

CONSTRUÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL POR SENSORIAMENTO REMOTO USANDO REGRESSÃO LINEAR: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO PRETO –DF

Morris Scherer Warren
Agência Nacional de Águas
[moris@ana.gov.br](mailto:morris@ana.gov.br)

Lineu Neiva Rodrigues
Embrapa Cerrados
lineu@cpac.embrapa.br

RESUMO

Estimativas remotas de evapotranspiração real têm sido utilizadas no monitoramento do balanço hídrico de bacias hidrográficas. Diferentes métodos têm sido empregados para a estimativa da evapotranspiração por sensoriamento remoto, incluindo métodos de bases físicas que utilizam a equação de balanço de energia. Mas o processamento da equação de balanço de energia é complexo e operacionalmente não eficiente. O objetivo do presente artigo é apresentar um procedimento que utiliza regressão linear para estimar a evapotranspiração real em diferentes imagens do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), tornando mais ágil a construção de uma série temporal de evapotranspiração. A utilização de regressão linear, conjuntamente com o emprego da equação de balanço de energia em uma imagem de referência, se mostrou um procedimento viável, com erro máximo de 6% em todas as imagens analisadas.

Palavras-chave: hidrologia, irrigação, MODIS, manejo de bacias hidrográficas.

CONSTRUCTION OF REMOTELY SENSED EVAPOTRANSPIRATION TIME SERIES USING LINEAR REGRESSION: A STUDY OF CASE OF RIVER BASIN OF RIO PRETO - DF

ABSTRACT

Remotely sensed evapotranspiration estimations have been used to monitor the water balance in watersheds. Different methods can be applied to estimate evapotranspiration using remote sensing, including physical methods based on the energy balance equation. But the processing of the energy balance equation is complex and time consuming. The present article presents a procedure to estimate evapotranspiration using linear regression in multiples images of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor, allowing the construction of a temporal series of evapotranspiration in a more efficient way. The utilization of linear regression proved to be an alternative method, allowing to estimate evapotranspiration with a maximum error of 6% in the series of images analysed.

Key-words: hydrology, irrigation, MODIS, watershed management.

INTRODUÇÃO

Para o adequado planejamento e gestão dos recursos hídricos se faz necessário compreender a dinâmica temporal e a distribuição espacial da evapotranspiração real - ET_a (Falkenmark e Rockström, 2005). Estimativas de ET_a são particularmente importantes em aplicações como a modelagem hidrológica, o manejo agrícola e o monitoramento da estiagem agrônômica. Em relação à gestão de recursos hídricos, conforme balizado pelos instrumentos da Lei Federal 9433 (Brasil, 1997), a utilização de uma série temporal de ET_a pode atender as seguintes demandas: (a) monitoramento de estiagem, notadamente a estiagem agrônômica no qual a

Recebido em 18/06/2012
Aprovado para publicação em 02/08/2012

escassez de água no solo afeta a produtividade primária das plantas, sendo um estágio prévio da estiagem hidrológica, com impactos sobre as vazões dos rios e níveis dos reservatórios; (b) estimativa de uso consuntivo em áreas agrícolas e produtividade do uso da água, possibilitando o cotejo com outorgas de recursos hídricos; (c) informação sobre os usos da água em bacias hidrográficas, produtividade do uso da água, separação entre usos produtivos e não produtivos, visando o uso mais racional de recursos hídricos e planos de bacia; (d) balanço hídrico de bacias hidrográficas, incluindo estimativas espacializadas e recentes dos componentes hidrológicos, definição de áreas de recarga e associação do balanço hídrico com aspectos superficiais da bacia hidrográfica, tais como uso da terra.

A obtenção dessa informação para toda a bacia hidrográfica, entretanto, só é economicamente viável por meio de técnicas de sensoramento remoto (Grayson e Blöschl, 2000). Em sensoramento remoto, métodos empíricos e físicos podem ser utilizados para estimar a ET_a (Gowda et al., 2008; Kalman et al., 2008). Os métodos físicos são baseados no balanço de energia, com possibilidade de separação entre a evaporação e a transpiração (Norman et al., 1995).

Os algoritmos TSEB - *Two-Source Energy Balance* (Norman et al., 1995), SEBAL - *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (Bastiaanssen et al., 1998), METRIC - *Mapping EvapTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (Allen et al., 2007) e SEBS - *Surface Energy Balance System* (Su, 2002) utilizam o balanço de energia para obtenção da ET_a por sensoramento remoto, no qual o fluxo de calor latente é a única variável não estimada, mas pode ser obtida pela aplicação da equação de balanço de energia.

A ET_a obtida por satélite constitui uma estimativa instantânea, no horário exato do imageamento, o que dificulta a sua utilização em situações que exigem a estimativa do balanço hídrico. Para contornar este problema, as estimativas instantâneas de ET_a precisam ser extrapoladas temporalmente (horas, dias, semanas, etc); sendo necessário associar a estimativa de satélite com alguma medida realizada de forma contínua sobre a superfície terrestre, como as medidas obtidas em uma estação meteorológica ou em experimentos agro-meteorológicos (Chavéz et al., 2008).

