

USO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR SENSORIAMENTO REMOTO EM UM MODELO AGRO-HIDROLÓGICO

KARENA QUIROZ JIMÉNEZ* ; TIRZAH MOREIRA DE MELO* e JOSÉ ANTÔNIO LOUZADA*

* Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil, karenakiroz@gmail.com; tirzahmelo@hotmail.com; louzada@iph.ufrgs.br.

1 RESUMO

Nos últimos anos, dados de precipitação provenientes de sensoriamento remoto têm se tornado potencialmente úteis para estudos hidrológicos e agrônômicos, ganhando maior importância em regiões onde as variáveis climáticas obtidas por métodos convencionais são limitadas ou inexistentes. Séries de precipitação são variáveis de entrada em modelos agro-hidrológicos que simulam diferentes cenários em áreas agrícolas. Nesse sentido, esse trabalho teve como objetivo comparar os resultados da aplicação do modelo agro-hidrológico SWAP durante os anos 2008 e 2009, utilizando dados de precipitação obtidos por sensoriamento remoto e de forma convencional. Foram realizadas simulações com e sem o cultivo de soja, sendo analisadas as variáveis evaporação, transpiração, interceptação, escoamento superficial e drenagem pela base do perfil do solo. Essas simulações ocorreram em cenários caracterizados pelo solo predominante na sub-bacia do arroio Taboão, inserida na bacia do rio Potiribu, município de Pejuçara, Rio Grande do Sul. As maiores diferenças ocorreram no escoamento superficial e na drenagem pela base do perfil do solo. As estimativas das demais variáveis, mesmo que com diferenças menores, também indicaram que o emprego de uma série de dados pontuais de precipitação obtidos de satélite, a partir de uma resolução de 8 km, transferiu erros significativos aos resultados do balanço hídrico.

Palavras-chaves: modelo SWAP; simulação hidrológica; balanço hídrico.

JIMÉNEZ , K. Q.; MELO, T. M. de; LOUZADA, J. A.

USE OF RAINFALL DATA OBTAINED BY REMOTE SENSING IN AN AGRO-HYDROLOGICAL MODEL

2 ABSTRACT

In the last years, precipitation data obtained from remote sensing have become potentially useful in agricultural and hydrological studies, acquiring greater importance in regions where climatic variables obtained by conventional methods are limited or nonexistent. Precipitation data are input variables for agro-hydrological models that simulate different scenarios in agricultural areas. Thus, this study compares the application results of the agro-hydrological model SWAP during 2 years, 2008 and 2009, using rainfall data obtained by remote sensing and conventional methods. Simulations were performed with and with no

soybean cultivation, and the evaporation, transpiration, interception, runoff and bottom flux variables were evaluated. These simulations occurred in scenarios characterized by the predominant soil in the Taboão sub watershed, located in the Potiribu river watershed, Rio Grande do Sul state, Brazil. Major differences were found in runoff and bottom flux parameters. Estimates of the other variables, even with minor differences, also showed that the use of rainfall point data obtained by satellite at 8-km resolution transferred significant errors to the results of water balance.

Keywords: SWAP model; hydrologic simulation; water balance.

3 INTRODUÇÃO

A estimativa das necessidades hídricas das culturas é uma das principais etapas dos estudos que envolvem o planejamento e posteriormente o manejo dos sistemas de irrigação. Sua quantificação é realizada por meio do balanço hídrico, levando em conta a precipitação, os fluxos no solo e entre o solo e a atmosfera. Questões financeiras relacionadas à implantação e manutenção de estações meteorológicas podem fazer com que os dados de precipitação não estejam disponíveis no local de interesse, ou ainda, apresentem inconsistência ou um número grande de falhas ao longo do tempo. Por esta razão, a utilização de dados pluviométricos originados de sensoriamento remoto tem adquirido grande importância em estudos agro-hidrológicos nos últimos anos.

Os satélites possuem sensores que detectam a radiação eletromagnética refletida e emitida pela superfície da Terra e da atmosfera, a qual é interpretada no espectro eletromagnético em função do comprimento de onda. Após o processamento da radiação (dados brutos) por parte das agências administradoras dos satélites, parte dos dados provenientes do sensoriamento remoto torna-se disponíveis na internet. As variáveis obtidas por satélite são fornecidas em formato espacial tipo *raster* (grade) em diferentes resoluções temporal e espacial.

