

Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo montanhoso

Sady Júnior Martins da Costa de Menezes ¹

Gilberto Chohaku Sedyama ¹

Vicente Paulo Soares ¹

José Marinaldo Gleriani ¹

Francisco de Assis de Carvalho Pinto ¹

Ricardo Guimarães Andrade ¹

¹ Universidade Federal de Viçosa – UFV
Campus Universitário – 36570-000 – Viçosa – MG, Brasil

sadymenezes@yahoo.com.br

sedyama@ufv.br

vicente@ufv.br

gleriani@ufv.br

facpinto@ufv.br

rgandrade@vicosa.ufv.br

Abstract. SEBAL - "Surface Energy Balances Algorithms for Land" - is an algorithm for creation of evapotranspiration maps for large areas. SEBAL is processed through steps to predict a complete solar radiation and energy balance on the Earth surface. It uses images collected by TM Landsat sensor or any other sensor that collect wavelengths in the region of the reflective infrared and thermal bands. The present work was carried out to estimate the components of the solar radiation balance and the surface energy (sensible heat flux; soil heat flux and latent heat flux); to determine the instantaneous (hourly) evapotranspiration in the area of study through the use of the SEBAL algorithm besides the tools of the remote sensing for the images considering flat terrain conditions and mountainous relief. In the area in study were obtained a scene of the TM Landsat 5 sensor, for the date of 20/06/2003.

Palavras chaves: remote sensing, energy balance, TM Landsat 5 sensor, sensoriamento remoto, balanço de energia, sensor TM Landsat 5.

1. Introdução

A evapotranspiração pode ser medida por meio de equipamentos, como os lisímetros ou estimada por meio do balanço hídrico no solo ou de dados meteorológicos aplicados em equações, como a utilizada pela FAO - 56 Penman-Monteith (Allen et al.; 1998). Porém, estes métodos são limitados porque eles estimam valores pontuais de ET para um local específico e não para uma escala regional. Esta limitação motivou o desenvolvimento do uso de dados obtidos por sensoriamento remoto para a avaliação da ET em grandes áreas. A principal vantagem do uso do sensoriamento remoto é que a evapotranspiração pode ser calculada sem a necessidade de quantificar os complexos processos hidrológicos.

Segundo Costa (1997), técnicas de sensoriamento remoto podem ser utilizadas na estimativa de condições hidrológicas e de suas influências na vegetação de bacias hidrográficas. O uso de imagens orbitais surge como uma opção a ser explorada, dado ao caráter multiespectral, que possibilita uma análise aprofundada de componentes agrometeorológicos, como temperatura foliar, situação hídrica regional, etc.

Alguns algoritmos têm sido desenvolvidos nos últimos anos, dentre os quais se destaca o algoritmo SEBAL ("*Surface Energy Balance Algorithm for Land*") que foi desenvolvido por Bastiaansen em 1995 e tem como objetivo a obtenção da evapotranspiração (ET) através de dados de imagem digital e alguns dados complementares de superfície.

Segundo Bastiaansen (2000), o SEBAL é um algoritmo para determinação dos mapas de evapotranspiração para grandes áreas. Ele é processado por meio de rotinas computacionais

que predizem um balanço completo da radiação e da energia ao longo da superfície da Terra. Utiliza imagens coletadas pelo sensor TM Landsat 5 ou outro sensor que colete faixas do espectro na região do infravermelho refletivo e termal. No entanto, a teoria é independente do tipo de satélite e o uso do algoritmo SEBAL pode ser aplicado para outras imagens de satélites desde que se utilizem os parâmetros de forma apropriada.

No presente trabalho, os objetivos foram de estimar os componentes do balanço de radiação e de energia à superfície e determinar a evapotranspiração/evaporação horária na região de estudo por meio do uso do algoritmo SEBAL, considerando as condições de relevo montanhoso.

