

## Estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto para fins de manejo de irrigação

Célia Maria Paiva<sup>1</sup>  
Rodrigo Yoiti Tsukahara<sup>2</sup>  
Gutemberg Borges França<sup>1</sup>  
Rosilene Mendonça Nicacio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ  
Rua Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco G – CCMN/IGEO – Rio de Janeiro - RJ, Brasil  
celia@lma.ufrj.br/gutemberg@lma.ufrj.br

<sup>2</sup> Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária  
Caixa Postal 1003 - 84165-700 - Castro – PR, Brasil  
rodrigo@fundacaoabc.org.br

<sup>3</sup> Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
rmonicacio@gmail.com

**Abstract.** Improved irrigation water management requires accurate scheduling of irrigations which in turn requires an accurate calculation of daily crop evapotranspiration. Satellite-based remote sensing is a robust, economic and efficient tool for estimating actual ET from irrigated regions and for developing crop coefficient (Kc) curves. MODIS satellite images were analyzed using the SEBAL (surface energy balance algorithm for land) algorithm to quantify spatial variation of crop yield evapotranspiration. SEBAL is a parameterization scheme of surface heat fluxes based on spectral satellite measurements. The study region is located in the City of Piraí do Sul, in the State of Paraná, Southeast region of Brazil, and corresponds to a rural area. The field experiment was carried out in the *Cambará* Farm, during 2008's winter, from June 15 to October 24. At this time, the farm was growing wheat, an usual culture for this period of the year on this region. The total area of the wheat field corresponds to 121 ha. The weather station recorded the data throughout a growing season. The results were encouraging, indicating a good coherence between the evapotranspiration estimated by SEBAL and actual soil water conditions. ET quantified through this procedure may have application in evaluating irrigation/project performance.

**Palavras-chave:** remote sensing, evapotranspiration, agrometeorology, sensoriamento remoto, evapotranspiração, agrometeorologia

### 1. Introdução

A demanda hídrica para a agricultura é um fator crítico. Segundo Christofidis (2001), estima-se que 70% do consumo de água das atividades humanas seja efetivado em práticas agrícolas. Para aumentar a eficiência do processo de absorção de água pelas plantas e desta forma evitar desperdícios no manejo da água fornecida via irrigação, faz-se necessária a correta quantificação da demanda hídrica ao longo do desenvolvimento da cultura. Em cultivos comerciais, os erros sistemáticos na estimativa da evapotranspiração frequentemente resultam na redução significativa dos níveis dos reservatórios de água, que por sua vez impactam sobre o racionamento de água justamente nos períodos de maior demanda hídrica da cultura. No final do ciclo da cultura, o desperdício acumulado de água fornecida através da irrigação pode ser considerado significativo. Adicionalmente, é preciso considerar os volumes de exportação e importação de água virtual. Definindo o conceito de água virtual como o volume de água demandada para produção de determinado bem de consumo (*commodity*), pode-se assumir que, juntamente com as divisas geradas pela exportação desse produto, existe um valor adicional que não é contabilizado, e que pode representar muito mais do que um simples elemento no equilíbrio da balança comercial de determinado país, sobretudo, a sua sustentabilidade ambiental a médio e longo prazo. As estimativas de cálculo para os volumes

de exportação e importação de água virtual consideram parâmetros climáticos da região, tais como a evapotranspiração e as características do produto (Carmo et al., 2005).

O conhecimento exato da evapotranspiração em uma bacia hidrográfica continua sendo uma questão difícil para as pesquisas em hidrologia, recursos hídricos e agricultura. Medições acuradas de vários parâmetros físicos ou do balanço hídrico do solo em lisímetros são requeridos para a determinação da evapotranspiração. Devido às suas características operacionais, esses métodos são inadequados para medidas rotineiras direcionadas ao monitoramento e gestão dos recursos hídricos. Aliado a esse fato, o tamanho das bacias hidrográficas é um problema a mais para a elaboração do balanço hídrico (Mohamed et al., 2004).

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto permite uma determinação espacialmente distribuída da evapotranspiração (Medina et al., 1998). As principais vantagens da obtenção de dados via sensoriamento remoto orbital são a possibilidade de coleta de informações detalhadas para uma extensa área em tempo relativamente curto; e quantificação de parâmetros físicos da superfície terrestre com um fluxo quase contínuo de dados com alta resolução temporal e espacial. Nesse sentido, o desenvolvimento atual do uso de dados de satélites para a determinação da evapotranspiração torna possível o estudo das perdas evaporativas sem a necessidade do cálculo do balanço hídrico. A energia necessária para a evaporação da água é resolvida como um termo residual do balanço de energia à superfície. O balanço de energia descreve as interações físicas na interface superfície-atmosfera.