No caso da precipitação obtida por sensoriamento remoto, existem dois produtos disponibilizados muito utilizados, que são: TMPA (TRMM Multisatellite Precipitation Analysis) (HUFFMAN et al., 2007) e CMORPH (Center Morphing method) (JOYCE et al., 2004). Ambos já foram utilizados como dados de entrada em modelos hidrológicos de grande escala para simulação e previsão (COLLISCHONN et al., 2008, ARAUJO et al., 2007, SU et al., 2008, JIMÉNEZ et al., 2011). Também é importante mencionar o uso de dados obtidos a partir de sensoriamento remoto na estimativa da evapotranspiração real, sendo esta obtida indiretamente a partir do fluxo de calor sensível e observações de dados climáticos por meio de algoritmos de balanço de energia superficial calculados em cada grade. Um algoritmo muito utilizado neste caso é o SEBAL (BASTIAANSEN et al., 2005), o qual estima fluxos de calor latente superficial a partir do albedo, reflectância e temperatura superficiais que atingem os sensores do satélites, tais como MODIS e LANDSAT.

Para aplicações em outorga de água para irrigação e desenvolvimento de calendários agrícolas, a evapotranspiração real e as precipitações obtidas por satélite podem ser muito úteis para estimar o estresse hídrico e avaliar a disponibilidade de água (BASTIAANSEN et al., 2005). Droogers e Bastiaansen (2002) apresentaram resultados de um estudo realizado em uma região do oeste da Turquia com os cultivos de uva e algodão. A técnica do sensoriamento remoto permitiu que valores de índices de área foliar, classes de cultivos e evapotranspiração fossem espacializados. O uso desses mapas melhorou a descrição da

variabilidade espacial dos dados de entrada do modelo SWAP. Além disso, os resultados de evapotranspiração real obtidos pelo modelo SWAP e pelo algoritmo SEBAL foram bastante próximos. Por esta razão, os autores sugeriram que os parâmetros relacionados ao cultivo e ao solo, muitas vezes extraídos da literatura, possam ser obtidos por sensoriamento remoto e aplicados em escala regional.

No Brasil, pode-se citar o trabalho realizado por Ruhoff (2011), o qual utilizou o SEBAL para validar modelos hidrológicos que incluem o balanço hídrico do solo em grandes bacias. Dessa forma, dentre as aplicações citadas, as variáveis obtidas a partir de sensoriamento remoto podem ser úteis como produto final, no caso da evapotranspiração real, e como entrada em modelos agro-hidrológicos, no caso da precipitação.

Na safra 2011/2012, o Estado do Rio Grande do Sul (RS), terceiro maior produtor de soja do país, apresentou uma produtividade média de 2.400 kg ha⁻¹ (CONAB, 2011). No entanto, o nível de tecnologia adotado e a variabilidade climática explicam grande parte das flutuações no rendimento de grãos dessa e de outras das culturas. De acordo com Cunha et al. (2001), a precipitação pluvial foi identificada como a principal variável meteorológica determinante de oscilações no rendimento de grãos de soja no RS.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo verificar a aplicabilidade de dados de precipitação, obtidos a partir de sensoriamento remoto, como entrada do modelo SWAP para o cálculo do balanço hídrico na sub-bacia do arroio Taboão, inserida na bacia do rio Potiribu, localizada no estado do Rio Grande do Sul. A avaliação foi feita através da comparação dos resultados referentes às variáveis transpiração real, evaporação real, interceptação, drenagem pela base do perfil e escoamento superficial obtidos com dados de precipitação registrados em pluviógrafo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo está localizada na sub-bacia do arroio Taboão (Figura 1), que integra a bacia do rio Potiribu, município de Pejuçara, fazendo parte da área compreendida no Projeto Potiribu, desenvolvido desde 1989 pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Esta sub-bacia abrange uma área total de 100 km², possui clima temperado úmido, sem estação seca, caracterizada por precipitação homogênea com média anual de 1700 mm, temperatura média mensal de 14°C em julho e 24°C em janeiro (VIERO, 2004).

A bacia é predominantemente agrícola, sendo 58% da área total destinada a esta finalidade (VIERO, 2004). Os principais cultivos são a soja, milho, aveia e trigo, tendo o plantio direto como sistema de cultivo mais utilizado. Os solos mais representativos da bacia são Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf) e Neossolo Flúvico típico (RY), de texturas muito argilosas a moderadas, apresentando uma inerente resistência à erosão em estado natural devido ao alto grau de flocculação das argilas.

