (GENUCHTEN, 1991), a partir dos valores da curva característica determinada por Cunha (2003) para o solo da estação meteorológica da Embrapa Trigo, pertencente à unidade de mapeamento Passo Fundo, considerando a equação:

$$m = 1 - 1/n$$

TABELA 1 - Funções analíticas de Genuchten estimadas para o solo da estação meteorológica da Embrapa Trigo

Parâmetro	
Teor de Umidade Residual (q_{res}) (cm^3/cm^3)	0,15499
Teor de Umidade Saturado (q_{sat}) (cm^3/cm^3)	0,49294
a da curva (1/cm)	0,06033
Parâmetro (m) (-)	0,19881
Parâmetro n (-)	1,24822

¹ Fonte: RETC (GENUCHTEN, 1991).

Foram utilizados como parâmetros meteorológicos do modelo os registros meteorológicos diários da estação meteorológica convencional da unidade da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS, latitude 28° 15' S, longitude 52° 24' e altitude 687 m. As variáveis utilizadas foram: radiação solar global em MJ/m²dia, temperaturas máxima e mínima em °C, umidade relativa média do ar em %, velocidade do vento em m/s, medida a 10 m de altura e chuva em mm, ocorridas no período de 16 de fevereiro a 31 de março de 2006.

Os parâmetros edáficos adotados no modelo corresponderam ao solo da estação meteorológica da Embrapa Trigo e pertence à unidade de mapeamento Passo Fundo, atualmente classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico – Lvd 3 (STRECK et al., 2002), relevo ondulado e substrato basalto. Os parâmetros, camadas e profundidade do solo, foram delimitados em função da profundidade máxima dos tensiômetros, enquanto que a textura do solo avaliado foi definida por Câmara (2004). As condições do perfil e as características físicas do solo avaliado, necessárias para a simulação, foram definidas localmente por Cunha (2003) e constam na Tabela 2.

A avaliação foi realizada admitindo uma gramínea perene, cultivada sem irrigação, cujos parâmetros, constantes ao longo do ano, estão apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 - Parâmetros da gramínea perene

Parâmetro	
Profundidade média do sistema radicular (m) ¹	0,30
Coefficiente de cultura ¹	1,0

Fonte: ¹Dam et al. (1997).

A comparação entre os valores estimados e os valores medidos foi realizada, admitindo uma relação

TABELA 2 - Condições do perfil e características físicas do solo da estação meteorológica da Embrapa Trigo

Parâmetro	
Camada	Horizonte A
Profundidade adotada (cm)	60
Textura ¹	29 % areia; 10 % silte; 61 % argila; 4 % MO
Umidade gravimétrica na Capacidade de Campo UG (%) ²	0,27
Umidade gravimétrica no Ponto de Murcha Permanente UG _{pm} (%) ²	0,23
Densidade do solo d_s (g/cm^3) ²	1,35

Fonte: ¹câmara (2004); ² curva de retenção da umidade do solo determinada por Cunha (2003)

linear expressa por:

$$P_i = bO_i$$

onde O_i é cada valor medido, P_i é cada valor estimado, b é o coeficiente de regressão, avaliado pelo teste t para $\beta=1$, conforme Allen et al. (1989). Os valores estimados foram, também, correlacionados com os medidos através dos indicadores estatísticos: *precisão*, dada pelo coeficiente de correlação “ r ” (ALLEN et al., 1989); *exatidão*, através do índice de Willmott “ d ” (WILMOTT, 1982) e *de desempenho* “ c ” (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), obtidos respectivamente através das equações:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2 \sum_{i=1}^N (P_i - P)^2}}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right]$$

$$c = rd$$

Onde O é a média dos valores medidos, P é a média dos valores estimados e N é o número de pares de valores estimados e medidos. A *precisão*, dada pelo coeficiente de correlação, indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média. A *exatidão* relaciona-se com o afastamento dos valores estimados em relação aos observados, variando de zero, para nenhuma concordância, a um, para concordância perfeita. O *desempenho* pode variar de zero a um e é considerado bom a partir de valores acima de 0,66 (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de umidade volumétrica do solo obtidos na simulação do balanço de água no sistema solo-planta-atmosfera, através do modelo ISAREG, em comparação aos valores medidos pelo tensiômetro encontram-se na Tabela 4. Conforme representada na