Para a realidade brasileira, os dados monitorados continuamente disponíveis para a construção da série temporal de ET_a são aqueles encontrados em estações meteorológicas, incluindo a temperatura do ar, a velocidade do vento, a umidade relativa do ar e a radiação solar global. Allen et al. (2007) propõem a utilização da fração da evapotranspiração de referência (ET_{ref}) para a extrapolação temporal da ET_a , obtida pela razão entre a evapotranspiração real estimada em cada pixel da imagem e a medida em uma estação meteorológica por meio da equação FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Para estimar a ET_{ref} é necessário desenvolver a equação de balanço de energia para cada imagem, sendo, portanto, complicado do ponto de vista operacional quando o número de imagens processadas é elevado, como na construção de uma série temporal de ET_a . Dessa forma, o objetivo do presente artigo é apresentar e aplicar um procedimento que utiliza regressão linear para estimar a ET_{ref} em diferentes imagens, tornando mais ágil a construção de uma série temporal de ET_a .

MATERIAL E MÉTODOS

Área de trabalho

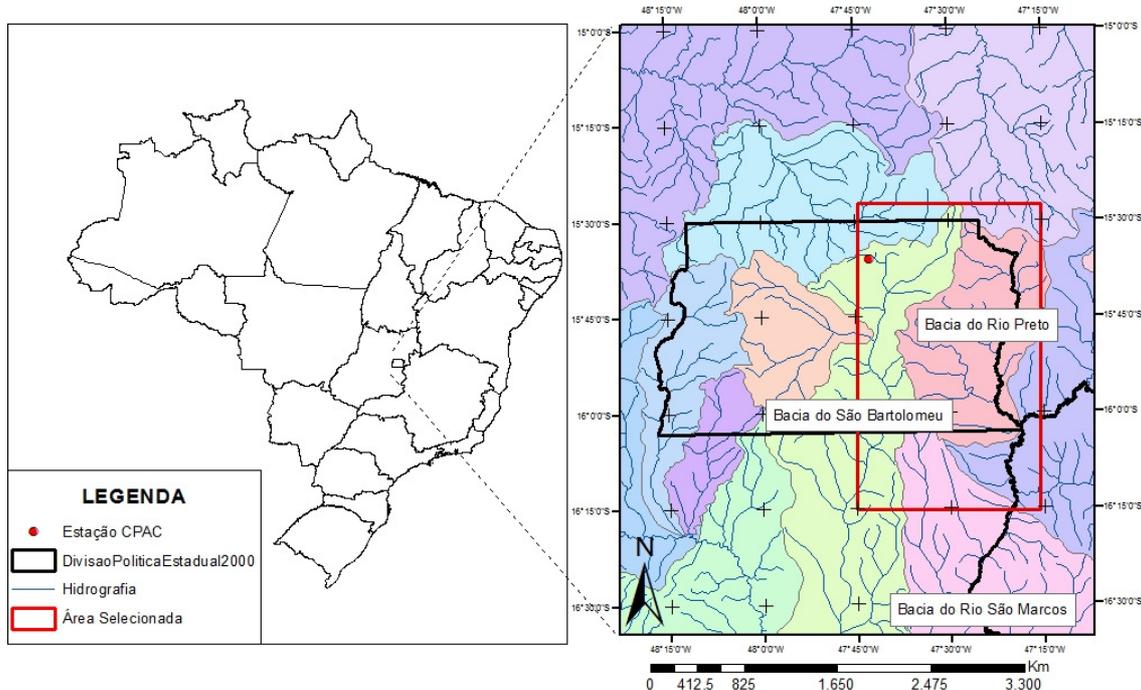
Os procedimentos descritos neste artigo foram integralmente desenvolvidos e validados em uma porção a leste do Distrito Federal e entorno. A figura 1 mostra os limites da área de estudo (polígono vermelho). A maior parte da área de estudo está localizada na Bacia do Rio Preto dentro dos limites do Distrito Federal, estende-se à oeste, em direção a Bacia São Bartolomeu, à leste na porção da Bacia do Rio Preto situada no município de Formosa – GO e ao sul englobando a parte superior da Bacia do Rio São Marcos.

A área apresenta um clima tropical de altitude, com duas estações bem definidas, uma úmida e chuvosa (outubro a abril) e outra seca (maio a setembro). O índice pluviométrico médio é de 1200 mm/ano na Bacia do Rio Preto, estando principalmente concentrado na estação chuvosa.

A Bacia do Rio Preto – DF está situada no centro da área de estudo. O uso do solo na bacia é basicamente agropecuário, com pouca ocorrência de áreas de Cerrado e matas galerias.

Destaca-se na bacia a agricultura irrigada, responsável por cerca de 80% da produção agrícola do Distrito Federal, sendo realizada a irrigação por pivô central com água captada diretamente dos cursos d'água ou pequenas barragens. Esse processo de retenção e armazenamento em barragens garante o fornecimento contínuo de água durante a época seca (Rodrigues et al., 2007). Dessa forma, mesmo nos meses mais secos é possível encontrar pivôs de irrigação com vegetação verde e bem desenvolvida com altas taxas de evapotranspiração.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. (adaptado de IBGE, 2010).



