



RESULTADOS PRELIMINARES DA ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO DIURNO USANDO IMAGENS DO SENSOR MODIS (TERRA E AQUA) PARA DIAS DE CÉU CLARO

Kleber Renato da Paixão Ataíde

Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Avenida Aprígio Veloso, 882, Bloco CL, 58.109-080 Campina Grande/PB.
Email: kleberataide@msn.com

Bernardo Barbosa da Silva

Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Avenida Aprígio Veloso, 882, Bloco CL, 58.109-080 Campina Grande/PB.
Email: bernardo@dca.ufcg.edu.br

Enilson Palmeira Cavalcanti

Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Avenida Aprígio Veloso, 882, Bloco CL, 58.109-080 Campina Grande/PB.
Email: enilson@dca.ufcg.edu.br

Abstract. The method use a algorithm which primarily uses remote sensing information and eliminates the need for ground information as model input, by using various land and atmospheric data products available from Terra and Aqua–MODIS. A sinusoidal model is utilized to estimate diurnal cycle of net radiation through a simple scheme proposed to estimate instantaneous net radiation over large heterogeneous areas for clear sky days using only remote sensing observations. The sinusoidal model is capable of retrieving the diurnal variations of net radiation with a single instantaneous net radiation estimate from the satellite. Preliminary results, using data over the farm Frutacor in Quixerê in the Ceará State, which show good agreement with ground-based observations. It appears that the methodology presented here can estimate instantaneous and diurnal net radiation with comparable accuracy to those of current methods that use ground-based observations and mainly provide point estimates. It explicitly recognizes the need for spatially varied parameters and provides a distributed net radiation map over large heterogeneous domain with fine spatial resolution.

Keywords: MODIS, saldo de radiação, sensoriamento remoto, Aqua e Terra.

1. Introdução

O saldo de radiação (R_n) representa a energia disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre. Essa energia é a diferença entre os fluxos de radiação que chegam e que saem da superfície terrestre, incluindo radiação de ondas curtas e ondas longas. Isto é uma componente fundamental para estimativa do balanço de energia na superfície, previsão do tempo e meteorologia agrícola. Ao longo do dia, nas horas de brilho solar, o saldo de radiação em uma superfície qualquer tende a ser positivo, pois os fluxos incidentes (global e atmosférico) são superiores às frações refletidas e emitidas. Por outro lado, durante a noite, é comum que esses valores sejam negativos, pois o fluxo incidente passa a ser apenas atmosférico e a energia emitida pela superfície, superior a este, resultando em um saldo de radiação negativo (Geiger, 1961; Monteith e Unsworth, 1990; Pezzopane *et al.*, 1995).

O sensoriamento remoto provê inigualáveis coberturas espaciais e temporais de atributos da superfície, assim sendo, vários estudos tentam estimar o saldo de radiação ou seus componentes por combinação de observações de sensoriamento remoto com dados de superfície e da atmosfera (Diak & Gautier, 1983; Gautier *et al.*, 1980; Jacobs *et al.*, 2000; Ma *et al.*, 2002). O saldo de radiação (R_n) combinado com o fluxo de calor no solo assim como disponibilidade de energia, é capaz de estimar a evapotranspiração (ET). Bastiaanssen *et al.*, 1996; Jackson *et al.*, 1977; Seguin *et al.*, 1989, elaboraram nos últimos anos vários modelos para estimar a evapotranspiração baseados em observações de superfície. Vários dos recentes modelos de ET usam dados de sensoriamento remoto para estimativa de ET (por exemplo, Jiang & Islam, 2001, Nishida *et al.*, 2003; Norman *et al.*, 2003). Contudo, todos estes modelos de ET requerem estimativas de saldo de radiação (R_n).

O objetivo deste trabalho é explorar uma metodologia proposta por G. Bisht *et al.*, 2005 para gerar a distribuição espacial de saldo de radiação sobre áreas heterogêneas em dias de céu claro. A proposta de aproximação pretende eliminar ao máximo a necessidade de dados obtidos em superfície assim como contribuição de dados gerados por modelos.

A área de estudo compreende os diversos projetos de irrigação, localizados na região do Baixo Jaguaribe, mais precisamente no município de Quixeré, no estado do Ceará no Nordeste do Brasil, conforme é apresentado na Fig.(1).



Figura 1 – Local de estudo na fazenda Frutacor no município de Quixeré no Estado do Ceará.