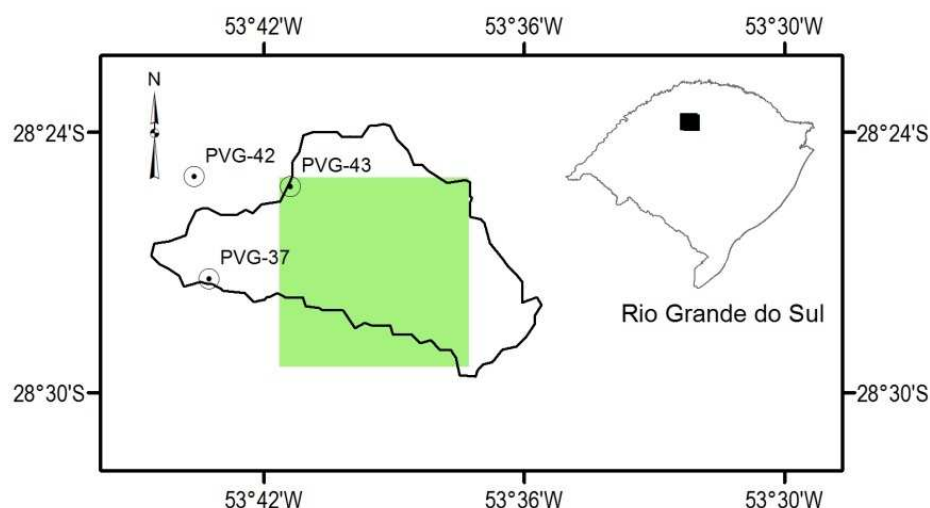


Figura 1. Localização da bacia do arrio Taboão com as estações pluviográficas e a grade que representa a resolução espacial da precipitação de satélite.

Descrição do modelo SWAP

O modelo SWAP (Kroes et al., 2008) é um modelo agro-hidrológico unidimensional que simula o balanço hídrico em uma coluna vertical de solo. A equação de Richards (Eq. 1), resultante da combinação das equações de continuidade e de Darcy, constitui sua base física.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_a(h) \quad (1)$$

onde θ é a umidade do solo ($L^3 L^{-3}$), t é o tempo (T), z é a coordenada vertical (L), $K(h)$ é a condutividade hidráulica não-saturada ($L T^{-1}$), h é o potencial matricial (L) e $S_a(h)$ é o termo que representa a extração de água pelas raízes das plantas (T^{-1}). Na Equação 1 são apresentados unicamente os termos usados nesse trabalho. Sua solução numérica e uma descrição detalhada do modelo podem ser encontradas em Kroes et al. (2008).

Cenários Simulados

Os quatro cenários considerados para as simulações com o modelo SWAP são descritos a seguir: 1) Simulação considerando os dados de precipitação provenientes de uma estação pluviográfica, sem cultivo; 2) Simulação considerando os dados de precipitação provenientes de satélite, sem cultivo; 3) Simulação considerando os dados de precipitação provenientes de uma estação pluviográfica, com cultivo de soja; 4) Simulação considerando os dados de precipitação provenientes de satélite, com cultivo de soja.

Na sequência são apresentados os dados de entrada do modelo relacionados ao clima, solo, à cultura da soja e os índices estatísticos empregados na avaliação dos resultados.

Precipitação

Para utilização do modelo SWAP, duas fontes pontuais de dados de precipitação foram empregadas, uma proveniente de sensoriamento remoto e outra de uma estação pluviográfica convencional. A primeira corresponde ao retângulo de 64 km² e a segunda foi a estação PVG-43, por ser a mais próxima do centro da grade do retângulo, monitorada pelo projeto Potiribu (Figura 1).

Utilizaram-se os produtos CMORPH, com resoluções espacial e temporal de 8 km e 1 hora, respectivamente. Os dados de precipitação foram acumulados entre as 12 horas UTC de dois dias consecutivos para obtenção dos dados diários que alimentaram o modelo SWAP.