MATERIAIS

Imagens de satélite

Para a estimativa da ET_{ref} foi utilizado o sensor MODIS, sendo doze imagens selecionadas, em um período de 3 meses no ano de 2005 (Tabela 1). Para os produtos MODIS foi utilizada a *Warehouse Inventory Search Tool* (WIST), ferramenta de consulta e aquisição baseada na web. As imagens foram recortadas utilizando os limites da área de interesse.

Tabela 1- Data das imagens usadas na construção da série temporal de ET_a .

Data de imageamento	Dia juliano	Satélite	Ângulo zenital (graus)
13/06/2005	164	TERRA	4,18
15/06/2005	166	TERRA	23,58
01/07/2005	182	TERRA	23,13
06/07/2005	187	TERRA	18,58
22/07/2005	203	TERRA	18,67
24/07/2005	205	TERRA	9,66
27/07/2005	208	AQUA	23,74
18/08/2005	230	TERRA	23,13
23/08/2005	235	TERRA	18,58
01/09/2005	244	TERRA	4,46
10/09/2005	253	TERRA	10,47
17/09/2005	260	TERRA	4,07

Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados para obtenção da série temporal de ET_a foram obtidos da estação meteorológica da Embrapa Cerrados, situada no município de Planaltina – DF, situada na porção norte da área de trabalho (Figura 1). Os seguintes dados foram adquiridos na escala horária para todo o ano de 2005: radiação solar; velocidade e direção do vento a dois metros de altura; temperatura e umidade relativa do ar a dois metros de altura; e precipitação.

Softwares utilizados

Para o processamento das imagens de satélite e cálculo da evapotranspiração de referência foram utilizados os softwares ERDAS Imagine (GMBH GEOSYSTEMS, 2009) e RefET (Allen, 2011), respectivamente.

METODOLOGIA

A construção da série temporal de ET_a requer o desenvolvimento do balanço de energia em múltiplas imagens e sua subsequente interpolação temporal. Para facilitar o processo de construção da série temporal de ET_a é proposto a utilização de regressão linear. A partir de uma imagem de referência foram obtidos os coeficientes de regressão entre (1) a variável dependente: fração da evapotranspiração de referência ($ET_{ref}F = ET_a/ET_{ref}$) e (2) as variáveis independentes: NDVI, albedo e a fração da temperatura mínima. Esses coeficientes obtidos em uma imagem de referência foram aplicados às demais imagens, sendo posteriormente comparadas as séries temporais construídas usando os métodos de balanço de energia e de regressão linear.

Para a imagem de referência foi selecionada a data de 13 de junho de 2005, correspondente ao início do período considerado para a construção da série temporal de ET_a .

Estimativa da $ET_{ref}F$ em uma imagem de referência usando a equação de balanço de energia

A ET_a foi calculada na imagem de referência usando o modelo METRIC (Allen et al., 2007). O fluxo de calor latente ($W m^{-2}$) no METRIC, que representa a energia utilizada no processo de evapotranspiração, é obtido pela equação de balanço de energia uma vez conhecidos o fluxo de calor sensível, o fluxo de calor no solo e o saldo de radiação:

$$\lambda ET = R_n - G_0 - H \quad (1)$$

em que λET = fluxo de calor latente ($W m^{-2}$); R_n = saldo de radiação ($W m^{-2}$); G = fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); H = fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$).

Em relação a proposta original de Allen et al. (2007), as únicas alterações feitas foram a utilização dos produtos de temperatura e radiância do MODIS. Os produtos MODIS utilizados foram o MOD11-L2 e o MOD01HKM. O MOD11-L2 é o produto de temperatura/emissividade gerado diariamente com resolução de 1 km a partir da aplicação do algoritmo "Split Window" (Wan e Dozier, 1996). O MOD01HKM é o produto diário de radiância corrigida, tendo resolução espacial de 500 metros. Nesse último caso, os valores de radiância foram transformados para reflectância de superfície e albedo de acordo com a proposta de Tasumi et al. (2008). O detalhamento do modelo METRIC está disponível em Allen et al. (2007).

A fração da evapotranspiração ($ET_{ref}F$) foi obtida para a imagem de referência utilizando-se a equação:

$$ET_{ref}F = ET_a/ET_{ref} \quad (2)$$

em que $ET_{ref}F$ = a fração da evapotranspiração; ET_a = evapotranspiração real obtida por sensoriamento remoto, $mm dia^{-1}$; ET_{ref} = evapotranspiração obtida em uma estação meteorológica, $mm dia^{-1}$.

Estimativa da $ET_{ref}F$ usando regressão linear

A $ET_{ref}F$, inicialmente estimada em uma imagem MODIS de referência usando o METRIC, foi correlacionada por meio de regressão linear com os parâmetros albedo, NDVI e FT_s , sendo esse último parâmetro a razão entre a temperatura superficial observada no pixel (T_s) e a mínima temperatura encontrada na imagem de referência ($T_{s,min}$):

$$FT_s = T_s/T_{s;\min} \quad (3)$$

$$(ET_{ref}F)_{ref} = a (NDVI)_{ref} + b (\alpha)_{ref} + c (FT_s)_{ref} \quad (4)$$

em que $(ET_{ref}F)_{ref}$ = fração da evapotranspiração de referência (estação meteorológica) dos pixels de uma imagem selecionada como referência para obtenção dos parâmetros de regressão; $(NDVI)_{ref}$ = índice de vegetação por diferença normalizada dos pixels da imagem de referência; $(\alpha)_{ref}$ = albedo dos pixels da imagem de referência; $(FT_s)_{ref}$ = fração da temperatura mínima dos pixels da imagem de referência.