Segundo informações do DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra a Seca), o clima da região é do tipo BSw'h' de acordo com a classificação climática de Köppen. A temperatura média anual é de 28,5°C, com mínima de 22° C e máxima de 35°C. A precipitação média anual é em torno de 772 mm, com distribuição de chuvas muito irregular, através dos anos. A umidade relativa média anual é de 62%, a velocidade média dos ventos é de 7,5 m.s⁻¹ e a evapotranspiração atinge a média anual de 3.215 mm. A região tem uma insolação de 3.030 horas.ano⁻¹.

2. Material e métodos

Os dados para validação, da estimativa do saldo de radiação por satélite, utilizados neste trabalho referem-se a uma série horária de saldo de radiação obtidos através das componentes do balanço de radiação, radiação de onda curta incidente ($R_C^\downarrow$), radiação de onda curta refletida ($R_C^\uparrow$), radiação de onda longa incidente ($R_L^\downarrow$) e radiação de onda longa emitida ($R_L^\uparrow$), medidos pelo saldo radiômetro instalado no local do experimento e durante o dia 25 de outubro de 2005, dia juliano 298, devido este dia apresentar o céu da região livre de nuvens.

Para estimativa do saldo de radiação por sensoriamento remoto, foram utilizados produtos MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – Imageador Espectroradiômetro de Resolução Moderada), que é um dos 5 instrumentos a bordo dos satélites TERRA e AQUA com uma altitude de 705km e tem uma cobertura global a cada 1 a 2 dias com 36 bandas espectrais entre 0,405 e 14,385 μm cuja resoluções espaciais são de 250, 500 e 1000m. Atualmente ele possui 44 dados de produtos e eles são divididos em cinco secções – calibração, atmosfera, superfície, criosfera e oceano. Neste estudo foram usados dados dos produtos atmosfera e superfície, os quais são disponíveis em formato de dados hierárquicos (HDF) e foram obtidos junto ao EOS Data Gateway (site: <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>). Uma breve descrição dos produtos usados está na Tab. (1).

Tabela 1- Produtos MODIS (AQUA/TERRA) utilizados no cálculo do saldo de radiação (Rn)

AQUA	TERRA	Produto	Resolução
MCD43B3	MCD43B3	*Albedo TERRA+AQUA	1km (espacial) Média de 16 dias (temporal)
MYD11A1_L2 MYD11B1	MOD11A1_L2 MOD11B1	*Temperatura da superfície e emissividade das bandas 29, 31 e 32. Hora de passagem do satélite.	1km (espacial) Diariamente
MYD07_L2	MOD07_L2	**Temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e ângulo zenital.	5km (espacial) Diariamente

*Produto MODIS/ superfície

**Produto MODIS/ atmosfera

2.1. Estimativa do saldo de radiação instantânea

O saldo de radiação (Rn) na superfície pode ser expresso em termos de seus componentes como

$$Rn = R_C^\downarrow - R_C^\uparrow + R_L^\downarrow - R_L^\uparrow \quad (1)$$

Onde $R_C^\downarrow$ e $R_C^\uparrow$ são fluxos de radiação de onda curta incidente e emitida (Wm^{-2}), respectivamente e $R_L^\downarrow$ e $R_L^\uparrow$ são fluxos de radiação de ondas longas incidentes e emitidas (Wm^{-2}), respectivamente.

As radiações de onda curta podem ser expressas como

$$R_C^\downarrow - R_C^\uparrow = (1 - \alpha) R_C^\downarrow \quad (2)$$

Onde α é a refletância da superfície terrestre (albedo).

Várias parametrizações para a radiação de onda curta incidente têm sido apresentadas na literatura. Em essência, radiação de onda curta incidente pode ser expressa como:

$$R_C^\downarrow = S_0 \tau_{sw} \cos \theta \quad (3)$$

Onde τ_{sw} é o fator de transmissividade de onda curta da atmosfera de céu claro, S_0 é a constante solar no topo da atmosfera, a qual é em torno de 1367 Wm^{-2} e θ é o ângulo zenital solar.