Ambas as fontes de precipitação possuíam falhas para a área de estudo, as quais foram preenchidas usando o método de interpolação do inverso do quadrado da distância. Para o preenchimento de falhas da estação PVG-43 foram usados dados de duas estações pluviográficas próximas, PVG-37 e PVG42 (Figura 1). Já no caso do CMORPH, o preenchimento de falhas teve como base a precipitação das grades vizinhas e do pluviógrafo PVG-43. Esse último recurso foi utilizado quando o produto do satélite apresentou falha total (sem chuva no dia). O maior número de falhas do CMORPH ocorreu nos meses de março, abril, outubro e novembro, num total de 45 dias para o ano de 2008 e 7 dias para o ano de 2009, representando apenas 7,1% do período total simulado (731 dias). Em casos como esse o preenchimento de falhas, que é um procedimento de rotina em estudos hidrológicos, além de permitir que a simulação ocorra de forma contínua, não prejudica a avaliação estatística dos resultados.

Na Figura 2, são apresentadas as séries de precipitações mensais acumuladas da estação PVG-43 (PLUV) e do CMORPH (SAT) nos anos de 2008 e 2009, bem como a estimativa da evapotranspiração de referência para o mesmo período. Essa estimativa foi feita a partir de registros em evaporímetro Piché segundo a metodologia apresentada por Fernandes et al. (2011). Observam-se valores mais elevados de precipitação nos últimos meses de 2009 e em outubro de 2008. A evapotranspiração de referência ao longo do ano de 2008 é menor para os meses entre junho e outubro e maior para os meses de novembro e dezembro.

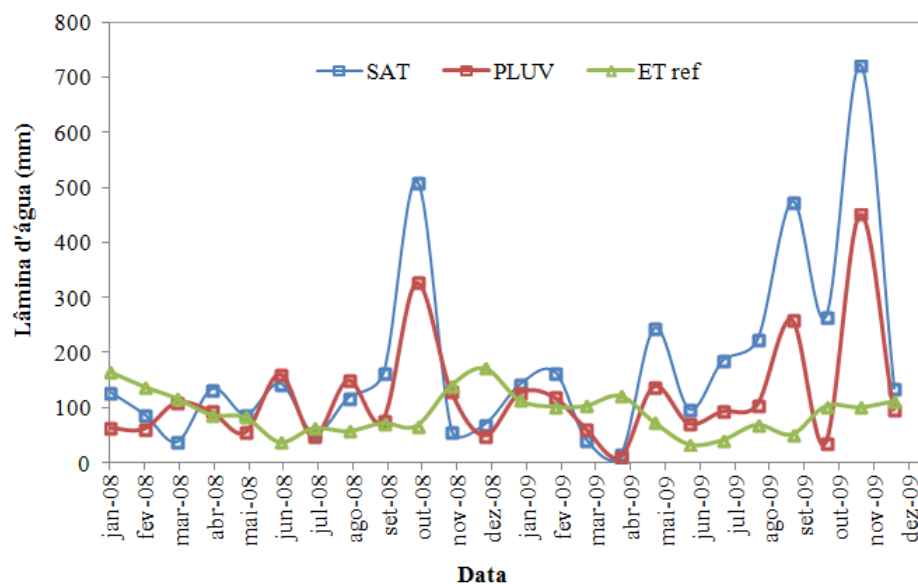


Figura 1. Evapotranspiração de referência e precipitações mensais obtidas por pluviógrafo e por satélite para a área de estudo.

Evapotranspiração de referência e da evaporação potencial

Os valores diários de evapotranspiração de referência (ET_0) foram estimados a partir de registros do evaporímetro de Piché na estação Cruz Alta, Rio Grande do Sul, de acordo com a relação apresentada por Fernandes et al. (2011).

A evaporação potencial do solo descoberto foi estimada através do produto da evapotranspiração de referência por um coeficiente empírico. Esse coeficiente foi admitido igual a 0,5, com base em experimentos conduzidos em lisímetro com o objetivo de determinar os coeficientes das culturas de soja e milho (MATZENAUER et al., 2002).

Parametrização da cultura da soja

Nas simulações com cultura, considerou-se o ciclo da soja no período de 05 de dezembro de 2008 a 19 de maio de 2009 (Tabela 1).

Tabela 1. Dados da cultura da soja.

Período (dias)	Índice de Área Foliar (IAF)	Coefficiente da Cultura (Kc)	Profundidade das Raízes (cm)
0-10	1,47	0,56	30,4
11-45	4,24	1,21	60,8
46-75	3,56	1,50	76,0
76-110	3,45	1,45	91,2
111-125	2,57	1,41	121,6
126-166	2,57	1,41	121,6

Fonte: Boletim FEPAGRO, 2002.