Bastiaanssen (1995) propôs um algoritmo para a estimativa instantânea das componentes do balanço de energia por sensoriamento remoto, denominado Balanço de Energia para Superfície Continental (*Surface Energy Balance for Land - SEBAL*). O *SEBAL* é constituído, quase que totalmente, por parametrizações físicas bem estabelecidas e pouco complexas. Segundo Bastiaanssen (1995), essas parametrizações foram confrontadas com dados de campo em diferentes partes do mundo, apresentando resultados promissores. Medina et al. (1998) citam que o *SEBAL* requer poucos dados de superfície para seu processamento. Mohamed et al. (2004) mencionam que a utilização do *SEBAL* em bacias hidrográficas pode promover uma otimização no manejo dos recursos hídricos.

O modelo *SEBAL* foi extensivamente aplicado em regiões da Ásia, África, América do Norte e Europa, que possuem diferentes características climáticas, com resultados animadores. Na América do Sul, existem relatos da utilização do *SEBAL* na Argentina e no Brasil. No Brasil, pesquisas com o *SEBAL* começaram a ser desenvolvidas na EMBRAPA Semi-Árido, Universidade Federal do Rio de Janeiro (Paiva et al., 2004; Paiva, 2005) e na Universidade Federal de Campina Grande (Silva e Bezerra, 2004).

Diante da necessidade de avaliação do algoritmo proposto por Bastiaanssen (1995) em regiões com outras aptidões agrícolas e evidente potencial de utilização desta ferramenta, o Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro em parceria técnico-científica com a Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária, viabilizou um projeto de pesquisa com o objetivo de validar a estimativa da evapotranspiração real diária na região de Castro - Pr, financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ). Desta forma, pretendeu-se com este estudo contribuir tanto para o avanço na aplicação do sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração quanto para a transferência de tecnologia e conhecimento para a Fundação ABC, importante difusora de conhecimentos para o setor agropecuário.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1 Caracterização da área de estudo

A definição do local de experimentação baseou-se no critério de tamanho contínuo da área, tanto em comprimento quanto em largura, de modo que esta área tivesse o tamanho mínimo do pixel da imagem do sensor MODIS. Desta forma, o local escolhido foi a Fazenda Cambara, localizada no município de Pirai do Sul, Estado do Paraná, cuja a área total do talhão foi de 121,03 hectares, com ponto central nas coordenadas geográficas iguais a 24° 25'13,86" S e 50° 05'14,37" O. Segundo Koppen, as condições climáticas desta região se enquadram ao tipo climático Cfb, clima temperado, com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C e no mês mais quente abaixo de 22°C, com precipitação média anual entre 1600 mm e 1800 mm.

Este talhão de 121 hectares foi semeado com trigo no dia 15 de junho e colhido no dia 24 de outubro de 2008. Neste local e safra foi praticada a agricultura de sequeiro, ou seja, sem irrigação e, portanto, as condições foram apropriadas para uma avaliação da necessidade da aplicação dessa prática visando o aumento de produtividade.

### 2.2 Dados

Os dados meteorológicos foram coletados através de uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD), programada para registro de informações em intervalo de 30 minutos, durante o período de 04 de julho a 12 de outubro de 2008 (do 20º ao 120º após o plantio). Os dados coletados correspondem as seguintes grandezas: intensidade do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ), temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar (%), radiação solar global ( $\text{Wm}^{-2}$ ), saldo de radiação ( $\text{Wm}^{-2}$ ), fluxo de calor no solo ( $\text{Wm}^{-2}$ ) e precipitação (mm).

As imagens do sensor MODIS foram obtidas durante o período correspondente ao ciclo da cultura de trigo, desde sua emergência até sua colheita. Durante esse período, foram selecionados dias com ausência de nuvens, tendo em vista que o SEBAL só pode ser utilizado nessas condições. Foram selecionados ao todo 10 dias para a aquisição das imagens MOD09GA e MOD11A1 por FTP (<ftp://e4ftl01u.ecs.nasa.gov/MOLT>).



Figura 1 - Plataforma de coleta de dados, composta por sensores de saldo de radiação. Fazenda Cambará, Pirai do Sul – PR.