Para esse estudo, foi usado o esquema de parametrização desenvolvido por Zillman (1972), o qual utiliza pressão de vapor e_0 (hpa), dado pela Eq (4). Niemelä *et al.* (2001b) mostrou que o desempenho do esquema de parametrização de Iqbal's (1983) é melhor que o de Zillman(1972), porém ele requer informação a transmitância por espalhamento de Rayleigh, mistura de gases, vapor de água, aerossóis e ozônio. Tais informações não estão prontamente disponíveis, então foi usado o esquema de Zillman's (1972) no presente estudo.

$$R_C^\downarrow = \frac{S_0 \cos^2 \theta}{d} \quad (4)$$

Onde $d = 1,085 \cos \theta + e_0 (2,7 + \cos \theta) \times 10^{-3} + 0,1$.

A radiação de onda curta pode se expressa usando a equação de Steffan-Boltzmann como

$$R_L^\downarrow - R_L^\uparrow = \sigma \varepsilon_a T_a^4 - \sigma \varepsilon_s T_s^4 \quad (5)$$

Onde ε_a é a emissividade do ar, ε_s é a emissividade da superfície, T_a é a temperatura do ar (Kelvin) no nível de 1000mb, T_s é a temperatura da superfície (Kelvin) e $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$, é a constante de Steffan-Boltzmann. Prata (1996) desenvolveu um esquema de parametrização para radiação de onda longa incidente usando pressão de vapor d'água e temperatura do ar pela Eq (6), para simplificar o método apresentado aqui, foi usado o esquema de Prata's (1996).

$$R_L^\downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (6)$$

Onde $\varepsilon_a = [1 - (1 + \xi) \exp\{-(1,2 + 3 \xi)^{1/2}\}]$, e $\xi = 46,5 e_0 / T_a$. Outros parâmetros são obtidos usando dados dos produtos terrestres do Terra e Aqua - MODIS (temperatura da superfície terrestre, emissividade para bandas 31, 32 e 29, e albedo de céu claro e escuro e hora de passagem dos satélites) e dados dos produtos atmosféricos do Terra e Aqua - MODIS (Ângulo zenital solar, temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho).

2.2. Estimativa do ciclo diurno do saldo de radiação (SR)

Mapas de R_n diários certamente tem mais aplicações que mapas de saldo de radiação instantâneo, especialmente para modelos que tentam calcular a evapotranspiração (Jiang & Islam, 2001; Nishida et al., 2003; Norman et al., 2003). Usando uma aproximação similar, como a metodologia de Lagourade e Brunet's (1983), foi proposto um modelo senoidal para estimar o ciclo diurno do SR para dias de céu claro como:

$$Rn(t) = R_{n_max} \text{sen} \left[\left(\frac{t - t_{nasc}}{t_{pôr} - t_{nasc}} \right) \pi \right] \quad (7)$$

Onde R_{n_max} é o valor máximo de R_n observado durante o dia, t_{nasc} e $t_{pôr}$ é o tempo local em UTC no qual o valor do saldo de radiação se torna positivo e negativo, respectivamente.

O saldo de radiação máximo (R_{n_max}) pode ser dado pela Eq(8):

$$R_{n_max} = \frac{RnI}{sen\left[\left(\frac{t_{passagem} - t_{nasc}}{t_{pôr} - t_{nasc}}\right)\pi\right]} \quad (8)$$

Onde RnI é o saldo de radiação instantâneo e $t_{passagem}$ é a hora de passagem do satélite (UTC).

O dia estudado, os horários de passagem dos satélites, do nascer e do pôr do sol, latitude e longitude da cidade de Quixeré estão listados na Tab. (2).

Tabela 2 – Características gerais do dia e local do estudo.

Local	Quixeré-CE	Fazenda Frutacor
Latitude	05 04 23,49S	
Longitude	37 51 31,25W	
Data	25/10/2004 (dj=298)	dj=dia juliano
Hora nascer do sol	05:27h	5,456h (décimos)
Hora pôr do sol	17:35h	17,594h (décimos)
Hora de passagem do satélite TERRA	10:18h	10,30h (décimos)
Hora de passagem do satélite AQUA	13:06h	13,10h (décimos)

3. Resultados e discussões

Representa-se na Figura (2) o comportamento do saldo de radiação estimado pelo satélite TERRA para o período diurno, com início às 5h e término às 18h, comparado com os valores de saldo de radiação medidos instantaneamente a cada hora cheia pela estação automática. Dá-se ênfase aos valores medidos e estimados na hora aproximada da passagem do satélite, visto que o satélite TERRA passa pela região às 10h e 18min, porém a Fig.(2) marca às 10h.

É possível observar que os valores estimados mostraram comportamento semelhante aos valores medidos em superfície, porém os valores obtidos pelo satélite TERRA foram superestimados.