2. Materiais e Métodos

2.1. Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada na região do Quadrilátero Ferrífero Mineiro, sendo a pesquisa realizada no entorno do município de Santa Bárbara, Minas Gerais, Latitude $19^{\circ}57'34''$ Sul e Longitude $43^{\circ}24'55''$ Oeste (**Figura 1**).

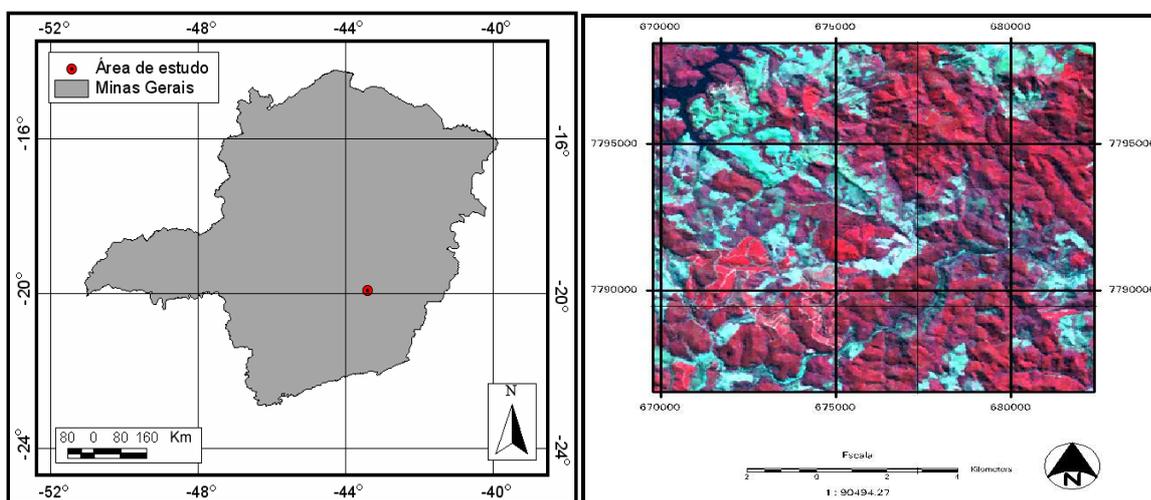


Figura 1 – Localização da região de estudo e imagem TM Landsat 5 do dia 20/06/2003.

Segundo Nunes e Pedralli (1995), a região que compreende o município de Santa Bárbara possui altitudes que variam de 630 a 880m. O clima, pela classificação de Köppen, é do tipo Cwb – tropical de altitude, com verões frescos e estação seca bem definida, sendo os meses de outubro a abril, úmido, e os de maio a setembro, relativamente secos, segundo Antunes (1986). Segundo Rocha e Campos (1994), a temperatura média anual está entre 19 a 20 °C, sendo a temperatura máxima de 32 °C (Janeiro) e a mínima de $12,9$ °C (Junho-Julho). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura argilosa, afloramentos de rocha, Cambissolo Háplico TB distrófico e Neossolo Litólico distrófico. A vegetação dessa região, pelos mapas e descrições dos domínios morfoclimáticos da América do Sul, segundo Ab'saber (1977), situa-se na transição entre os domínios Tropical Atlântico e dos Cerrados.

2.2. Base de dados

Foi usada uma cena do sensor (Thematic Mapper, TM) do satélite Landsat 5, para a data do dia 20/06/2003. Dados da estação climatológica automática do Gaspar, localizada na região de Santa Bárbara, Distrito de Florália, nas coordenadas $19^{\circ} 59' 00''$ Sul e $43^{\circ} 18' 19''$ sendo esta de propriedade da empresa CENIBRA S/A.

Imagem contendo o Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDE) para a área em estudo para fins de uso no procedimento de aplicação do algoritmo SEBAL para as condições de relevo montanhoso. A **Figura 2** mostra em 3ª Dimensão a região de pesquisa, sendo obtida a partir da imagem digital de elevação do terreno.

