



ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E UMIDADE DO SOLO USANDO DADOS DE SENSORES ORBITAIS EM ÁREA IRRIGADA

Francisco Dirceu Duarte Arraes¹, Mairton Gomes da Silva², Edmilson Gomes Cavalcante Junior³,
Joaquim Branco de Oliveira⁴, Eder Ramon Feitoza Lêdo²

¹Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Eng. de Sistemas Agrícolas – ESALQ/USP e Prof. Substituto do IFCE – Campus Iguatu. e-mail: dirceuarraes@gmail.com

²Tecnólogo em Irrigação e Drenagem, IFCE – Campus de Iguatu. Email: mairtong@hotmail.com, eder_ramon@hotmail.com

³Mestre em Irrigação e Drenagem, Ematerce. email: junior_rd_igt@hotmail.com

⁴Doutorando em Fitotecnia – UFERSA, Prof. do IFCE – Campus Iguatu. email: joaquimbrancodeoliveira@gmail.com

Resumo: Uma correta estimativa da evapotranspiração e umidade do solo são de fundamental importância para um sucesso em pesquisas do manejo agrícola, estudos de modelagem hidrológica e modelos meteorológicos. Buscando suprir a carência de dados de campo, objetiva-se com esse trabalho estimar os componentes do balanço de energia, a evapotranspiração e a umidade do solo, seguindo o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) em diferentes datas em área imageada pelo satélite LANDSAT 5-TM. O estudo foi realizado em recorte, na localidade do Cardoso, pertencente a zona rural do município de Iguatu-CE. As imagens orbitais foram obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), as quais foram processadas e empilhadas pelo software Erdas IMAGINE 9.0. Em seguida aplicou-se o algoritmo SEBAL para se quantificar o fluxo de calor latente a partir do resíduo do balanço de radiação da superfície que tem como componentes a radiação líquida (R_n), o fluxo de calor do solo (G) e o fluxo de calor sensível (H). Os valores para o fluxo de calor latente variaram entre 334,3 a 560,9 $W m^{-2}$. Os valores do fluxo de calor no solo exibiram baixa variabilidade. Observou-se que os valores médios de radiação líquida, ao longo do período estudado, foram próximos, exceto para 2001 e 2008. Os valores médios ET variaram de 3,10 a 5,48 $mm dia^{-1}$. A variação do grau de saturação médio da umidade do solo em áreas cobertas por culturas irrigadas representam um elevado grau de saturação, oscilando entre 0,56 e 0,85.

Palavras-chave: Balanço de Energia, Grau de Saturação, Irrigação, SEBAL, Sensoriamento Remoto

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia há uma necessidade crescente de desenvolver e aplicar o sensoriamento remoto em modelos hidrológicos distribuídos. Comparado com os modelos concentrados, os modelos hidrológicos distribuídos podem ser responsáveis para fornecer a descrições detalhadas da heterogeneidade espacial dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. Muitos autores têm reconhecido a necessidade de uma estimativa precisa da umidade do solo e da evapotranspiração em modelos distribuídos, especialmente em zonas semiáridas, onde a escassez de água no solo é um fator limitante para as culturas (DUCHEMIN et al., 2006; SÁNCHEZ et al., 2010).

A evapotranspiração (ET) é reconhecida como o processo mais importante por desempenhar um papel essencial na determinação de trocas de energia e massa entre a hidrosfera, atmosfera e biosfera (GOWDA et al., 2006). A irrigação é atividade que mais demanda água entre as atividades agrícolas, portanto, qualquer tentativa de melhorar a eficiência do uso da água deve ser empregada.

A umidade do solo é um parâmetro chave que liga à disponibilidade água para as culturas, a evapotranspiração, geração de escoamento, recarga de aquíferos e o manejo da irrigação, entre outros processos (SCOTT et al., 2003). O conhecimento das condições de umidade do solo reais traz uma ajuda significativamente para quantificar uma série de processos hidrológicos e indica onde a água está presente fisicamente em bacias hidrográficas.

As estimativas da variação espaço-temporal dos fluxos radiativos e energéticos à superfície e da umidade do solo viabilizariam o entendimento dos processos evaporativos, aspecto fundamental em muitas aplicações que enfocam recursos hídricos e modelagem climática (MOHAMED et al., 2004). No entanto, devido à escassez de dados meteorológicos, os modelos atmosféricos e hidrológicos são



alimentados com dados regionais com resolução inadequada para representar as situações atmosféricas que se deseja modelar (NICÁCIO, 2008).

