



Estimativas da radiação de onda longa incidente sobre floresta tropical úmida do leste da Amazônia

Glauber Guimarães Cirino da Silva, INPA, Brasil
José Ricardo Santos de Souza, UFPA, Brasil
Simone Nazaré Rodrigues da Silva, UFPA, Brasil
Júlia Clarinda Paiva Cohen, UFPA, Brasil
Everaldo Barreiros de Souza, UFPA, Brasil
Ana Paula Paes dos Santos, UFPA, Brasil

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Atmospheric radiation components (incident and reflected solar radiation, incoming and outgoing long wave radiation) and net radiation flux, were measured by sensors installed at 52 m height above ground, over Caxiuanã's forest, in eastern Amazonia. A data logger sampled these variables at 30 minutes intervals producing two sets of data. The first corresponding to a three month (March to May) period of the local rainy season and the second collected during the dry season (August to October) of 2005. This experiment allowed to determine the whole radiation average balance over this native forest site, and to point out the differences of hourly behaviors of the variables for different seasons. Comparisons between the results of this study and others performed at other forest and pasture sites in the Amazon were made. An evaluation of the performance of empiric equations derived by other authors, to estimate the long wave atmospheric radiation, was made, considering the measured values of this variable, during selected cloudy and clear sky days.

Introdução

O presente estudo é parte integrante do experimento Milênio - LBA / UFPA desenvolvido na Estação Científica Ferreira Pena (ECFPn), localizada na reserva florestal de Caxiuanã/Melgaço-Pará. Neste sítio experimental equipes de pesquisadores da UFPA vêm estudando as propriedades físicas do solo e interações entre a floresta e a atmosfera imediatamente acima do topo do dossel. Nesse contexto, estudos envolvendo a radiação solar também vêm sendo alvo de atenção, tendo em vista ser esta a principal fonte de energia para os processos físicos, biofísicos e biológicos que ocorrem na biosfera (LEITÃO, 1994). O sol emite radiação em praticamente todos os comprimentos de onda, embora, 99,99% da energia solar se situe na faixa espectral compreendida entre 0,15 e 4 μ , conhecida como domínio da radiação solar. Nesse intervalo, aproximadamente 52% da energia solar que atinge a superfície terrestre está na faixa espectral do infravermelho, restando 44% na banda espectral do visível e apenas 4% na do ultravioleta (LEMON, 1965). Ao penetrar na atmosfera, boa parte da

radiação solar incidente (\cong 30%) é refletida pelas superfícies líquidas e sólidas da terra, constituindo o albedo planetário. Outras perdas (\cong 19%) ocorrem devido à absorção de radiação solar pelo ozônio (O₃), vapor d'água (H₂O) e dióxido de carbono (CO₂), restando ainda, um percentual próximo de 51% de radiação solar que atinge diretamente e/ou difusamente a superfície terrestre (radiação solar global). Ao incidir na superfície a radiação solar, converte-se em calor e é emitida para a atmosfera na forma de radiação de onda longa, na qual se encontra quase que totalmente no intervalo espectral de comprimento de onda que se estende entre 4 a 100 μ m, recebendo assim, a denominação de radiação termal ou de onda longa - ROL (OKE, 1987). A radiação de onda longa atmosférica (L \downarrow), especificamente estudada neste trabalho, é o fluxo radiante de energia resultante da emissão dos gases atmosféricos e de superfícies líquidas e sólidas da Terra. Todo corpo cuja temperatura esteja acima de 0K, emite e absorve radiação (Princípio de Prevot). Os corpos sobre a Terra possuem uma temperatura mais baixa que a do Sol, de modo que a radiação que eles emitem tem máximo espectral em comprimentos de ondas maiores que a da radiação solar global. Na Amazônia praticamente não existem medidas regulares de radiação de onda longa da atmosfera, mesmo sendo esta uma variável importante no cálculo do balanço de radiação à superfície, pois representa a contribuição da atmosfera e engloba informações de nebulosidade e concentração de vapor d'água (GALVÃO, 2000). Em várias situações práticas da meteorologia, ainda é eficiente estimá-la baseando-se em observações de variáveis mais facilmente medidas (BRUTSAERT, 1982), ou por diferença e/ou resíduos, através da equação do balanço de radiação (ARYA, 1988), ou estimadas por várias equações, como por exemplo, as equações de BRUNT (1932), SWINBANK (1963), IDSO & JACKSON (1969), BRUTSAERT (1975) e SATTERLUND (1979). Dessa forma, a utilização de equações empíricas para estimativa de radiação de onda longa atmosférica tornou-se um modo alternativo largamente utilizado. Os produtos oriundos de previsão numérica de tempo e de clima têm sido bastante utilizados nos centros de previsão de tempo, já que a determinação dos fluxos de calor sensível e latente, nos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) é obtida a partir de cálculos do balanço de radiação na superfície. Fórmulas empíricas, em alguns casos, parametrizam a contribuição de onda longa nesses modelos (GALVÃO, 2000) e, portanto, estimativas mais precisas dos fluxos de onda longa, certamente melhorarão a eficiência dos mesmos.