A fração FT_s foi utilizada em detrimento da temperatura superficial, pois essa varia significativamente em função das condições meteorológicas (ex. a radiação incidente sobre a superfície). Os coeficientes de regressão obtidos da imagem MODIS de referência foram aplicados para estimar a $ET_{ref}F$ nas demais datas:

$$(ET_{ref}F)_i = a NDVI_i + b \alpha_i + c FT_{s;i} \quad (5)$$

em que $(ET_{ref}F)_i$ = fração da evapotranspiração de referência dos pixels de uma imagem selecionada no dia “i”; $(NDVI)_i$ = índice de vegetação por diferença normalizada dos pixels da imagem selecionada no dia “i”; $(\alpha)_i$ = albedo dos pixels da imagem selecionada no dia “i”; $(FT_s)_i$ = fração da temperatura mínima dos pixels da imagem selecionada no dia “i”; a, b e c = parâmetros de regressão obtidas da equação 4.

Avaliação da $ET_{ref}F$ usando regressão linear

A $ET_{ref}F$ estimada por regressão linear foi comparada com a $ET_{ref}F$ estimada por meio do balanço de energia em todas as imagens utilizadas na construção da série temporal de ET_a . O propósito dessa comparação foi avaliar em que medida a $ET_{ref}F$ obtida por regressão linear pode ser utilizada em detrimento da perspectiva mais complexa baseada na equação de balanço de energia, potencialmente tornando mais ágil o procedimento de construção da série temporal de ET_a .

As $ET_{ref}F$ das imagens MODIS, obtidas pela aplicação dos coeficientes da regressão linear, foram utilizadas na simulação da curva temporal de $ET_{ref}F$ de feijão em cinco pivôs centrais. Isso foi feito por meio da aplicação de um polinômio de terceiro grau a partir dos valores da $ET_{ref}F$. As curvas obtidas remotamente pelo balanço de energia e por regressão linear foram comparadas.

Por fim, os valores de ET_a foram integrados temporalmente na área de estudo entre os meses de maio a setembro de 2005. Para calcular a evapotranspiração diária em cada pixel da imagem (Eq. 6), os valores instantâneos da $ET_{ref}F$ foram considerados constantes na escala diária e multiplicados pela evapotranspiração medida em uma estação meteorológica durante o período de 24 horas.

$$(ET_{24})_i = (ET_{ref}F)_i (ET_{r_24})_i \quad (6)$$

em que $(ET_{24})_i$ = estimativa diária da evapotranspiração em cada pixel da imagem no dia “i”; $(ET_{ref}F)_i$ = fração da evapotranspiração de referência obtida no dia “i”; $(ET_{r_24})_i$ = evapotranspiração medida em uma estação meteorológica de referência durante 24 horas no dia “i”.

A evapotranspiração do período foi obtida pela equação

$$ET_{período} = \sum_{i=m}^n (ET_{24})_i \quad (7)$$

em que $ET_{período}$ = evapotranspiração de cada pixel da imagem em um determinado período; $(ET_{24})_i$ = estimativa diária da evapotranspiração em cada pixel da imagem no dia “i”.

A análise visual da evapotranspiração integrada temporalmente foi utilizada para constatar do ponto de vista qualitativo a capacidade do procedimento proposto em relação à identificação de pivôs de irrigação com diferentes níveis de consumo de água.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 apresenta-se o resultado da análise de regressão entre a $ET_{ref}F$ e o NDVI e entre o albedo e a FT_s . Pode-se observar, nessa tabela, um alto valor do coeficiente de determinação ($r^2 = 0,995$), evidenciando que a variância da fração da evapotranspiração de referência pode ser explicada pelas variáveis independentes. Conforme a expectativa, a temperatura e o albedo são inversamente correlacionados com a $ET_{ref}F$. Já o NDVI possui coeficiente positivo, ou seja, áreas vegetadas possuem maiores valores da $ET_{ref}F$. Relação semelhante foi observada por Teixeira (2010) no Sub-Médio São Francisco. O *p*-valor dos coeficientes são nulos, corroborando a importância das variáveis independentes para a explicação da $ET_{ref}F$.

Ao aplicar os coeficientes da regressão obtidos da imagem de referência em outras datas e comparar a $ET_{ref}F$ estimada pela regressão com a obtida pelo balanço de energia, constatou-se um bom ajuste, com valores de $r^2 > 0,93$ para todas as datas. Apesar de forte correlação, o erro médio absoluto tende a aumentar com o passar dos dias em relação a imagem de referência. No caso da última imagem processada (dia 17/09/2005), obtida noventa e seis dias após a imagem de referência, por exemplo, o erro médio absoluto foi de 0,59. Isto ocorre em função da aplicação dos coeficientes de regressão para intervalos fora dos valores definidos na imagem de referência.