### 2.3 Estimativa da evapotranspiração real diária via satélite

A estimativa da evapotranspiração real diária via sensoriamento remoto por meio da aplicação do algoritmo SEBAL seguiu as etapas indicadas no fluxograma abaixo (Figura 2):

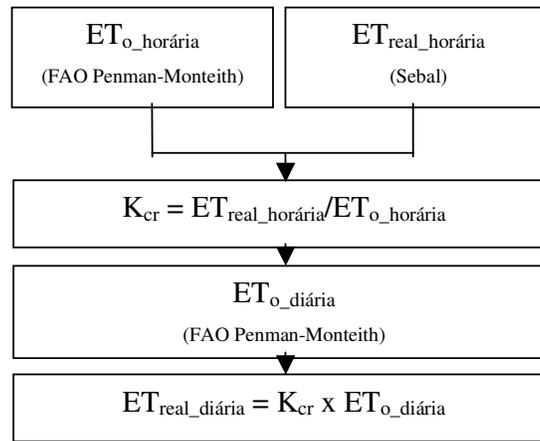


Figura 2 – Etapas da estimativa da evapotranspiração real diária via satélite.

A evapotranspiração de referência em base horária ( $ET_{o\_horária}$ ) foi determinada pelo método FAO-Penman-Monteith, considerado pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) o método mais exato e, portanto, padrão para esse fim.

Para estimar a evapotranspiração real em base horária o modelo SEBAL necessita de informações de sensoriamento remoto e da superfície, a saber:

$T_{ar}$  - temperatura do ar;

$K^{\downarrow}$  - radiação solar global;

$U_{100}$  - velocidade do vento a 100 metros;

$Z_{ref}$  - altura de referência acima de uma fonte ou sumidouro de calor, ao longo da qual existe uma resistência aerodinâmica ao transporte de calor;

$Z_{oh}$  - comprimento da rugosidade aerodinâmica para o transporte de calor.

Por outro lado, as variáveis de saída do modelo são:

$R_l$  - radiação líquida;

$S$  - fluxo de calor no solo;

$H$  - fluxo de calor sensível;

$LE$  - fluxo de calor latente.

Segundo Bastiaanssen (1995), Bastiaanssen e Ali (2003), Bastiaanssen (1998<sup>a</sup>) e Bastiaanssen et al.(1998<sup>b</sup>), em superfícies cultivadas, valores iguais a 3 m e 0,1 m mostraram-se adequados para os parâmetros  $Z_{ref}$  e  $Z_{oh}$ , respectivamente. Esses valores foram adotados neste trabalho. Assim, as informações necessárias para a inicialização do modelo ficam reduzidas a três variáveis de fácil aquisição. A inicialização do modelo Sebal é feita com dados de temperatura do ar, velocidade do vento a 100 metros e radiação solar global, todas medidas localmente.

Pode-se obter o coeficiente  $K_{cr}$  no momento da passagem do satélite através da seguinte expressão:

$$K_{cr} = K_s K_c = ET_{real\_horária} / ET_{o\_horária} \quad (1)$$

onde,

$K_{cr}$ : coeficiente da cultura em condições reais de campo;

$K_s$ : coeficiente de água no solo;

$K_c$ : coeficiente da cultura;

$ET_{real\_horária}$ : evapotranspiração instantânea obtida pelo Sebal e transformada em  $mm\ h^{-1}$ , ou seja, multiplicada por 3600 s.

$ET_{o\_horária}$ : evapotranspiração de referência em base horária obtida pela equação FAO-Penmann-Monteith (Allen et al., 1998).

Uma vez que  $K_{cr}$  pode ser considerado constante para o dia em questão, a evapotranspiração real diária pode, então, ser determinada pela expressão abaixo:

$$ET_{real\_diária} = K_{cr} \times ET_{o\_diária} \quad (2)$$

Os valores de  $K_{cr}$  obtidos via sensoriamento remoto foram interpolados linearmente para todo o ciclo da cultura, considerando-se as informações relativas aos estádios fenológicos e sua duração em dias (Fundação ABC, informação institucional).

### 3. Resultados e Discussão

Na Figura 3 são apresentadas as curvas de  $ET_{c\_FAO\_diária}$ ,  $ET_{real\_diária}$  e  $ADS_{diária}$ , para todo o ciclo da cultura, que representam respectivamente: *i*) a evapotranspiração máxima da cultura determinada com base nos coeficientes de cultura sugeridos por Doorenbos e Kassam (1979); *ii*) a evapotranspiração real da cultura determinada com base no coeficiente da cultura obtido via sensoriamento remoto e interpolação linear; e *iii*) a água disponível no solo determinada com base no balanço hídrico sequencial para fins de irrigação.