Estudos envolvendo ajustes de coeficientes de modelos empíricos de estimativa de (L_{\downarrow}), e mais especificamente, os estudos de balanço de radiação, especialmente os de onda longa, com respeito a outros autores, foram realizados por MANZI, et al., (1986), ANDRÉ et al., (1988), SÁ et al., (1988), BASTABLE et al., (1993), RIBEIRO (1994), CULF et al., (1996), FEITOSA (1996) e RESCHKE (1996). Mais recentemente ainda por, GALVÃO (2000), SILVA, (2002), SENKOVA, (2003), YAMASOE et al., (2006) e VICTÓRIA et al., (2008). Esses trabalhos foram realizados sobre vários tipos de ecossistemas (pasto, pantanal, etc.), alguns, sobre coberturas superficiais de baixo porte, tais como, milho, alfaça, soja, feijão, entre outras. Porém, poucos estudos abordaram as correções desses coeficientes sobre coberturas superficiais rugosas de floresta tropical úmida como a Amazônia. Além disso, esses “modelos”, ou equações de estimativa de ROL, não foram testados para diversos pontos do ecossistema florestal Amazônico, isto é, pouco se sabe sobre a validação e eficiência desses modelos em outros sítios experimentais; representativos desse tipo de ecossistema.

Objetivou-se, com este trabalho, não somente analisar os vários componentes do balanço de radiação, como também, avaliar o desempenho de fórmulas empíricas não ajustadas para as condições locais de floresta, a fim de obter informações que auxiliem na determinação de quais modelos são mais eficientes ou mais válidos para estimar a ROL atmosférica sobre esse tipo de ecossistema da Amazônia, representado nesse estudo, por observações feitas na torre micrometeorológica de Caxiuanã, Melgaço-Pará. Assim sendo, metodologias semelhantes à de outros autores, empregadas para corrigir os modelos citados às condições locais, serão utilizadas nesse trabalho com a finalidade de verificar a acurácia das mesmas para outros tipos de ecossistemas ou cobertura superficial, e futuramente, em outros pontos da floresta amazônica.

Métodos

Características e localização da área de estudo

A área experimental está localizada na floresta nacional de Caxiuanã (latitude 01° 42' 30" S e longitude 51° 31' 45" W), onde foi implantada a estação científica Ferreira Pena – ECFPn administrada pelo Museu Paraense Emílio Goeldi. A base física da estação está localizada no Centro-Oeste do estado do Pará, no município de Melgaço, distante 400 km de Belém-PA em linha reta. A ECFPn abrange uma área de 33.000 hectares da qual 80% corresponde a floresta de terra firme e 20% a floresta de várzea e igapó, além de uma abundante vegetação aquática (LISBOA et al., 1997). No aspecto climático, a região de Caxiuanã apresenta o tipo climático Am segundo a classificação de Köppen, ou seja, clima tropical de monção; com breve estação seca e chuvas intensas durante o resto do ano.

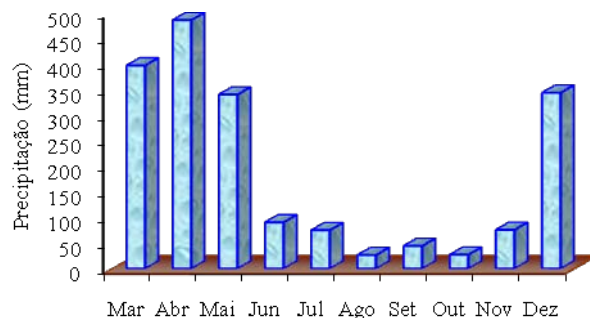


Figura 1 - Valores médios de precipitação para a região de Caxiuanã (PA). Série climatológica, período de 1960 a 2005. Fonte: COSTA, et al.(1998).

Instrumentação e dados

O período de dados selecionados para este estudo foi de 05 de março a 31 de maio (mês chuvoso), 01 de junho a 31 de julho (mês transição) e 01 de agosto a 31 de outubro (estação menos chuvosa) de 2005. Portanto foram escolhidos 03 três meses representativos da estação chuvosa e menos chuvosa e 02 dois meses de transição.