Durante a estação seca, período selecionado para a construção da série temporal de ET_a , o teor de água no solo diminui gradativamente em áreas de vegetação nativa (Cerrado), com reflexos sobre a evapotranspiração das plantas e a umidade relativa do ar. Entre os meses de maio a setembro, o Cerrado altera significativamente seu aspecto fisionômico, no qual a vegetação verde e vigorosa fica gradativamente mais seca, ocasionando maior temperatura e albedo da superfície, o que produz artificialmente valores negativos de $ET_{ref}F$.

Tabela 2 – Regressão entre $ET_{ref}F$ e NDVI, albedo e FT_s .

	Coeficientes	Erro padrão (fração $ET_{ref}F$)	Estatística t	p-valor
Interseção	0,873	0,001	690,371	0
FT_s	-0,544	0,001	-471,458	0
Albedo	-0,309	0,002	-153,280	0
NDVI	0,291	0,002	149,066	0
R-quadrado ajustado	0,995			
Erro padrão	0,011			
Observações	4422			

Para contornar esse problema, os valores de $ET_{ref}F$ em todas as datas foram normalizados entre 0 e 1,05 da evapotranspiração de referência, conforme valores de $ET_{ref}F$ assumidos pelo METRIC (Allen et al., 2007a). Para realizar essa normalização foi utilizada a equação

$$ET_{ref}F_{ajustada} = 1,05 \left[\frac{ET_{ref}F - ET_{ref}F_{min}}{ET_{ref}F_{max} - ET_{ref}F_{min}} \right] \quad (8)$$

em que $ET_{ref}F_{ajustada}$ = fração da evapotranspiração de referência escalada entre os valores de 0 e 1,05; $ET_{ref}F$ = fração da evapotranspiração de referência utilizando regressão linear; $ET_{ref}F_{min}$ = mínima fração da evapotranspiração de referência da imagem obtida por regressão linear; $ET_{ref}F_{max}$ = máxima fração da evapotranspiração de referência da imagem obtida por regressão linear.

Por ser uma equação linear, os valores de correlação não se alteram, mas os desvios diminuem, sendo que o maior valor observado foi de 0,06 da $ET_{ref}F$. O coeficiente de determinação varia entre 0,93 e 0,99 (Tabela 3). A figura 2 mostra a comparação da $ET_{ref}F$ estimada por regressão linear e pelo balanço de energia após o ajuste usando a equação 8. Conforme pode ser visualizado, existe uma boa concordância para todas as imagens analisadas.

Figura 2- Comparação da ETrF obtida do balanço de energia e da regressão linear normalizada em todas as imagens analisadas.