TABELA 4 - Umidade volumétrica média do solo gramado, em cm^3/cm^3 , relacionada às tensões medidas no tensiômetro ($\vartheta_{\text{Tensiômetro}}$) e simulado pelo modelo ISAREG ($\vartheta_{\text{ISAREG}}$), no período de 16 de fevereiro a 31 de março de 2006, Passo Fundo, RS

DIA	Tensiômetro	ISAREG	DIA	Tensiômetro	ISAREG
1	0,275	0,270	23	0,250	0,234
2	0,252	0,270	24	0,251	0,243
3	0,243	0,261	25	0,247	0,237
4	0,238	0,252	26	0,247	0,234
5	0,237	0,244	27	0,246	0,232
6	0,252	0,240	28	0,245	0,231
7	0,250	0,252	29	0,237	0,231
8	0,248	0,243	30	0,230	0,230
9	0,269	0,238	31	0,228	0,230
10	0,272	0,270	32	0,277	0,230
11	0,263	0,270	33	0,278	0,270
12	0,262	0,270	34	0,288	0,270
13	0,257	0,260	35	0,280	0,270
14	0,285	0,250	36	0,292	0,270
15	0,275	0,270	37	0,294	0,270
16	0,266	0,265	38	0,288	0,270
17	0,271	0,262	39	0,284	0,265
18	0,271	0,270	40	0,281	0,257
19	0,265	0,260	41	0,271	0,248
20	0,260	0,251	42	0,300	0,247
21	0,256	0,241	43	0,288	0,270
22	0,242	0,236	44	0,284	0,261

Figura 1, a regressão linear entre os valores medidos e estimados indicou o alto potencial de aderência do modelo ISAREG.

O valor obtido do coeficiente de regressão, $b=0,9592$, é classificado como altamente significativo pelo teste t para $\beta=1$, indicando que os valores estimados são, estatisticamente, iguais aos medidos, ao nível de significância de 1 %.

O desempenho do modelo ISAREG foi, também, avaliado através dos indicadores estatísticos *precisão*, *exatidão*, e *de desempenho* e o resultado encontra-se discriminado na Tabela 5. De acordo com os cálculos efetuados, o alto coeficiente de correlação obtido indicou o pequeno grau de dispersão dos dados em relação à média; o índice de concordância acima da média indicou a boa exatidão do modelo; o valor do indicador

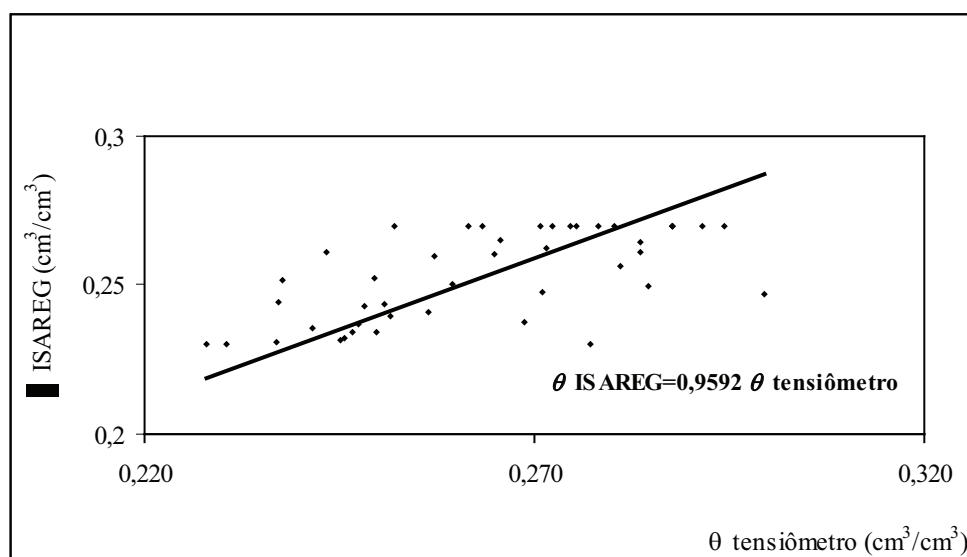


FIGURA 1 - Análise da regressão linear entre os valores da umidade volumétrica do solo gramado, em cm^3/cm^3 , obtidos pelo modelo ISAREG ($\vartheta_{\text{ISAREG}}$) e pelo tensiômetro ($\vartheta_{\text{Tensiômetro}}$), no período de 16 de fevereiro a 31 de março de 2006, Passo Fundo, RS