Parametrização do solo

As simulações foram realizadas com base na caracterização física do Latossolo Vermelho distroférico (LVdf). Essa caracterização foi feita através de ensaios de campo e laboratório, dentro dos objetivos do Projeto Potiribu.

Os parâmetros do modelo de van Genuchten (van GENUCHTEN, 1980), que representa a curva de retenção, foram ajustados por meio do aplicativo RETC versão 6.02 (van GENUCHTEN et al., 1991; LEIJ e YATES, 1991) conforme Tabela 2, onde: θ_r e θ_{sat} são as umidades residual e de saturação do solo e n , m e α são parâmetros relacionados à forma da curva. Os parâmetros K_s (condutividade hidráulica saturada) e λ , específicos da função de condutividade (van GENUCHTEN, 1980, MUALEM, 1976), também constam da Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros da curva de retenção e da função de condutividade

Parâmetro	Valor Ajustado
θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	0,00*
θ_{sat} (cm ³ .cm ⁻³)	0,54
n (-)	1,03
α (cm)	0,41
m (-)	0,029**
λ (-)	0,50***
K_s (cm.d ⁻¹)	14,0****

*valor fixado para convergência do ajuste. ** m = 1-(1/n). *** valor sugerido na literatura (MUALEM, 1976). **** obtido em laboratório.

A discretização vertical do perfil, com espessura de 60 cm, adotada na solução numérica da equação de Richards foi estabelecida em 19 compartimentos, sendo os 10 mais superficiais de 1 cm de espessura, os 8 seguintes de 5 cm e 1 compartimento de 10 cm na base do perfil. Como condição de contorno inferior (base do compartimento 19) adotou-se fluxo gravitacional, ou seja, $q=k(h)$. Essa condição, que assume o fluxo vertical na base igual à condutividade hidráulica (k) correspondente ao potencial matricial (h), procurou reproduzir a condição de um solo profundo sem a presença de lençol freático e camadas de impedimento.

Desempenho do modelo

Para avaliação do emprego de dados de precipitação obtidos por sensoriamento remoto no cálculo do balanço hídrico através do modelo SWAP, consideraram-se como valores de referência as variáveis de saída do modelo nas simulações em que foram utilizados os dados de precipitação da estação PVG-43. Os índices estatísticos usados nessa avaliação foram a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o coeficiente de correlação (R) e o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE), cujos valores ótimos são 0, 1 e 1, respectivamente. Esses três índices são representados pelas seguintes expressões:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (3)$$

$$(4)$$

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

onde y_i são os valores das variáveis obtidos com precipitação do posto PVG-43, \hat{y}_i são os valores das variáveis obtidos com precipitação de satélite e \bar{y} e $\hat{\bar{y}}$ são suas médias respectivas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Cenário sem Cultivo

As variáveis de saída do modelo SWAP utilizadas na comparação dos resultados das simulações sem cultivo (Tabela 3) mostram os valores totais acumulados para todo o período simulado (01/01/2008 à 31/12/2009), bem como os valores acumulados das precipitações provenientes do pluviógrafo PVG-43 e do CMORPH, mostrando que o total obtido por sensoriamento remoto é 49% maior do que o registrado no pluviógrafo.

A distribuição temporal dessas variáveis de saída (Figura 3) permitiu observar que o escoamento superficial e a drenagem pela base foram as variáveis para as quais foi transferida a diferença entre as precipitações registrada no pluviógrafo e estimada por sensoriamento remoto.

Tabela 3. Resultados do modelo SWAP e índices de desempenho para as simulações sem cultivo.

Variável (cm)	PLUV ¹ (cm)	CMORPH ² (cm)	RMSE (cm)	COE -	R -
Precipitação	287,55	429,52	3,90	-1,33	0,46
Escoamento sup.	2,75	14,07	62,52	-20,86	-0,0059
Evaporação	55,91	54,95	0,65	0,13	0,52
Drenagem pela base	228,37	359,59	3,50	-1,44	0,60

¹Simulação com dados do pluviógrafo; ²Simulação com dados do CMORPH.

Os índices estatísticos apresentados na Tabela 3 ratificam o comportamento das variáveis identificado na Figura 3, e mostram que as discrepâncias mais acentuadas recaíram no escoamento superficial. Esse comportamento decorre das boas condições de drenagem superficial admitidas nas simulações, condições essas caracterizadas pela declividade acentuada e pela baixa capacidade de armazenamento em depressões superficiais. Quanto à evaporação, os valores totalizados são muito próximos devido à compensação proporcionada por valores diários, ora subestimados, ora superestimados. Isso é confirmado pelo baixo valor de COE.