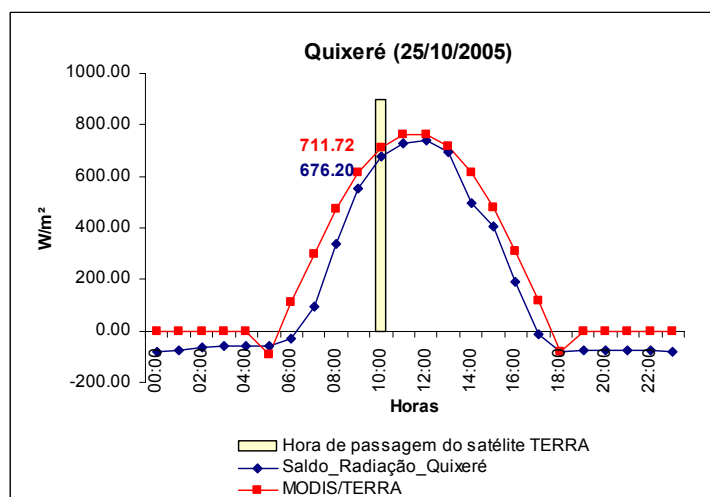


Figura 2 – Comparação entre o saldo de radiação estimado pelo satélite TERRA e a medida feita na estação.

Na Figura (3) mostra-se a porcentagem de aproximação entre os valores estimados pelo satélite TERRA e pela estação automática para cada hora do período diurno, onde é notada uma boa aproximação entre os valores estimados e os valores medidos, ocorrendo melhor aproximação das estimativas feitas para 9h, 10h, 11h, 12h, 13h, 15h e 18h com aproximação de 88,7%, 94,7%, 94,9%, 96,2%, 96,6%, 81,3% e 99,5% dos valores medidos respectivamente.

As estimativas feitas para as 5h, 6h, 7h, 8h, 14h, 16h e 17h apresentaram valores em 39,9%, 0%, 0%, 60,3%, 75,2%, 35,7% e 0% respectivamente, dos medidos na estação, mostrando não haver boa aproximação para valores de saldo de radiação nestes horários.

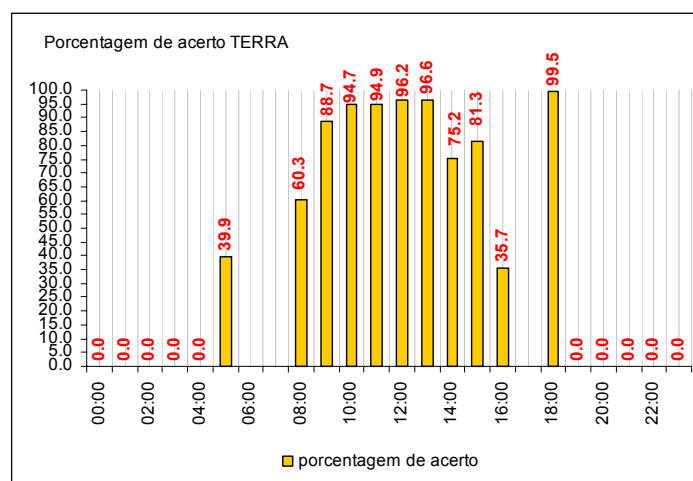


Figura 3 – Porcentagem entre os resultados obtidos pelo satélite TERRA e os valores medidos na estação automática.

Observa-se na Figura (4) o comportamento do saldo de radiação estimado pelo satélite AQUA também para o período diurno, com início às 5h e término às 18h, comparado com os valores de saldo de radiação medidos instantaneamente a cada hora cheia pela estação automática. Na Figura 4 também se dá ênfase aos valores medidos e estimados na hora aproximada da passagem do satélite, visto que o satélite AQUA passa pela região às 13h e 06min, porém a figura marca às 13h.

É possível observar que os valores estimados mostraram comportamento semelhante aos valores medidos em superfície, porém os valores obtidos pelo satélite AQUA foram superestimados para todo período diurno.