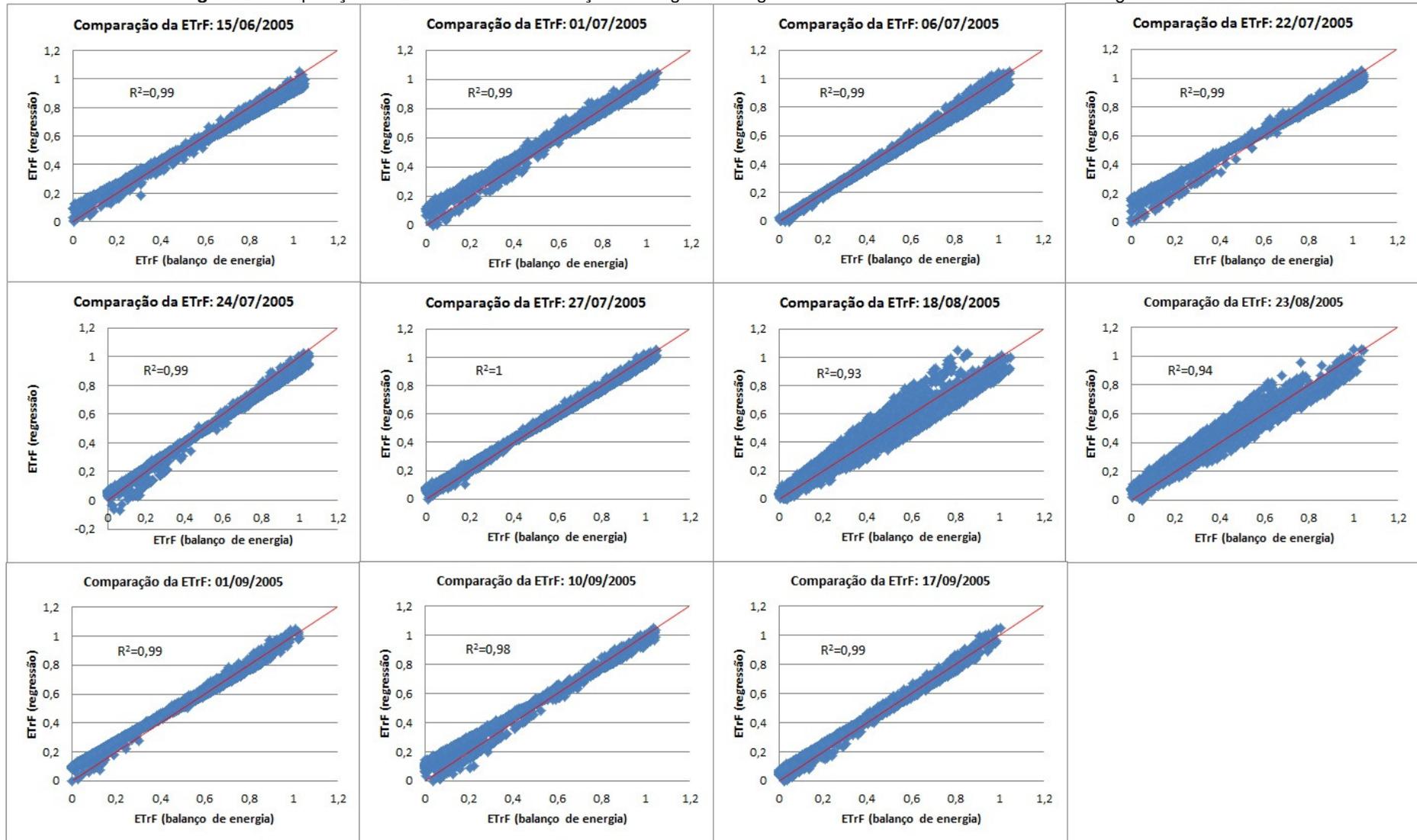
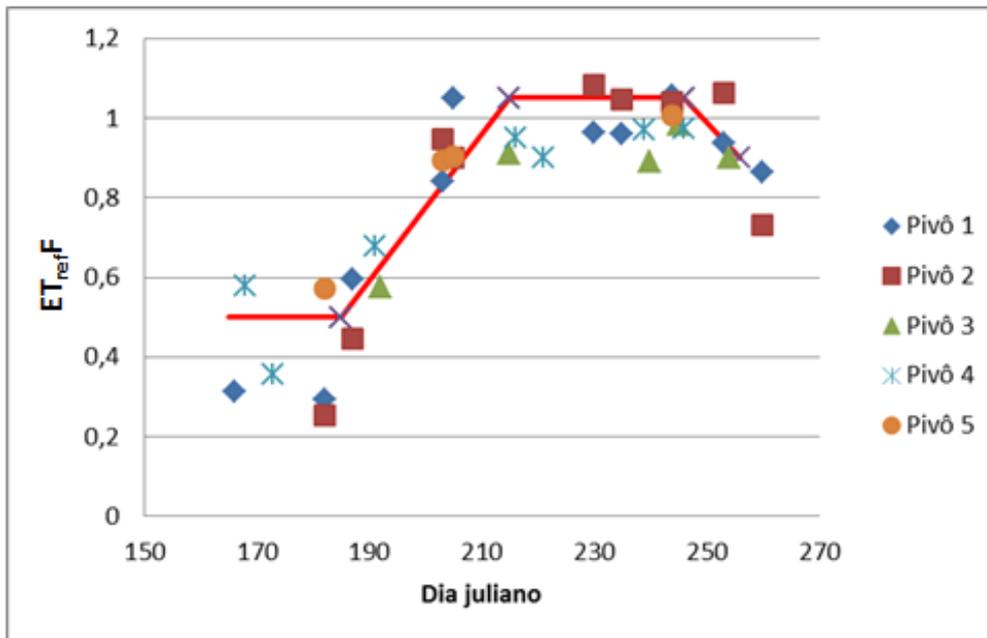


Tabela 3 – Coeficiente de determinação e erro médio da $ET_{ref}F$ estimada por regressão e normalizada.

Data de imageamento	Dias até 13/06	Coeficiente de determinação	Erro médio da $ET_{ref}F$ Regressão e normalização
13/06/2005	-	-	-
15/06/2005	2	0,994	0,038
01/07/2005	18	0,991	0,037
06/07/2005	23	0,995	0,033
22/07/2005	39	0,993	0,060
24/07/2005	41	0,994	0,028
27/07/2005	44	0,997	0,023
18/08/2005	66	0,932	0,053
23/08/2005	71	0,941	0,056
01/09/2005	80	0,994	0,052
10/09/2005	89	0,987	0,058
17/09/2005	96	0,994	0,033