Na perspectiva de minimizar os problemas oriundos da baixa disponibilidade de informações de campo, o sensoriamento remoto tem se apresentado como uma ferramenta promissora para avaliações tanto no aspecto hidrológico como meteorológico. Nesse sentido, o sensoriamento remoto proporciona uma alternativa para quantificação dos fluxos radiativos e energéticos entre a atmosfera e a superfície terrestre, bem como do grau de umidade no solo e da taxa evaporativa em escala regional.

Poucos trabalhos são registrados com o uso da fração evaporativa para estimativa da umidade do solo e, no Brasil, ainda não há registros da verificação da eficácia do algoritmo SEBAL na estimativa da distribuição espacial do teor de umidade no solo em uma bacia hidrográfica (NICÁCIO, 2008).

Objetivou-se com este trabalho estimar os fluxos de energia à superfície, evapotranspiração e umidade do solo com o emprego do algoritmo SEBAL e diferentes imagens do satélite LANDSAT 5-TM.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen é BSw'h', semiárido quente com chuvas de verão/outono e temperatura média mensal superior a 18°C.

As imagens utilizadas foram obtidas do Mapeador Temático (TM) do Landsat 5, fornecidas pela Divisão de Geração de Imagens (DGI) do INPE, selecionadas entre os anos de 1992 a 2008. Foram selecionadas um total de oito imagens, sendo as mesmas adquiridas sob a condição de céu claro, referentes aos dias 24/08/1992, 14/08/1994, 2/07/1996, 11/07/1999, 17/08/2001, 06/07/2003, 14/07/2006 e 20/08/2008. O estudo foi realizado em recorte, na localidade do Cardoso, pertencente a zona rural do município de Iguatu-CE. Após georreferenciadas as imagens foram realizados os procedimentos para obtenção da evapotranspiração pelo algoritmo SEBAL em recorte das respectivas imagens, que correspondiam a áreas tradicionalmente irrigadas com a cultura da Banana, para obter o valor de evapotranspiração da cultura em estudo.

A umidade do solo foi estimada pela equação proposta por Scott et al. (2003), conforme demonstrado abaixo:

$$\frac{\theta_{x,y}}{\theta_{Sat(x,y)}} = \exp\left[\frac{\Lambda_{x,y} - a}{b}\right] \quad [\text{Eq. 1}]$$

em que: $\theta_{(x,y)}/\theta_{Sat(x,y)}$ representa o conteúdo relativo de umidade do solo; $\Lambda_{(x,y)}$ é a fração de evaporação; a e b parâmetros da curva de ajuste, a = 1,0 (para normalizar a umidade do solo) e b = 0,421.

A fração evaporativa é uma razão entre o fluxo de calor latente (LE) e a diferença entre o saldo de radiação (Rn) e o fluxo de calor no solo (G), equação (2).

$$\Lambda_{x,y} = \frac{LE}{Rn - G} \quad [\text{Eq. 2}]$$

O saldo de radiação à superfície foi estimado empregando-se a equação do balanço de radiação à superfície detalhadamente descritas em Bastiaanssen et al. (1998), Allen et al. (2002).

$$R_n = \alpha \bar{R}_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - \epsilon_o \bar{R}_{L\downarrow} \quad [\text{Eq. 3}]$$

em que: $R_{S\downarrow}$ ($W m^{-2}$) é a radiação de onda curta incidente; α é o albedo (adimensional) corrigido de cada pixel; $R_{L\downarrow}$ ($W m^{-2}$) é a radiação de onda longa incidente pela atmosfera na direção de cada pixel; $R_{L\uparrow}$ ($W m^{-2}$) é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e ϵ_o (adimensional) é a emissividade de cada pixel.

O fluxo de energia no solo G ($W m^{-2}$), foi obtido a partir da equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen et al. (2000).



$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98NDVI^4) \right] Rn \quad [\text{Eq. 4}]$$

em que: T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$); α o albedo corrigido do pixel; NDVI o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada e Rn o saldo de radiação. Para a correção de valores do fluxo de energia no solo para corpos d'água ($NDVI < 0$), considerou-se $G = 0,3Rn$ (SILVA e BEZERRA, 2006).