Os valores de radiação de onda longa incidente foram estimados a partir das equações empíricas: 1) BRUNT (1932); 2) SWINBANK (1963); 3) IDSO & JACKSON (1969); 4) SATTERLUND (1979); e da equação analítica de 5) BRUTSAERT (1975), conforme a tabela abaixo (tabela 1).

Tabela 1 - Equações empíricas com os coeficientes não ajustados às condições de floresta, no leste da Amazônia.

MÉTODOS EQUAÇÕES NÃO AJUSTADAS
(1) BRUNT (1932)
$L_{\downarrow} = \sigma T^4 \left[\left(0,51 + 0,06 \cdot e^{\frac{1}{2}} \right) \right]$
(2) SWINBANK (1963)
$L_{\downarrow} = 9,2 \cdot 10^{-8} \cdot \sigma T^4$
(3) IDSO & JACKSON (1969)
$L_{\downarrow} = \sigma T^4 \left[1 - 0,2 \cdot \exp \left[-7,77 \cdot 10^{-4} (273 - T)^2 \right] \right]$
(4) BRUTSAERT (1975)
$L_{\downarrow} = 1,08 \cdot \sigma T^4 \left[1 - \exp \left(-\frac{e}{2015} \right) \right]$
(5) SATTERLUND (1979)
$L_{\downarrow} = 1,24 \cdot \sigma T^4 \left(\frac{e}{T} \right)^{\frac{1}{2}}$

Onde: (e) é a pressão de vapor (hPa) e (T) a temperatura do ar ($^{\circ}$ K) obtida a 52 m de altura na torre micrometeorológica da ECFPn. Sigma é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). As equações acima são todas empíricas, exceto a de BRUTSAERT, que é derivada da equação de transferência radiativa de Schwarzschild para dias sem nuvens, em condições atmosféricas próximas à da atmosfera padrão.

Como a maior parte das formulações propostas para a estimativa da irradiância de onda longa são válidas somente para condições de céu claro, torna-se necessário selecionar no período considerado apenas os dias claros para análise. A nebulosidade pode ser expressa em termos da transmissividade (NKEMDIRIM, 1972), a qual é obtida dividindo-se a radiação de ondas curtas recebida ($K\downarrow$) à superfície, pela radiação global incidente no topo da atmosfera (R_0). Assim, as três faixas de transmissividade ou emissividade consideradas são: inferior a 0,25, intervalo 0,25 - 0,50 e superior a 0,50, correspondendo a condições de céu nublado, parcialmente nublado e sem nuvens, respectivamente, conforme SILVA. (2002).

Para a análise dos termos do balanço de radiação na floresta, calculou-se médias a cada 30 min. do saldo de radiação (R_n), radiação solar incidente ($K\downarrow$), radiação solar refletida ($K\uparrow$), radiação de onda longa da atmosfera ($L\downarrow$) e radiação de onda longa emitida pela superfície ($L\uparrow$), em condições de Céu Claro (CC). Estes dias foram selecionados do conjunto total de dados (de março a outubro, 2005).

Este procedimento pode ser utilizado tendo em vista que as nuvens são fortes emissoras de radiação de ondas longas (CULF et al., 1995; GALVÃO, (2000); SOUZA FILHO, (2006). Para determinar a Irradiância Solar Extraterrestre Instantânea (R_0), a equação utilizada foi:

$$R_0 = \int I_z dh = \int S_0 \left(\frac{d}{D^2} \right) \cos Z dh \quad (1)$$

Integrando-se os valores instantâneos de I_z , determina-se a irradiância solar extraterrestre diária (R_0). Essa é a energia disponível em um dia em dada latitude, sem se considerar os efeitos atenuantes da atmosfera. Os valores de R_0 serão bastante úteis em Meteorologia, sendo empregados em métodos de estimativa da irradiância solar global na superfície terrestre, na estimativa da evapotranspiração e em métodos de estimativa da produtividade potencial de culturas agrícolas.

Desenvolvendo-se a integral acima, têm-se que R_0 é uma função da latitude e da época do ano (declinação solar). A equação de estimativa de R_0 será:

$$R_0 = 37,6 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \left[\frac{\pi}{180} hn \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\sigma) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\sigma) \cdot \sin(hn) \right] \quad (2)$$

Onde: R_0 é a irradiância solar extraterrestre instantânea ($W \cdot m^{-2}$), S_0 é a constante solar ($1.367 W \cdot m^{-2}$), d / D^2 é a razão entre a distância média terra-sol ($d = u.a = 149 \cdot 10^6$ km) e D , a distância terra-sol para um dia Juliano qualquer. $\cos Z$ é o ângulo zenital, ou seja, o ângulo formado entre os raios solares e o zênite local. h e hn são respectivamente: ângulo horário e ângulo horário do nascer do sol. As equações para determinação de h e hn , podem ser facilmente encontradas em SILVA (2000) e SOUZA FILHO (2002). A letra grega (φ) e (σ), representam a latitude do local e a declinação solar, respectivamente.