Esses resultados demonstram que o comportamento identificado nessas simulações pode não se repetir quando da simulação de cenários que difiram do atual pelas condições de escoamento na superfície e na base do perfil.

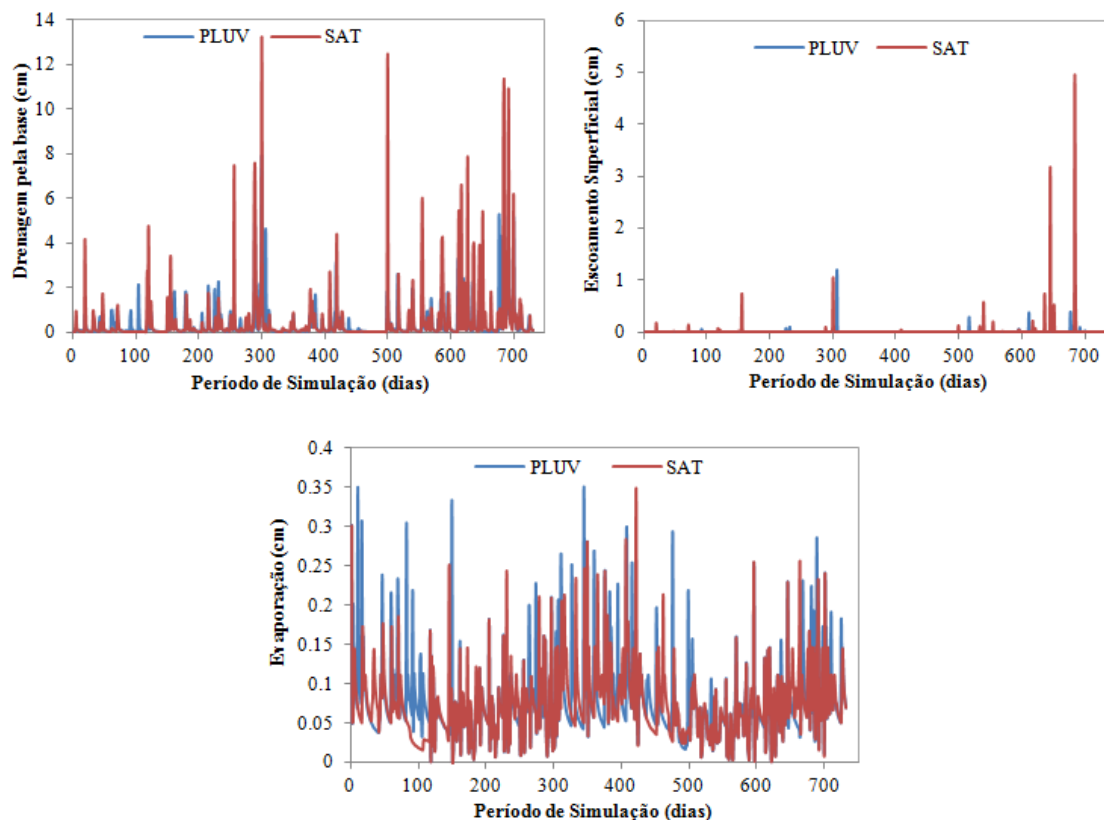


Figura 3. Variáveis de saída do modelo SWAP para simulações sem cultivo. PLUV: dados de chuva de pluviógrafos; SAT: dados de chuva de satélite.

Cenário com Cultivo

As variáveis de saída do modelo SWAP utilizadas na comparação dos resultados das simulações com cultivo são apresentadas na Tabela 4. Os valores correspondem aos totais acumulados para todo o período simulado (01/01/2008 a 31/12/2009) e aparecem juntamente com os índices estatísticos calculados a partir de valores diários. No caso da transpiração e da interceptação, o período total corresponde ao período com cultivo (05/12/2008 a 19/05/2009).

Como as variáveis de escoamento superficial e drenagem pela base apresentaram comportamento muito semelhante ao verificado na simulação sem cultivo, a distribuição temporal das variáveis de saída do modelo (Figura 4), ilustra unicamente o comportamento da interceptação, evaporação e transpiração. Analisando-se os índices estatísticos, percebe-se que a evaporação e a transpiração apresentaram baixos valores de RMSE, e valores aceitáveis de R e COE. No caso da evaporação essa melhoria se deve à sua representação no período com cultivo, quando ocorreram valores inferiores aos potenciais devido às menores umidades verificadas próximo à superfície do solo. Já a transpiração tem um valor ainda menor de RMSE, um valor maior de R e um valor de COE de mesma ordem de grandeza.