O fluxo de energia sensível (H) é a etapa mais complexa do SEBAL, e é obtido através de processo iterativo. Para iniciar o mesmo, considera-se a atmosfera em equilíbrio neutro, sendo na sequência identificada a condição de estabilidade e então, são promovidas as correções necessárias. Inicialmente, H é estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície usando a calibração interna da diferença de temperatura próxima à superfície segundo Bastiaanssen et al. (1998):

$$H = \frac{\rho \cdot c_p dT}{r_{ah}} \quad [\text{Eq. 5}]$$

em que: ρ é a massa específica do ar úmido ($1,15 \text{ kg m}^{-3}$), c_p é o calor específico do ar ($1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), dT é a diferença de temperatura próximo à superfície (K) e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s m^{-1}).

O fluxo de calor latente instantâneo (LE , W m^{-2}) foi obtido como resíduo da equação do balanço de energia, a qual está apresentada na sequência:

$$LE = Rn - G - H \quad [\text{Eq. 6}]$$

em que: todas as componentes do balanço de energia são instantâneos, ou seja, seus respectivos valores são válidos para o momento da passagem do satélite.

Para estimativa da evapotranspiração diária (mm d^{-1}), foi utilizada a equação (7) Bastiaanssen (2000).

$$ET_{diária} = 86400 \frac{\Lambda_{x,y} \cdot Rn_{diário}}{\lambda} \quad [\text{Eq. 7}]$$

em que: $ET_{diária}$ é a evapotranspiração real diária em cada pixel (mm dia^{-1}); $Rn_{diário}$ é o saldo de radiação integrado em 24 horas; λ é o calor latente de vaporização (J kg^{-1}), calculado pela equação (8):

$$\lambda = 2,501 - 0,00236 T_s - 273,16 \cdot 10^6 \quad [\text{Eq. 8}]$$

sendo $T_s(\text{K})$ a temperatura de superfície.

Para o cálculo da evapotranspiração da cultura da banana pelo método indireto foi utilizada a equação de Penman-Monteith descrita pelo manual da FAO número 56 e utilizando o valor de Kc obtido por Bassoi et al. (2001) para região de Petrolina, cujo o valor adotado foi o valor médio (0,85), tendo em vista da ausência de valores de Kc da referida cultura para região de estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores para o fluxo de calor latente (LE) ficaram entre 334,3 a 560,9 W m^{-2} (Tabela 1), para os anos de 1996 e 2008. Santos e Silva (2010) obtiveram o fluxo de energia à superfície com o emprego do algoritmo S-SEBI, sendo encontrados valores para o fluxo de calor latente variando de 464,1 a 490,7 W m^{-2} para uma área irrigada na cultura da banana.

A informação sobre a variabilidade temporal e espacial é de grande importância, tendo em vista que muitos modelos hidrológicos usam valores constantes de LE na escala de bacia hidrográfica, o que produzem erros consideráveis ao se assumir valores constantes da evapotranspiração, que é diretamente associada ao



particionamento de energia em uma bacia hidrográfica, usualmente empregadas nas modelagens hidrológicas ou hidrometeorológicas do tipo chuva-vazão.

Tabela 1 - Componentes do balanço de energia à superfície

Ano	LE ($W m^{-2}$)	H ($W m^{-2}$)	G ($W m^{-2}$)	Rn ($W m^{-2}$)
24/08/1992	347,6	86,2	69,1	502,6
14/08/1994	400,2	60,4	46,7	507,4
02/07/1996	334,3	112,9	54,3	502,0
11/07/1999	376,5	81,1	49,3	506,3
17/08/2001	490,5	37,7	54,1	574,8
06/07/2003	370,1	64,7	52,1	486,8
14/07/2006	368,2	83,5	55,6	507,0
20/08/2008	560,9	8,2	46,3	607,0

Os valores do fluxo de calor sensível (H) para a área apresentou tendência de redução na quantidade de energia na forma de energia sensível no período de estudo, com valor mínimo de $8,2 W m^{-2}$ no ano de 2008 e o máximo de $112,9 W m^{-2}$. Os resultados encontrados para as áreas irrigadas confirmam os observados por Silva e Bezerra (2006) nas áreas irrigadas do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho, que obtiveram valores de H entre 60 e $150 W m^{-2}$. Os resultados ainda estão de acordo com os observados por Santos e Silva (2010) em área irrigada com a cultura da banana, com valores variando de 97,2 a $124 W m^{-2}$.