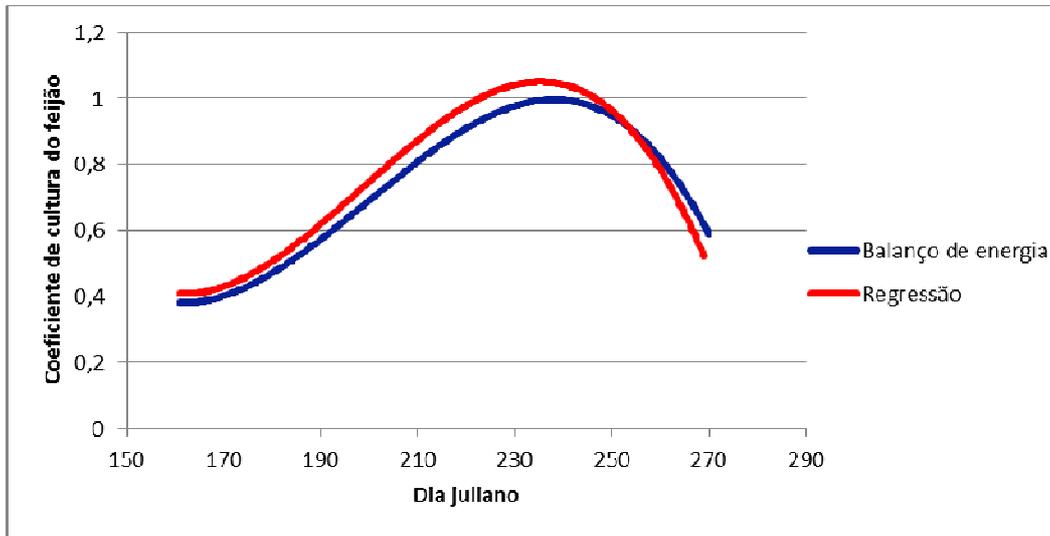
Para as cinco áreas com feijão irrigadas com pivô, onde não há restrição hídrica e a evapotranspiração se aproxima da situação potencial, a média dos valores da $ET_{ref}F$ é equivalente ao coeficiente de cultura do feijão (K_c do feijão). Na Figura 3 apresentam-se os valores da $ET_{ref}F$, obtidos remotamente por meio de regressão linear, e a curva de referência do K_c , conforme Allen et al. (1998).

Figura 3 – Coeficiente de cultura (K_c) e fração da evapotranspiração ($ET_{ref}F$) para a cultura do feijão.



Na Figura 04 apresenta-se as curvas de K_c provenientes das estimativas de $ET_{ref}F$, obtidas pelo balanço de energia e por regressão multivariada, ambas ajustadas por polinômios de 3 grau. Nota-se que as curvas apresentam um comportamento bastante semelhante, com uma pequena discrepância no início das curvas, no qual a $ET_{ref}F$ estimada por regressão é ligeiramente superior à obtida pelo balanço de energia no início do ciclo. Essa tendência se inverte no final do ciclo.

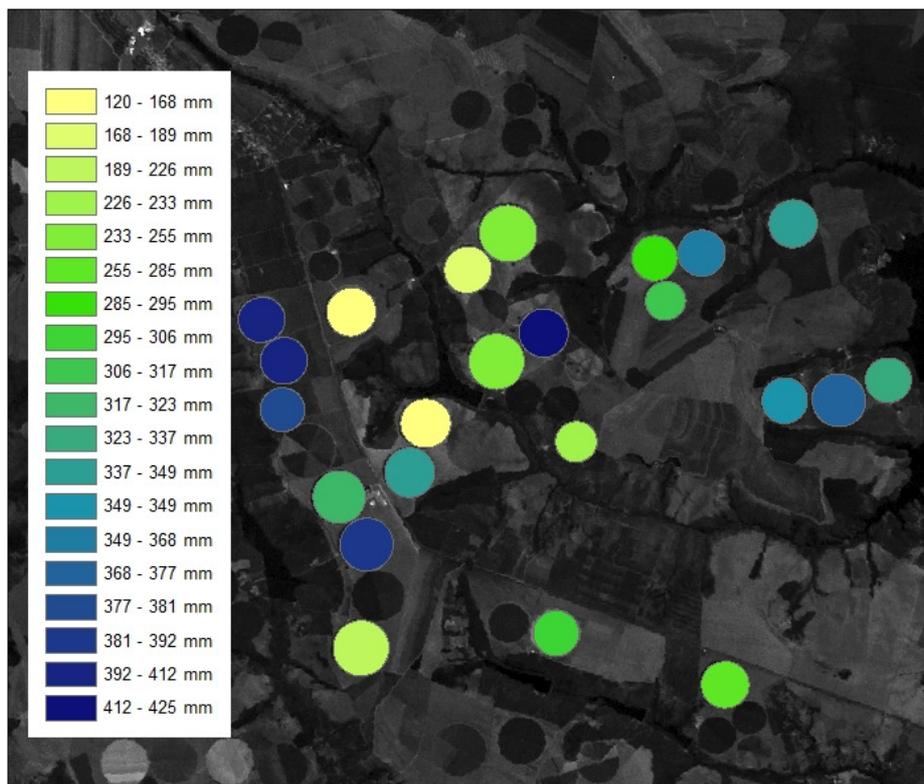
Figura 4 – Curvas do coeficiente de cultura do feijão obtida remotamente por balanço de energia e regressão linear.



Outro aspecto a ser observado é que os valores máximos da $ET_{ref}F$ obtida pelos coeficientes de regressão tendem a ser ligeiramente superiores aos obtidos pelo balanço de energia. Mas as diferenças não chegam a ser expressivas, não ultrapassando 5,25% da $ET_{ref}F$ em nenhum momento do ciclo de desenvolvimento do feijão.