Como o armazenamento ao longo da profundidade do sistema radicular mostrou-se pouco sensível à precipitação excedente, os resultados da transpiração ficam justificados por esse comportamento. Os valores de interceptação, apesar de serem muito próximos quando totalizados, têm o índice COE indicando que não houve boa aderência entre os valores diários calculados a partir das duas séries de precipitações.

Tabela 2. Resultados do modelo SWAP e índices de desempenho para as simulações com cultivo.

Variável (cm)	PLUV ¹ (cm)	CMORPH ² (cm)	RMSE (cm)	COE -	R -
Precipitação	287,55	429,52	3,90	-1,33	0,46
Escoamento sup.	2,67	13,94	64,52	-21,33	-0,01
Drenagem pela base	215,56	321,36	3,51	-1,19	0,52
Transpiração	20,17	21,66	0,40	0,35	0,71
Evaporação	45,10	43,46	0,67	0,38	0,66
Interceptação	3,51	3,17	1,58	-0,21	0,42

¹Simulação com dados do pluviógrafo; ²Simulação com dados do CMORPH.

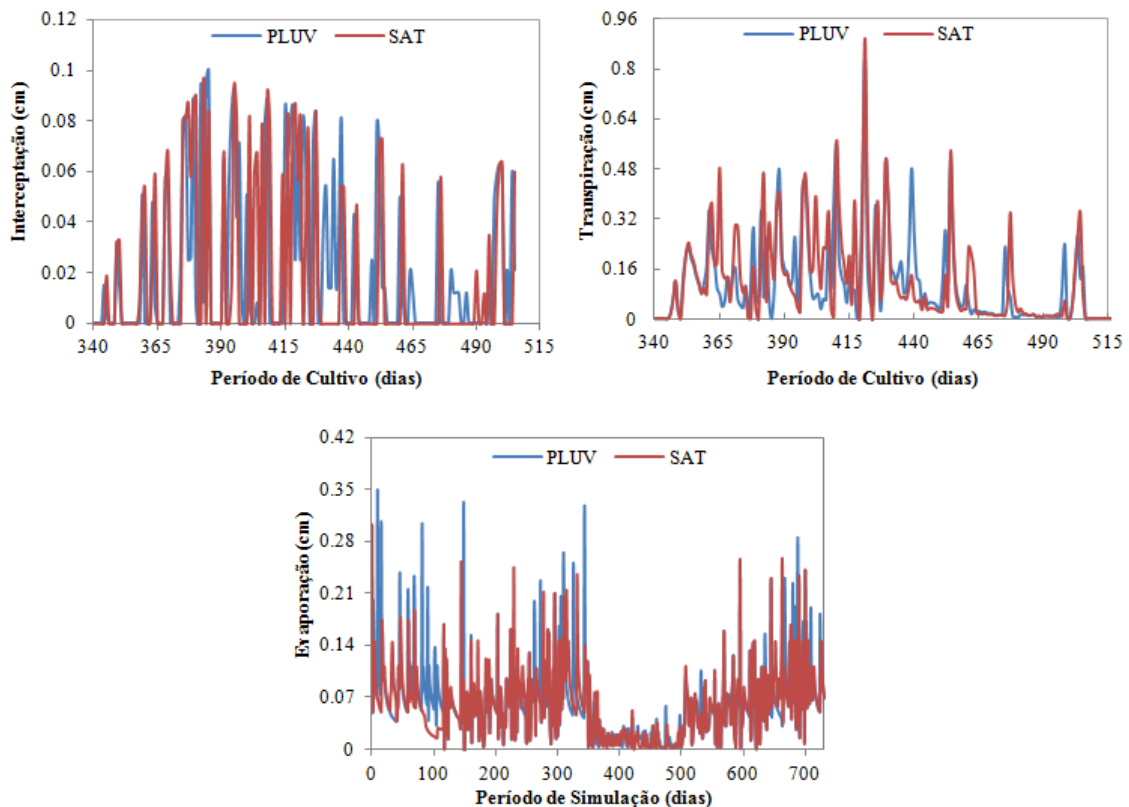


Figura 4. Variáveis de saída do modelo SWAP para as simulações com cultivo de soja. PLUV: dados de chuva de pluviógrafos; SAT: dados de chuva de satélite.