Os nove pontos em preto na curva de  $ET_{real\_diária}$  indicam que nesses dias essa grandeza foi determinada com os valores de  $K_{cr}$  obtidos via sensoriamento remoto, enquanto que nos demais dias sua magnitude foi determinada com base nos valores interpolados linearmente a partir dos primeiros. Nesses nove dias, a  $ET_{real\_diária}$  acompanhou o comportamento da curva de  $ET_{c\_FAO\_diária}$ , com exceção do 29º dia após o plantio, quando a  $ET_{real\_diária}$  afastou-se significativamente do comportamento mencionado. Esse fato pode ser explicado pela ocorrência de restrição hídrica nesse dia, quando  $ADS$  foi igual a 0,00 mm. Isso significa que o valor de evapotranspiração estimada pelo SEBAL foi realista e coerente com o esperado, na medida em que responde às condições hídricas reinantes de total ausência de água no solo e não à demanda hídrica que só considera as condições atmosféricas de potencial evaporativo representadas pela  $ET_{c\_FAO\_diária}$ . No 75º dia após o plantio, a evapotranspiração estimada pelo SEBAL foi coerente tanto com a demanda evaporativa quanto com as condições de pouca umidade no solo. O comportamento descrito é evidenciado pelo comportamento da  $ET_{real\_diária}$  que acompanhou a tendência da  $ET_{c\_FAO\_diária}$ , mas não sua magnitude devida à restrição de água no solo. Nos outros sete dias, os valores estimados pelo SEBAL foram realistas e coerentes tanto com a demanda evaporativa quanto com as condições hídricas. Nesses casos, pelo fato de haver água disponível no solo, a evapotranspiração obtida diretamente pelo SEBAL pode responder a demanda hídrica da atmosfera representada pelos valores de  $ET_{c\_FAO\_diária}$ , embora em menor intensidade. Essa menor intensidade pode estar relacionada ao fato de que os valores teóricos de  $K_c$  (Doorenbos e Kassam, 1979) utilizados para a determinação da  $ET_{c\_FAO\_diária}$  precisarem de ajustes afim de representarem melhor as reais condições agrônômicas de campo.

Em relação aos dias em que a  $ET_{real\_diária}$  foi determinada com os valores de  $K_{cr}$  interpolados, observa-se que a  $ET_{real\_diária}$  segue a mesma tendência da  $ET_{c\_FAO\_diária}$  em

comportamento, mas em geral tem magnitude inferior, igualando-se a esta em poucos casos, sendo que a partir do 98º dia após o plantio ocorre uma aproximação contínua entre essas curvas. Esse comportamento coincide com o mencionado anteriormente e pode reforçar que os valores teóricos de  $K_c$  não são totalmente realistas em grande parte do ciclo da cultura, precisando de ajustes para as condições reais de campo.

Em termos quantitativos, o desvio diário entre  $ET_{c\_FAO\_diária}$  e a  $ET_{real\_diária}$  apresentou valores entre 0,00 e 2,17 mm, com valor médio igual a 0,59 mm, correspondendo a 0,00%, 96,95% e 29,39%, respectivamente. Para todo o ciclo da cultura o valor total de  $ET_{c\_FAO}$  e  $ET_{real}$  foram respectivamente iguais a 195,45 mm e 135,99 mm, com um desvio de 59,46 mm (30,42%).