Os valores do fluxo de calor no solo (G) apresentaram um comportamento quase constante após o ano de 1994, estando em torno de $55,0 W m^{-2}$. Como a área do estudo trata-se de uma área irrigada, acredita-se que esta baixa variabilidade esteja relacionada com o maior teor de água no solo, que devido ao alto calor específico proporciona uma baixa variabilidade no fluxo de energia no solo. Bezerra et al. (2008) obtiveram valores de fluxo de energia no solo para uma região de fruticultura irrigada na região do Cariri cearense em torno de $60 W m^{-2}$. Santos e Silva (2010) encontraram valores variando de 73,6 a $83,8 W m^{-2}$.

Para os valores dos componentes do balanço de energia na área de estudo, observa-se que os valores médios de radiação líquida (Rn) nos anos em estudos foram muito semelhantes, exceto nos anos de 2001 e 2008 que foram superiores aos observados nos outros anos. Os valores médios do saldo de radiação foram ligeiramente superiores nas imagens adquiridas no mês de agosto. Este resultado pode ser justificado pelos valores da radiação de ondas curtas incidentes, sendo maiores no mês de agosto em virtude dos menores valores do ângulo zenital (Z), ou seja, quanto maior o Z, menor é a incidência de radiação global, devido a um maior caminho óptico que os raios solares percorrem para chegar à superfície.

Silva et al. (2005) determinaram o balanço de energia em áreas irrigadas com o emprego do algoritmo SEBAL, sendo encontrado para a radiação líquida (Rn) valores da ordem de 655,1 e $664,5 W m^{-2}$, para dois anos seguidos.

A média dos valores de ET obtida para os anos estudados variou de 3,10 a $5,48 mm dia^{-1}$ (Tabela 2). Ainda de acordo com a Tabela 2, os valores do coeficiente de variação oscilaram entre 0,28 a 12,86%, mostrando variabilidade da ET na cultura da bananeira na área de estudo, tal fato pode ser explicado pela falta de uniformidade do próprio sistema de irrigação e variabilidade espacial no conteúdo de água no solo disponível para planta.

Tabela 2 – Resumo estatístico dos resultados da evapotranspiração da bananeira estimada pelo SEBAL nos diferentes anos

Parâmetros estatísticos	Evapotranspiração							
	1992	1994	1996	1999	2001	2003	2006	2008
Média ($mm dia^{-1}$)	4,06	4,32	4,37	5,01	4,76	3,10	3,99	5,48
Máximo ($mm dia^{-1}$)	4,54	4,91	5,10	5,34	5,04	3,45	4,57	5,50



Mínimo (mm dia ⁻¹)	3,64	3,12	3,15	3,54	4,27	2,74	2,68	5,38
Desv. Padrão (mm dia ⁻¹)	0,28	0,39	0,56	0,37	0,24	0,23	0,48	0,02
Coef. Variação (%)	6,93	9,14	12,86	7,28	5,05	7,57	11,94	0,28

A Tabela 3 apresenta os valores da evapotranspiração da bananeira obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (PM-FAO 56) e pelo valor de Kc e ainda os valores médios de ET obtidos pelo SEBAL. Logo, percebe-se que os valores foram semelhantes entre as duas metodologias. Sendo comprovada pelos valores do erro absoluto menores que 1 mm dia⁻¹.

O maior valor obtido para o erro relativo foi de 22,47% para ano de 2003, podendo esse valor está associado ao possível erro na determinação dos pixels ancoras (frio e quente) na imagem em estudo. A evapotranspiração da bananeira estimada pelo SEBAL para região de Iguatu obteve resultados satisfatórios quando comparado a metodologia tradicional pelo método indireto usando ET_o pelo método de Penman-Monteith FAO 56 e o Kc da cultura.

Tabela 3 – Evapotranspiração da cultura (ETc) obtida por Penman-Monteith e pelo SEBAL

ETc (PM-FAO 56)	SEBAL	Erro Absoluto (mm dia ⁻¹)	Erro Relativo (%)
4,85	4,06	0,79	16,25
4,50	4,32	0,18	4,01
4,36	4,37	0,01	0,24
5,18	5,01	0,17	3,22
4,70	4,76	0,06	1,37
4,00	3,10	0,90	22,47
4,00	3,99	0,02	0,48
5,44	5,48	0,04	0,70

Na Tabela 4 encontra-se a variação do grau de saturação médio da umidade do solo ($\theta_{(x,y)}/\theta_{sat(x,y)}$) no momento da passagem do satélite, apenas das áreas ocupadas com fruticultura irrigada. Os dados variaram nas diferentes datas entre 0,56 e 0,85, o que representam um elevado grau de saturação, semelhante ao encontrado por Nicácio (2008), em algumas áreas ocupadas com fruticultura na bacia do Rio São Francisco, que descreveu uma variação 0,65 a 0,66 na média do referido grau.