6 CONCLUSÕES

As variáveis que sofreram maiores influências pelo uso de dados de sensoriamento remoto foram o escoamento superficial e a drenagem pela base do perfil fazendo com que os resultados obtidos não fossem satisfatórios. A análise dos índices estatísticos revela que apenas a evaporação e a transpiração na simulação com cultura têm resultados razoáveis.

Essas constatações não devem invalidar a possibilidade do uso de dados de precipitação obtidos a partir de satélites meteorológicos. De uma maneira geral, aplicações em grandes áreas ressaltam a boa representação da variabilidade espacial e os maus resultados pontuais, sugerindo a sua utilização conjunta com dados de radar e convencionais.

Como esse é um trabalho distinto dos citados no que diz respeito à escala de aplicação, acreditasse que novos sensores a bordo dos satélites e novas metodologias de algoritmos para a obtenção de chuva por sensoriamento remoto possam melhorar a estimativa de chuva para escalas mais detalhadas. Só assim serão possíveis conclusões mais definitivas sobre a qualidade dos dados estimados por sensoriamento remoto quando comparados à utilização de dados de postos convencionais localizados fora da área de estudo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, A. N. & GUETTER, A. K. Validação da chuva estimada por satélite “CMORPH” na modelagem hidrológica do Alto Iguaçu. RBRH: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 189-198, 2007.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; HARSHADEEP, N. R. Managing scarce water resources in Asia: The nature of the problem and can remote sensing help? **Irrigation and Drainage Systems**, New York, v.19, p. 269–284, 2005.
- COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 360, n. 1-4, p. 207-216, 2008.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, Quarto levantamento, janeiro 2011. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília : CONAB, 41 p., 2011.
- CONTI, G. N. & MENDES, C.A.B. Sensoriamento remoto para estimativa da precipitação no estado do Rio Grande do Sul. Anais XI SBSR, p. 1153-1160, 2003.
- CUNHA, G. R.; BARNI, N. A.; HAAS, J. C.; MALUF, J. R. T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M.; PIRES, J. L. F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001.
- DROGERS, P.; BASTIAANSEN, W. G. M. Irrigation performance using hydrological and Remote Sensing Modeling. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n.1, p.11-17, 2002.
- FERNANDES, A. L. T.; JÚNIOR, E. F. F.; TAKAY, B. Y. Avaliação do método Penman-Piché para a estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.3, p. 270-276, 2011.
- HUFFMAN, G.; ADLER, R.; BOLVIN, D.; GU, G.; NELKIN, E.; BOWMAN, K.; HONG, Y.; STOCKER, E.; WOLFF, D. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 8, n. 1, p. 38–55, 2007.

JIMÉNEZ, K. Q. Modelización Hidrológica usando estimaciones de lluvia por satélite en la cuenca del río Huallaga, Perú. **Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA**. v. 3, p. 51-62, 2011.

JOYCE, R.J., JANOWIAK, J.E., ARKIN, P.A., XIE, P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 5, n. 3, p. 487-503, 2004.

KROES, J. G.; VAN DAM, J. C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R. F. A.; JACOBS, C. M. J. **SWAP version 3.2. Theory description and user manual**. Wageningen, Alterra, Alterra Report 1649, 262 p., 2008.

LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils: version 1.0**. Riverside: U.S. Salinity Laboratory, 1991. (EPA Report 600/2-91/065).

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A. Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul. **Boletim Fepagro**, Porto Alegre, n. 10, 2002. 105p.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2005. 75 p. (Dissertação de Mestrado).

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, n.3, 513 – 522, 1976.

PINTO, L.I.C.; COSTA, M.H., LIMA, F.Z.; DINIZ, L.M.F.; SEDYAMA, G.C.; PRUSKI, F.F. Comparação de produtos de precipitação para a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, p. 461-472, 2009.

RUHOFF, L. A. Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 180 p., 2011.

SU, F.; HONG, Y.; LETTENMAIER, D. Evaluation of TRMM Multisatellite Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata basin. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 9, n. 4, p. 622-640, 2008.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, 44: 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils: version 1.0**. Riverside: U.S. Salinity Laboratory, 1991. (EPA Report 600/2-91/065).

VIERO, A. C. Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: bacia do Taboão, RS. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 141 p., 2004.