A partir da estimativa da $ET_{ref}F$ em múltiplas imagens usando regressão linear, esses valores foram interpolados linearmente e associados a valores obtidos de uma estação meteorológica de referência, conforme as equações 6 e 7. A Figura 5 mostra a estimativa de ET_a integrada temporalmente entre maio e setembro de 2005 para alguns pivôs centrais na Bacia do Rio Preto.

Figura 5– Estimativa sazonal (13/06/2005 a 17/09/2005) da evapotranspiração em pivôs centrais na Bacia do Rio Preto – DF.



Nesta Figura pode-se observar que alguns pivôs foram destacados (cores diferentes) em virtude de possuírem cobertura vegetal uniforme, com apenas uma cultura agrícola plantada. Os pivôs com menores valores de ET_a , em amarelo e verde claro, não apresentaram área plantada em todo o período de junho a setembro de 2005. Nesses pivôs se observou o interstício de algumas semanas durante a plantação sucessiva de duas culturas agrícolas, período no qual os valores de ET_a são praticamente nulos em função da ausência de irrigação.

Uma possível aplicação das estimativas de ET_a é o cotejo com outorgas de uso d'água, no qual áreas irrigadas com altos valores de ET_a obtidos remotamente podem ser selecionadas visando à fiscalização *in-loco*. Na Figura 5, por exemplo, o pivô central em cor azul escuro, com ET_a entre 412 e 425 mm no período de junho a setembro, seria uma "escolha natural" para a fiscalização em campo. Neste caso, as estimativas de ET_a são utilizadas como indicativos indiretos do uso da água.

CONCLUSÃO

Para a construção da série temporal de ET_a , a utilização de regressão linear, conjuntamente com o emprego da equação de balanço de energia em uma imagem de referência, possibilitou estimar um sequencia da $ET_{ref}F$ válida em toda a série temporal, com erro máximo de 0,06 (adimensional) em relação a $ET_{ref}F$ obtida pelo balanço de energia.

Essa possibilidade constitui significativa redução de processamento, inclusive, uma vez conhecidos os parâmetros de regressão, a série temporal de ET_a pode ser obtida sem a aplicação de todas as equações do balanço de energia. A interpolação dos valores da $ET_{ref}F$ e sua associação com uma estação meteorológica de referência permite obter estimativas espacializadas de ET_a ao longo de um período, subsequentemente utilizadas, por exemplo, para monitorar o consumo de água em pivôs centrais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: 1998, 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, v.56).

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – model**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.133(4), p.380-394, 2007.

ALLEN, R. G. **Ref-ET: reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations**. University of Idaho, 2011. Disponível em: <<http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/>> Acesso em: jan.2011.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. **A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation**. Journal of Hydrology, 213(1-4), p. 198-212, 1998.

BRASIL. **Lei n. 9.433**, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1. da Lei n. 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n. 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 08 jan. 1997.

CHAVEZ, J.L.; NEALE, C.M.; PRUEGER, J.H.; KUSTAS, W.P. **Daily evapotranspiration estimates from extrapolating instantaneous airborne remote sensing ET values**. Irrigation Science, p.67–81, 2008.

FALKENMARK, M.; ROCKSTRÖM, J. **Balancing water for humans and nature**. Londres: Earthscan, 2 ed., 247 p., 2005.

GMBH GEOSYSTEMS. **ATCOR for ERDAS Imagine 2010**. Germering, GMBH GEOSYSTEMS, 2009. Disponível em: <www.geosystems.de/atcor/downloads/index.html>. Acesso em: jan. 2010.

GOWDA, P.H.; CHAVEZ, J.L.; COLAIZZI, P.D.; EVETT, S.R.; HOWELL, T.A.; TOLK, J.A. **ET mapping for agricultural water management: present status and challenges**. Irrigation Science, v.26(3), p.223-237, 2008.

GRAYSON, R.B.; BLÖSCHL, G. **Spatial patterns in catchment hydrology**. Cambridge: Cambridge University Press, 1 ed., 404 p., 2000.

KALMAN, J.D.; MCVICAR, T. R.; MCCABE.M.F. **Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data**. Surveys in Geophysics, v.29(4-5), p.421-469, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Mapa da Divisão Política-Administrativa do Brasil: 2010**.

NORMAN, J.M.; KUSTAS, W.P.; HUMES, K.S. **Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature**. Agricultural and Forestry Meteorology, v.77, 263-293, 1995.

RODRIGUES, L. N.; SANO, E. E.; AZEVEDO, J. A. de; SILVA, E. M. da. **Distribuição espacial e área máxima do espelho d'água de pequenas barragens de terra na Bacia do Rio Preto**. Espaço e Geografia, v. 10, p. 101-122, 2007.

SU, Z. **The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes**. Hydrology and Earth System Sciences, v.6(1), p.85-99, 2002.

TASUMI, M.; ALLEN, R.G.; TREZZA, R. **At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance**. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, v.13, p.51-63, 2008.

TEIXEIRA, A. H. de C. **Determining Regional Actual Evapotranspiration of Irrigated Crops and Natural Vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) Using Remote Sensing and Penman-Monteith Equation**. Remote Sensing, v. 2, p. 1287-1319, 2010.

WAN, Z.; DOZIER, J.A **Generalized Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space**. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, p.892-905, 1996.