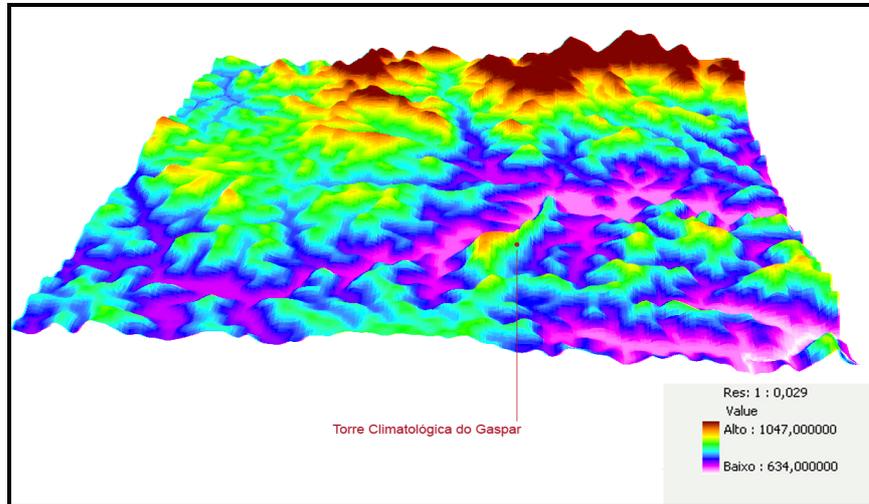


Figura 2 – Modelo Digital de Elevação do Terreno, visualização em 3ª Dimensão, mostrando o ponto onde se localiza a Estação Climatológica do Gaspar de propriedade da CENIBRA S/A e a variação de altitude do local.

2.3. Cálculo do Balanço de Radiação (Rn), do Fluxo de Calor no Solo (G) e Fluxo de Calor Sensível (H)

As imagens TM Landsat 5 foram utilizadas pelo programa ERDAS IMAGE 8.5 que georreferenciou as tipologias para serem utilizadas pelo algoritmo SEBAL.

As **Figura 3 e 4** apresentam o fluxograma para o cálculo Rn e o fluxograma do cálculo de H:

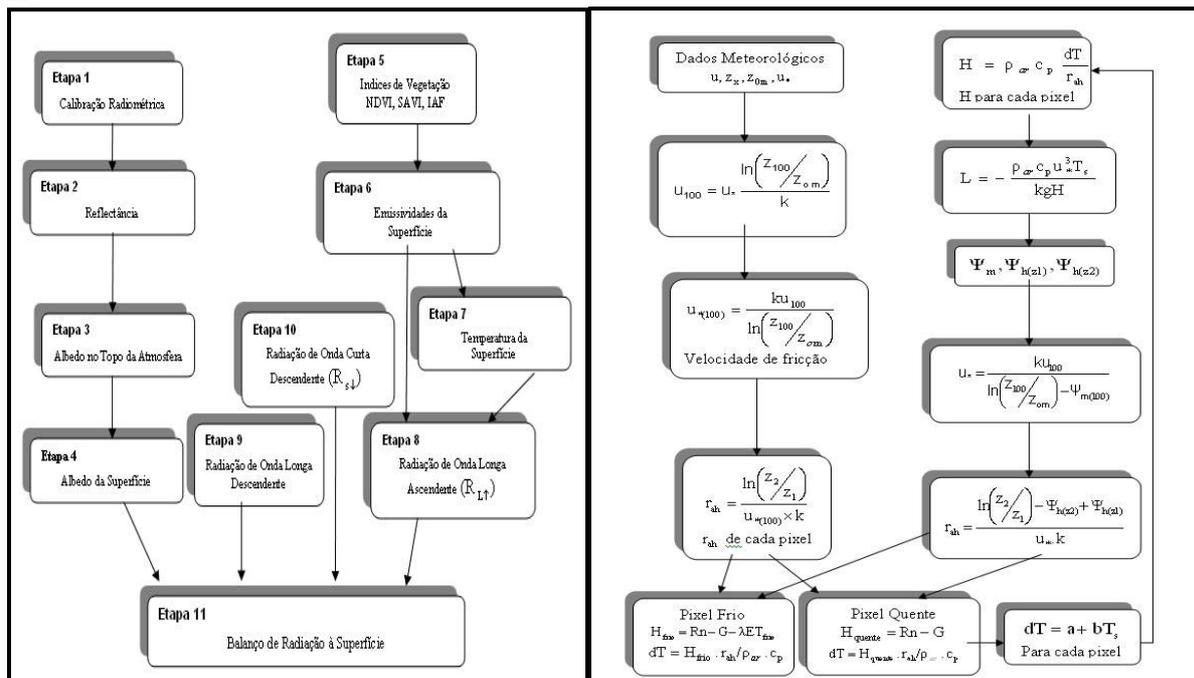


Figura 3 – Cálculo de Rn.
FONTE: SILVA (2005)

Figura 4 – Cálculo de H.

O Fluxo de Calor no Solo (G) foi calculado pela seguinte expressão:

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

em que G é calculado pixel a pixel.

O cálculo de H foi iniciado com dados de uma estação meteorológica no interior da área estudada de propriedade da empresa CENIBRA S/A, quais sejam: a velocidade do vento (ms^{-1}) na altura da torre e a altura média da vegetação circundante no local da medição da velocidade do vento. Estes dados foram coletados no dia da passagem do satélite pelo local e os horários de coleta destes dados foram corrigidos para a hora local da região em estudo. Para o processamento no SEBAL, foi usada a hora padrão do local considerado (Hora Oficial de Brasília, Brasil).

A diferença de temperatura próxima à superfície dT ($^{\circ}\text{C}$) para cada pixel foi dada pelo SEBAL através de uma relação linear entre dT e T_s (temperatura da superfície):

$$dT = a + bT_s$$

em que os coeficientes a e b foram obtidos através dos pixels âncoras (quente e frio). O pixel “frio” foi usado no SEBAL para definir a quantidade de evapotranspiração que ocorreu na imagem de uma área bem irrigada e completamente vegetada. Já o pixel “quente” foi localizado em uma área seca ou em área onde se encontra campos vazios (áreas já colhidas ou em preparo agrícola), considerando assim que não há evaporação nestas áreas. Foram evitadas áreas impermeabilizadas (asfaltos), telhados e áreas extremamente quentes.

Os valores obtidos não representam adequadamente o H de cada pixel e servem, tão somente, como valores iniciais de um processo iterativo, e que nas etapas seguintes foram consideradas, efetivamente, a condição de estabilidade de cada pixel. Dessa forma, devido aos efeitos turbulentos aquecerem a superfície e afetarem as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, aplicou-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov.

2.4. Cálculo do Fluxo de Calor Latente (λET)

Foi utilizado um fator de conversão para radiação no intuito de encontrar uma fórmula mais coerente para a obtenção da evapotranspiração para as condições encontradas nas análises pelo algoritmo SEBAL:

$$\lambda ET = R_n - G - H$$

$$ET_{\text{instantânea}} = (\lambda ET \times 0,0036) / (2,45) = \{ \text{mmh}^{-1} \}$$

2.5. Uso do algoritmo SEBAL nas condições de relevo montanhoso (com variação de altitude)

Para uso em áreas montanhosas, onde há variação de relevo significativa e uma grande gama de inclinações foi desenvolvido o “SEBAL - Mountain Model” que contém modificações para correção da declividade e elevações nos cálculos. Este algoritmo exigiu informações sobre declividade para os cálculos que foram obtidas para cada pixel usando o MDE (Modelo Digital de Elevação do Terreno) para a área em estudo.