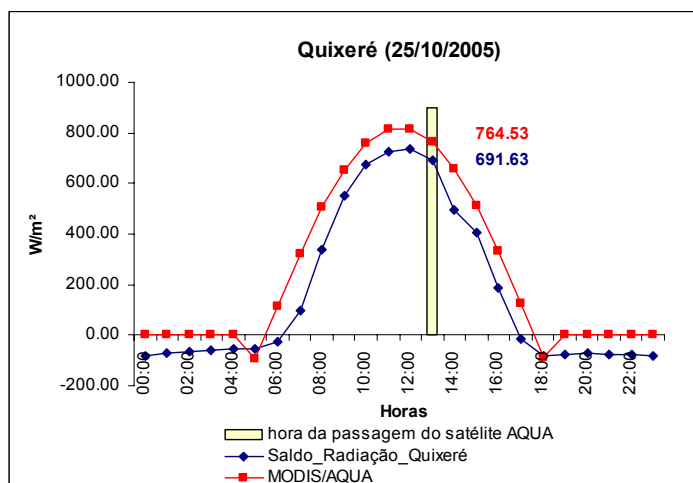


Figura 4 - Comparação entre o saldo de radiação estimado pelo satélite AQUA e a medida feita na estação.

A Figura (5) mostra a porcentagem de aproximação entre os valores estimados pelo satélite AQUA e pela estação automática para cada hora do período diurno e reforça a boa estimativa para os horários onde é notada uma boa aproximação entre os valores estimados e os valores medidos, ocorrendo melhor aproximação das estimativas feitas para 9h, 10h, 11h, 12h, 13h, 15h e 18h com aproximação de 81,0%, 87,5%, 87,7%, 89,1%, 89,5%, 73,2% e 93,6% dos valores medidos respectivamente.

As estimativas feitas para as 5h, 6h, 7h, 8h, 14h, 16h e 17h apresentaram valores em 32,4%, 0%, 0%, 50,7%, 66,6%, 24,4% e 0% respectivamente, dos medidos na estação, mostrando também não haver uma boa aproximação para valores de saldo de radiação nestes horários, assim como nos valores obtidos pelo satélite TERRA para esses horários, porém deve-se levar em consideração que durante esses horários pode ter ocorrido presença de nuvens e que o modelo com certeza não cobre. Observou-se também que os valores de saldo de radiação não se tornam positivos logo após o nascer do sol e nem negativos logo assim que o sol se põe, mas sim que, ocorre um atraso e um adiantamento em torno de 45 minutos na resposta do Rn em relação ao nascer e pôr do Sol respectivamente.

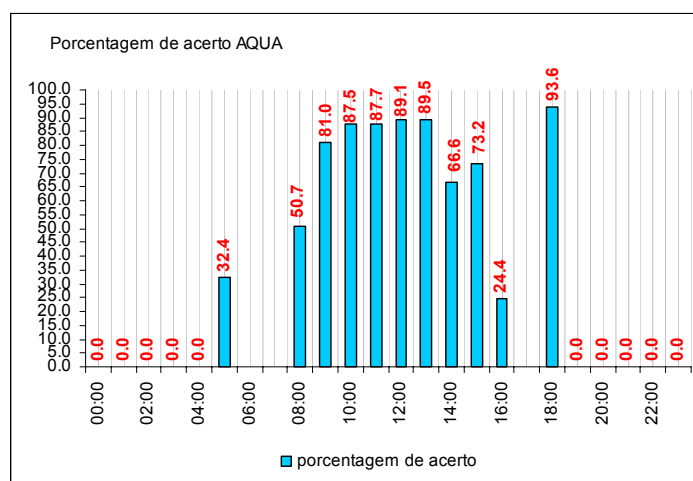


Figura 5 - Porcentagem entre os resultados obtidos pelo satélite TERRA e os valores medidos na estação automática.

4. Conclusões

Os resultados mostraram que o saldo de radiação estimado para o dia 25 de outubro de 2005 por técnicas de sensoriamento remoto e usando dados do sensor MODIS, a bordo dos satélites TERRA e AQUA, possui uma boa aproximação dos valores medidos em superfície na estação automática.

O Sensor à bordo do satélite Terra apresentou erros menores que 13% para às 9h, menor que 6% para 10h, 11h, 12h, 13h, 18h e menor que 20% para às 15h. Os demais horários (5h, 6h, 7h, 8h, 14h, 16h e 17h) foram superestimados acima de 25%. A técnica conseguiu estimar com boa precisão o saldo de radiação instantâneo (RnI) no local de estudo na hora da passagem do satélite TERRA (94,7%), demonstrando ser viável o uso de produtos do Sensor MODIS/TERRA para estimar o saldo de radiação em grandes áreas.