TABELA 5 - Precisão (r), exatidão (d) e desempenho (c) calculado para a relação entre os valores da umidade volumétrica do solo gramado, simulados pelo modelo ISAREG e medidos no tensiômetro, no período de 16 de fevereiro a 31 de março de 2006, Passo Fundo, RS

Estatística	valor
r	0,9984
d	0,7942
c	0,7929

de desempenho obtido na avaliação classificou o modelo como *muito bom*, conforme a escala proposta por Camargo e Sentelhas (1997).

No entanto, estes resultados foram obtidos para uma variação de umidade bastante estreita, correspondendo a um intervalo de 0,23 a 0,30 cm³/cm³

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; BURMAN, R. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, p.650-662, 1989.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. Irrigation and Drainage, 56.

CÂMARA, R.K. **Influência da Escarificação do Solo sob Sistema de Plantio Direto nas Propriedades do Solo e na Cultura da Soja**. 2004. 96p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Produção Vegetal, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2004.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do Desempenho de Diferentes Métodos de Estimativa da Evapotranspiração Potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CUNHA, G.R. **Curva Característica do Solo da Unidade Embrapa Trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 22 maio 2003. [Comunicação pessoal]. Mensagem recebida por <cjobim@terra.com.br> em 10 fev. 2006.

DAM, J.C. van; FEDDES, R.A. Numerical Simulation of Infiltration, Evaporation and Shallow Groundwater Levels with the Richards Equation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.233, n.1-4, p.72-85, 2000.

PESQ. AGROP. GAÚCHA, PORTO ALEGRE, v.15, n.2, p.91-98, 2009.

de umidade volumétrica, correspondendo às variações observadas durante apenas a estação de verão. Porém, os resultados positivos obtidos, que validam o uso do modelo ISAREG para simulação do balanço de água do solo nas condições avaliadas, confirmam Pereira et al. (2003) que relatam uma bem sucedida aplicação do modelo em várias regiões.

CONCLUSÃO

Nas condições em que foi realizada a avaliação, o modelo ISAREG simulou, satisfatoriamente, o balanço hídrico do solo, validando sua utilização na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul.

DAM, J.C. van; HUYGEN, J.; WESSELING, J. G.; FEDDES, R. A.; KABAT, P.,WALSUM, P. E. V.; GROENENDIJK, P.; DIEPEN, C. A. van. **Theory of SWAP Version 2.0: Simulation of Water Flow, Solute Transport and Plant Growth in the Soil – Water – Atmosphere – Plant Environment**. Wageningen: Wageningen Agricultural University / DLO, 1997. 167p. Disponível em: <http:// and Technology Library, 44.

REICHARDT, K. **Dinâmica da Matéria e da Energia em Ecossistemas**. 2.ed. Piracicaba: ESALQ, Depto. de Física e Meteorologia, 1996. 160p.

SOUZA, J.L.M. de. **Modelo para Análise de Risco Econômico Aplicado ao Planejamento de Projetos de Irrigação para Cultura do Cafeeiro**. 2001. 253p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Unidade Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Área de concentração Irrigação e Drenagem, Piracicaba, 2001. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 05 fev. 2006.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N. ; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2002. 126p.

TEIXEIRA, J.L., PEREIRA, L.S. ISAREG: An Irrigation Scheduling Model. **ICID Bulletin**, New Delhi, v.41, n.2, p.29-48, 1992.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Budget and its Use in Irrigation**. Washington.d.c: ed., 1955. p.346-358. Yearbook of Agriculture.

- WILMOTT, C.J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin American Meteorogogical Society**, Boston, v.63, n.11, p.1309-1313, 1982.
- YU, B.; SOMBATPANIT, S.; ROSE, C. W. Characteristics and Modeling of Runoff Hydrographs for Different Tillage Treatments. **Soil Science Society of America Journal**, Stanford, v.64 n.5, p.1763-1770, 2000. Disponível em: <<http://soil.scijournals.org/>>. Acesso em: 05 fev. 2007.