Em um algoritmo para áreas planas, utilizando o SEBAL, foi assumido que a superfície da terra é horizontal e o cálculo do $\cos\theta$ foi uma constante sobre a área de interesse. Segundo

Duffie & Beckman (1991), citado por BASTIAANSEN (2002), para áreas montanhosas, o $\cos\theta$ será diferente para cada pixel, dependendo da declividade e dos aspectos ligados à superfície da terra:

$$\cos\theta = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi)\cos(i) - \text{sen}(\delta)\cos(\phi)\text{sen}(i)\cos(\gamma) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(i)\cos(\omega) + \cos(\delta)\text{sen}(\phi)\text{sen}(i)\cos(\gamma)\cos(\omega) + \cos(\delta)\text{sen}(\phi)\text{sen}(i)\text{sen}(\omega)$$

em que, δ é a declividade do terreno (em rad; positivo no verão no hemisfério norte); ϕ é a latitude do pixel (rad; positivo no hemisfério norte); i é a inclinação da superfície (em rad), em que: θ é o ângulo de incidência, z é o ângulo zenital; γ é o azimute do ângulo de superfície (rad), onde: $\gamma = 0$ para o sul, $\gamma = -\pi/2$ para o leste, $\gamma = +\pi/2$ para o oeste e $\gamma = \pm\pi$ para o norte; ω é o ângulo horário, $\omega = 0$ para o meio dia, ω é negativo ao amanhecer e positivo ao entardecer.

3. Resultados e Discussões

3.1. Valores do Saldo de Radiação nas condições de relevo plano e montanhoso

O saldo de radiação foi obtido para o dia de céu claro no momento do imageamento, ou seja, no momento da coleta de informação e representa uma maior disponibilidade de energia para os processos biofísicos. A **Tabela 1** mostra os valores para o saldo de radiação nas condições analisadas:

Tabela 1 – Valores do Saldo de Radiação (W m^{-2}) nas condições analisadas da área de estudo.

Saldo de Radiação (W m^{-2})	Plano	Montanhoso
Lago	464,24 a 494,4	825,91 a 868,94
Vegetação	375,99 a 464,24	708,56 a 825,91
Solo	218,86 a 375,99	559,91 a 689,00
Média	414,36	650,96

Observa-se um maior saldo de radiação para a condição de relevo montanhoso. Nesta condição, temos que a energia incidente não é totalmente homogênea ao se considerar a área totalmente plana, tendo áreas de maior incidência de radiação (áreas expostas aos raios solares) e áreas onde se encontra sombreada.

3.2. Valores do Fluxo de Calor no Solo nas condições de relevo plano e montanhoso

Na **Tabela 2** têm-se os valores do fluxo de calor no solo nas condições analisadas:

Tabela 2 – Valores do Fluxo de Calor no Solo (Wm^{-2}) nas condições analisadas da área de estudo.

Fluxo de Calor no Solo (W m^{-2})	Plano	Montanhoso
Lago	134,25 a 143,70	266,67 a 980,83
Vegetação	29,34 a 134,25	34,79 a 266,66
Solo	16,41 a 29,34	0 a 34,79
Média	29,38	41,51

Observa-se que o fluxo de calor no solo para a condição de relevo montanhoso é maior do que para a condição de relevo plano. Os valores negativos encontrados na tabela significam calor sendo perdido do solo para a atmosfera e os positivos sendo o calor absorvido pelo solo da atmosfera.

3.3. Valores do Fluxo de Calor Sensível nas condições de relevo plano e montanhoso

Na **Tabela 3** observa-se os valores do fluxo de calor sensível nas condições analisadas:

Tabela 3 – Valores do Fluxo de Calor Sensível (Wm^{-2}) nas condições analisadas da área de estudo.