Tabela 4 – Valores do grau de saturação do solo

Ano	Média	Mediana	1° Quartil	2° Quartil	Int. quartil	Desvio Padrão	CV (%)
24/08/1992	0,607	0,584	0,468	0,650	0,182	0,080	13,12
14/08/1994	0,697	0,706	0,590	0,822	0,233	0,141	20,27
02/07/1996	0,561	0,577	0,472	0,674	0,202	0,112	20,93
11/07/1999	0,648	0,665	0,601	0,695	0,094	0,079	12,16
17/08/2001	0,847	0,871	0,756	0,937	0,180	0,107	12,58
06/07/2003	0,684	0,679	0,528	0,765	0,238	0,100	14,69
14/07/2006	0,582	0,592	0,457	0,692	0,236	0,145	24,99
20/08/2008	0,837	0,851	0,783	0,922	0,139	0,110	13,19



Ainda de acordo com a Tabela 4, as menores médias do grau de saturação (0,56 e 0,58) também obtiveram os maiores coeficientes de variação, o que pode ser explicado pela afirmação de outros autores, que o modelo funciona melhor para valores elevados do grau de saturação ou também pela falta de uniformidade da irrigação nas áreas em estudo. Ahmad e Bastiaanssen (2003) relataram que os valores do grau de saturação do solo, baseados na fração de evaporação, apresentam um erro sistemático em torno de $\pm 0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para a faixa do grau de saturação entre 0,65 a 0,85; e que os erros são maiores na estimativa da fração fora da faixa indicada.

4. CONCLUSÕES

A evapotranspiração da bananeira estimada pelo SEBAL obteve um valor médio do erro absoluto de $0,27 \text{ mm dia}^{-1}$ e de 6,1% para o erro relativo quando comparado ao método indireto que usa o coeficiente de cultura e ETo obtido por Penman-Monteith FAO 56. Mostrando o potencial do SEBAL para estimativa da evapotranspiração utilizando menos dados climáticos e da cultura.

A metodologia utilizada mostrou ser uma alternativa para determinar a umidade do solo em escala regional, principalmente em regiões sem monitoramento.

REFERÊNCIAS

AHMAD, M.-UD-DIN.; BASTIAANSEN, W. G. M. Retrieving soil moisture storage in the unsaturated zone using satellite imagery and bi-annual phreatic surface fluctuations. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 17, p. 141 – 161, 2003.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSEN, W. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Advanced training and Users Manual, Idaho, 2002. 98p.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat flux in the irrigated Gediz basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87 – 100, 2000.

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**, v. 212 - 213, p. 198 – 212, 1998.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - LANDSAT 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

DUCHEMIN, B.; HADRIA, R.; ERRAKI, S.; BOULET, G.; MAISONGRANDE, P.; CHEHBOUNI, A.; ESCADAFAL, R.; EZZAHAR, J.; HOEDJES, J.C.B.; KHARROU, M.H.; KHABBA, S.; MOUGENOT, B.; OLIOSO, A.; RODRIGUEZ, J.C.; SIMMONEAUX, V. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: on the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely sensed vegetation indices. **Agricultural Water Management**, v. 79, p. 1–27, 2006.

MOHAMED, Y. A.; BASTIAANSEN, W. G. M.; SAVENIJE, H. H. G. 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.

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco**. 2008. 320p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SÁNCHEZ, N.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; CALERA, A.; TORRES, E.; PÉREZ-GUTIÉRREZ, C. Combining remote sensing and in situ soil moisture data for the application and validation of a



distributed water balance model (HIDROMORE). **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 69–78, 2010.

SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. B. Obtenção dos fluxos de energia à superfície utilizando o algoritmo S-SEBI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 365 - 374, 2010.

SCOTT, C. A.; BASTIAANSEN, W. G. B.; AHMAD, M.-UD-Din. Mapping root zone soil moisture using remotely sensed optical imagery. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 126, n. 5, p. 326 – 335, 2003.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v.14, p.1-10, 2006.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens LANDSAT 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.