O Sensor à bordo do satélite AQUA apresentou valores superestimados menores que 20% para às 9h, menor que 13% para 10h, 11h, 12h, 13h, 18h e menor que 27% para às 15h. Os demais horários (5h, 6h, 7h, 8h, 14h, 16h e 17h) foram superestimados acima de 34%. A técnica conseguiu estimar com boa precisão o saldo de radiação instantâneo (RnI) no local de estudo na hora da passagem do satélite AQUA (89,5%), demonstrando ser viável o uso de produtos do sensor MODIS/AQUA para estimar o saldo de radiação em grandes áreas.

Os valores estimados com dados dos produtos do satélite TERRA foram mais precisos do que os estimados com os dados dos produtos do AQUA para esse dia, porém seriam necessários mais dias de estudos para que mostrasse qual satélite obtém melhores resultados, basicamente em função da sua hora de passagem, pois o sensor é consideravelmente o mesmo.

5. Referências

- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Menenti, M., & Feddes, R. A., 1996, "Estimation of surface resistance and Priestley–Taylor a-parameter at different scales", In J. Stewart, E. Engman, R. Feddes, & Y. Kerr (Eds.), *Scaling up in hydrology using remote sensing* (pp. 93–111). New York: Wiley.
- Bisht, G.; Venturini, v.; Islama, S., Jiang, LE., 2005, "Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days", *Remote Sensing of Environment* 97, 52 – 67.
- Diak, G. R., & Gautier, C., 1983, "Improvements to a simple physical model for estimating insolation from GOES data", *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, 505–508.
- Gautier, C., Diak, G., & Masse, S., 1980, "A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data", *Journal of Applied Meteorology*, 19, 1005– 1012.
- Geiger, R., 1961, "Manual de microclimatologia: o clima da camada de ar junto ao solo", 3.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian,. 556p.
- Iqbal, M., 1983, "An introduction to solar radiation" (pp. 169–213). Academic Press.
- Jackson, R. D., Reginato, R. J., & Idso, S. B., 1977, "Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements". *Water Resources Research*, 13, 651– 656.

- Jacobs, J. M., Myers, D. A., Anderson, M. C., & Diak, G. R. 2000. "GOES surface insolation to estimate wetlands evapotranspiration". *Journal of Hydrology*, 266, 53– 65.
- Jiang, L., & Islam, S., 2001, "Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data", *Water Resources Research*, 37(2), 329–340.
- Lagouarde, J. P., & Brunet, Y., 1983, "A simple model for estimating the daily upward longwave surface radiation flux from NOAA–AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, 14(5), 907–925.
- Ma, Y., Su, Z., Li, Z., Koike, T., & Menenti, M. 2002, "Determination of regional net radiation and soil heat flux over a heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau", *Hydrological Processes*, 16, 2963–2971.
- Monteith, J.L.; Unsworth, M.H., 1990, "Principles of environmental physics", 2.ed. London: Edward Arnold, 291p.
- Niemelä, S., Raisanen, P., & Savijarvi, H., 2001a, "Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part I. Longwave radiation", *Atmospheric Research*, 58, 1– 18.
- Niemelä, S., Raisanen, P., & Savijarvi, H., 2001b, "Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part II. Shortwave radiation", *Atmospheric Research*, 58, 141–154.
- Nishida, K., Nemani, R. R., Running, S. W., & Glassy, J. M., 2003, "An operational remote sensing algorithm of land evaporation", *Journal of Geophysical Research*, 108(D9), 4270.
- Norman, J. M., Anderson, M. C., Kustas, W. P., French, A. N., Mecikalski, J., TORN, R., *et al.*, 2003, "Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions", *Water Resources Research*, 39(8), 1221.
- Pezzopane, J.E.M.; Pedro Júnior, M.J.; Ortolani, A.A.; Meyer, N., 1995, "Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno", *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.3, p.1-4.
- Prata, A. J., 1996, "A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 1127– 1151.
- Seguin, B., Assad, E., Freaud, J. P., Imbernon, J. P., Kerr, Y., & Lagouarde, J. P., 1989, "Use of meteorological satellite for rainfall and evaporation monitoring", *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1001– 1017.
- Zillman, J. W., 1972, "A study of some aspects of the radiation and heat budgets of the southern hemisphere oceans", *Meteorol. Studyl* 26, Bur. Of Meteorol.. Canberra, Australia' Dept. of the Inter.