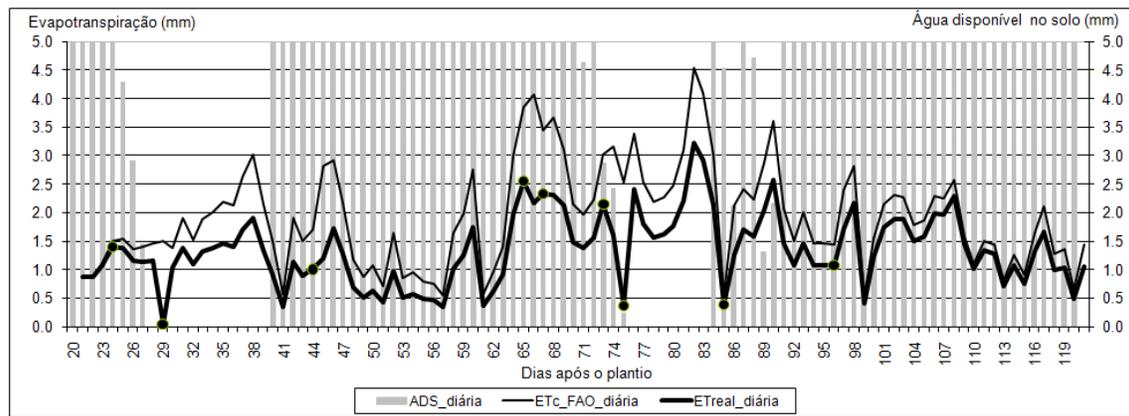


Figura 3 – Água disponível no solo (ADS), evapotranspiração máxima da cultura ( $ET_{c\_FAO}$ ) e evapotranspiração real da cultura ( $ET_r$ ) diárias durante o ciclo da cultura de trigo.

#### 4. Conclusões

Os resultados indicam uma alta coerência em relação às estimativas da evapotranspiração real da cultura obtidas diretamente pelo SEBAL, ou seja, com base nos  $K_{cr}$  obtidos via sensoriamento remoto, tendo em vista que respondem às condições de restrição hídrica. Esse comportamento não é observado em relação à evapotranspiração determinada a partir dos valores de  $K_{cr}$  interpolados, uma vez que somente respondem a demanda hídrica da atmosfera e não as condições hídricas do solo. Esses resultados podem ser explicado pelo fato do  $K_{cr}$  obtido via sensoriamento remoto ser estimado por um algoritmo basicamente físico, enquanto o interpolado é puramente matemático. Nesse sentido, a estimativa via sensoriamento remoto confere à evapotranspiração um caráter físico e realista ausente nas demais formas de se estimar essa grandeza, abordadas neste trabalho, tais como a  $ET_{c\_FAO\_diária}$  e a  $ET_r\_diária$  a partir do  $K_{cr}$  interpolado.

#### Agradecimentos

Agradecemos a FAPERJ pelo apoio a este projeto de pesquisa através dos recursos disponibilizados na modalidade APQ1 e bolsa de IC, a Fundação ABC pela parceria e pela concessão dos dados de superfície, a NASA por disponibilizar gratuitamente os produtos do sensor MODIS e a todos que colaboram direta ou indiretamente para este trabalho.

### Referências Bibliográficas

- Allen, R.G; Pereira, L.S; Raes, D; Smith, M. **Crop evapotranspiration**. Rome: FAO, 1998. 301p.
- Bastiaanssen, W.G.M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. 1995. 273p. Wageningen Agricultural University. Ph.D. Thesis, Wageningen, 1995.
- Bastiaanssen, W.G.M. **Remote Sensing in Water Resources Management: The State of the Art**. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 1998a, 118p.
- Bastiaanssen, W.G.M.; H. Pelgrum, J. Wang; Y. Ma; J.F. Moreno; G.J. Roerink; T. van der Wal. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212 – 213, p. 213 – 229, 1998b.
- Bastiaanssen, W.G.M.; S. Ali. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 94, p. 321-340, 2003.
- Doorenbos, J. & Kassam, A. H. **Yield response to water: Irrigation and Drainage Paper 33**. Rome: FAO, 1979. 193p.
- Carmo, R.L. DO; Ojima, A.L.R.O; Ojima, R.; Nascimento, T.T. DO. Água virtual: o Brasil como grande exportador de recursos hídricos. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 11, 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2005. CD-ROM.
- Christofidis, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. **Revista Item**, n. 49, p. 8-13, 2001.
- Medina, J.L.; E. Camacho; J. Reza, R. López; J. Roldán. Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on Remote Sensing and GIS. **Physical Chem. Earth**, v. 23, n. 4, p. 427-432, 1998
- Mohamed, Y.A.; W.G.M. Bastiaanssen; H.H.G. Savenije. Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. **Journal of Hydrology**, v. 289, p. 145-164, 2004.
- Paiva, C.M.; Liu, W.T.H.; França; G.B., Filho, O.C.R.. Estimativa das componentes do balanço de energia via satélite através do modelo SEBAL. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 08, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2004. CD-ROM.
- Paiva, C.M. Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR. 2005. 218 p. Dissertação de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.
- Silva, B.B.; Bezerra, M.V.C. Determinação da evapotranspiração em escala regional através do SEBAL e de imagens Landsat 5-TM. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 08, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2004. CD-ROM.