Fluxo de Calor Sensível ($W m^{-2}$)	Plano	Montanhoso
Lago	-13,6 a 76,67	-
Vegetação	76,67 a 223,18	-
Solo	223,18 a 500	-
Média	70,48	103,66

Não se pode dizer nada quanto aos dados para a condição de relevo montanhoso pelo fato de não ter conseguido obter os valores das feições devido às incertezas nas variáveis de entrada que foram obtidas empiricamente e não foram calibradas e validadas com coletas de campo e que ao serem utilizadas no processamento, não forneceram valores que pudessem expressar algum dado para a pesquisa. Porém, pela média obtida, verifica-se um maior valor (média) obtido para a condição de relevo montanhoso.

3.4. Valores do Fluxo de Calor Latente nas condições de relevo plano e montanhoso

A **Tabela 4** apresenta os valores para o fluxo de calor latente nas condições analisadas:

Tabela 4 – Valores do Fluxo de Calor Latente (Wm^{-2}) nas condições analisadas da área de estudo.

Fluxo de Calor Latente ($W m^{-2}$)	Plano	Montanhoso
Lago	55,88 a 229,12	87,08 a 296,07
Vegetação	229,12 a 476,87	296,07 a 714,07
Solo	0 a 55,88	0 a 87,08
Média	319,01	458,81

É observado um maior fluxo de calor latente para a condição de relevo montanhoso.

3.5. Valores da Evapotranspiração/Evaporação horária das feições nas condições de terreno plano e montanhoso.

A **Tabela 5** apresenta os valores da evapotranspiração/evaporação horária das feições nas condições analisadas:

Tabela 5 – Valores da Evapotranspiração/Evaporação horária das feições (mmh^{-1}) nas condições analisadas da área de estudo.

Evapotranspiração/Evaporação horária das feições (mmh^{-1})	Plano	Montanhoso
Lago	0,33 a 0,47	0,40 a 0,53
Vegetação	0,47 a 0,70	0,53 a 0,99
Solo	0 a 0,33	0 a 0,40
Média	0,469	0,674

Observa-se uma maior evapotranspiração/evaporação para a condição de relevo montanhoso em comparação com o relevo plano.

A **Tabela 6** mostra o resultado encontrado para a evapotranspiração horária para a imagem analisada do dia 20/06/2003 para as condições de relevo plano e relevo montanhoso. Apresenta também a variação entre as evapotranspirações, a média encontrada e o valor encontrado para o pixel que corresponde à estação climatológica do Gaspar, sendo este pixel atribuído como o pixel frio.

Tabela 6 - Resultados de Evapotranspiração horária (ET_h), do dia 20 de Junho de 2003, obtidos pelo SEBAL para as condições de relevo plano e montanhoso.

20 de Junho de 2003			
	ET_h estimada (engloba todas as feições) (mmh^{-1})	Média da ET_h (engloba todas as feições) (mmh^{-1})	ET_h (Pixel que compreende a Estação Climatológica) (mmh^{-1})
Relevo Plano	0 a 0,700719	0,470059	0,613
Relevo Montanhoso	0 a 1,02767	0,733006	0,775

A **Figura 5** mostra os mapas de evapotranspiração/evaporação para as feições nas condições analisadas de relevo plano e montanhoso:

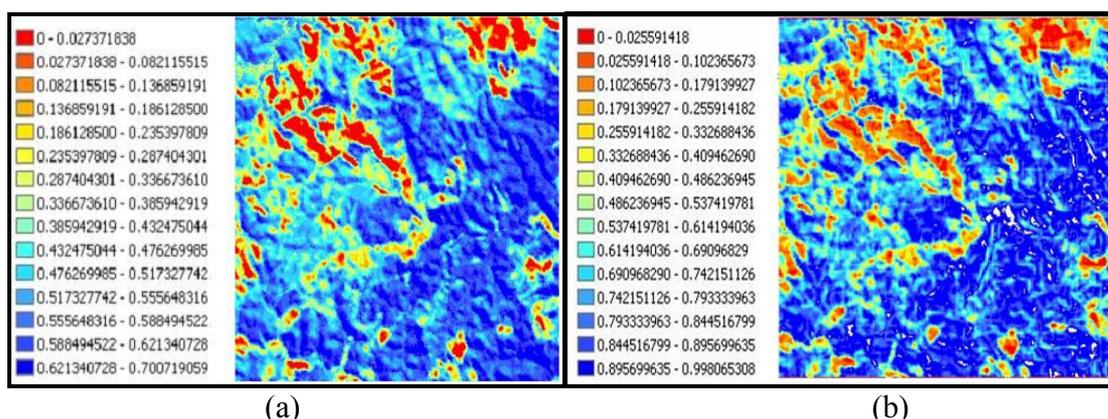


Figura 5 - Evapotranspiração/Evaporação horária das feições (mmh^{-1}) para o relevo plano (a) e relevo montanhoso (b) do dia 20 de Junho de 2003

A fundamentação teórica mostrou-se condizente com os valores encontrados em nossos estudos, comparando-os com os dados obtidos por alguns pesquisadores quanto às variáveis que compõem o algoritmo SEBAL. Porém, pesquisas não de ser feitas no âmbito de tornar o algoritmo mais preciso e confiável para as condições edafo-climáticas brasileiras, visto que algumas de suas fórmulas de abrangência empírica foram desenvolvidas para condições diferentes de nossa realidade.

Vale salientar que para as nossas condições de estudo, apesar do SEBAL ser desenvolvido para apresentar resultados aceitáveis em terrenos planos, os valores de evapotranspiração estimados utilizando parâmetros para relevos declivosos devem ser testados para estas condições a fim de calibrá-los e validá-los.

4. Conclusões

Os componentes do balanço de radiação à superfície (saldo de radiação), do balanço de energia (fluxo de calor no solo, sensível e latente) mostraram-se condizentes com a literatura consultada para as condições estudadas considerando relevo plano.

Ao considerar o relevo montanhoso, os dados também se mostraram condizentes, porém este superestimou a evapotranspiração quando comparado com a condição de relevo plano.

5 - Referências bibliográficas

Ab'saber, A. N. **Os domínios morfoclimáticos da América do Sul**. Boletim do Instituto de Geografia, São Paulo, 1977, p.52:121

Allen, R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R.; Waters, R.; Bastiaanssen, W. **Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Advanced training and Users Manual**, Idaho, 2002, 98p.

Allen, R. G.; Pereira, L. S. D.; Smith, M. **Crop Evapotranspiration (FAO Irrigation and Drainage Paper 56)**, Roma: FAO, 1998, 326p.

Antunes, F. N. **Caracterização climática do estado de Minas Gerais**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte 12(138): 1986, p.9-13.

Assad, E.D.; Sano, E.E. **Sistemas de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura**. Brasília: Embrapa-SPI / Embrapa-CPAC, 2ª ed., 1998, 434p.

Bastiaanssen, W. G. M. **SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey**. *Journal of Hydrology*, v. 229. 2000, p.87-100.

Bezerra, M. V. C. **Balanço de Energia em áreas irrigadas utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto**. Campina Grande, PB: UFCG, 2004, 101p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, 2004

Costa, M.C. **Estimativa da Evapotranspiração Regional por Meio de Imagens Orbitais**. Viçosa. MG: UFV. 1997, 52p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.

Nunes, Y. R. F.; Pedralli, G. **Desenvolvimento de metodologia para adensamento e recomposição da vegetação na EPDA-Peti. MG, Bios 2(3): 1995. 53-61**

Rocha, M. G. B.; Campos, W. O. **Clonagem intensiva em *Eucalyptus Grandis* na CENIBRA, Anais. IPEF, 1994, p.24-43**

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. 2005, p. 243-252

Silva, B. B.; Moura, M. S. B.; Feitosa, J. R.; Galvêncio, J. D.; Filho, J. F. C. **Balanço de Radiação no Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto e Imagens Landsat 5 – TM**. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Foz do Iguaçu - PR. **Anais: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002.**