Tabela 2 - Valores integrados diurnos da radiação da solar incidente (R_g) e da radiação solar extraterrestre (R_{g0}), para 120 dias selecionados durante o período de céu claro (CC) e 106 de céu nublado (CN).

Dia / CC	R_{g0} M.J.m ⁻²	R_g M.J.m ⁻²	R_g/R_{g0}
Média	34,7	21,2	0,61
Máximo	38,1	24,9	0,73
Mínimo	32,7	17,2	0,52
Dia / CN	R_{g0} M.J.m ⁻²	R_g M.J.m ⁻²	R_g/R_{g0}
Média	36,4	18,4	0,50
Máximo	38,1	24,9	0,73
Mínimo	32,7	10,3	0,32

Resultados e Discussões

Componentes do balanço de radiação

Os componentes do balanço de radiação (Figura 2) apresentam um ciclo diário bem definido, onde nota-se que o saldo de radiação (R_n) e $K\downarrow$ acompanham a variação de $K\downarrow$ durante o dia, sendo que os valores máximos de $K\downarrow$ e $K\uparrow$ ocorrem as 13 HL (hora local) chegando a $800 W \cdot m^{-2}$ e $85 W \cdot m^{-2}$, respectivamente. O valor máximo de R_n ($639 W \cdot m^{-2}$) foi observado as 12 HL e o da $K\downarrow$ ($462 W \cdot m^{-2}$) as 16 HL, coincidentemente no mesmo horário do valor máximo da $K\downarrow$ ($410 W \cdot m^{-2}$). Durante o período diurno, o saldo de radiação (R_n) é dominado pelas trocas radiativas de ondas curtas ($K\downarrow$ e $K\uparrow$), e o coeficiente de reflexão (α - albedo) governa o saldo recebido de $K\downarrow$. No período noturno, o saldo de radiação é composto exclusivamente pelos fluxos de ondas longas ($L\downarrow$ e $L\uparrow$), cujas perdas na superfície são controladas pela temperatura e pela emissividade da superfície. Ao contrário do que foi encontrado por Galvão (2000) para o caso de pastagem, o balanço de ondas longas ($L\downarrow$ - $L\uparrow$) em Caxianã, se mostrou sempre negativo pelo fato da radiação reemitida pela superfície ($L\uparrow$) ter sido sempre maior que a radiação de onda longa emitida pela atmosfera ($L\downarrow$). A energia média diurna de $K\downarrow$ durante o período de Céu Claro (CC) foi igual a $20,3 MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$. Para o saldo de radiação (R_n) essa energia foi de $14,4 MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ com a energia de $K\uparrow$ igual a $2,25 MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$, seguida da $K\downarrow$ com valor médio de $33 MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ e da radiação reemitida pelo dossel ($L\uparrow$) com valor de $36,5 MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$. Os valores encontrados neste trabalho para cada um dos componentes do balanço de radiação (Figura 1) estão todos de acordo com os resultados obtidos para um período curto de observações feitas por SOUZA FILHO, et al., (1999). A Figura 2 mostra que o ciclo diário da $ROL\downarrow$, apresenta-se bem definido nas situações de CC e CN, com menores valores registrados durante os dias de CN a partir das 08 horas locais, até o início da noite. No período noturno de CC os valores da $ROL\downarrow$ foram sensivelmente menores que aqueles verificados no período noturno de CN. Portanto em situações de CN a atmosfera se mostra sensivelmente mais aquecida entre as 01 e 09 HL. Esta diferença pode estar relacionada às

diferentes quantidades existentes de vapor d'água, dióxido de carbono, ozônio e aerossóis na atmosfera, os quais exercem influência direta sobre a emissividade da atmosfera durante esses horários, conforme sugerido por MENDONÇA et al., (1996). Os máximos valores da emissividade são observados às 16 HL no período de Céu Claro (CC) com 0,855, o que corresponde ao valor máximo de ROL atmosférico atingido (410 W.m^{-2}) e as 13 HL no período Nublado com 0,850, correspondendo ao máximo de ROL atmosférico atingido (385 W.m^{-2}). A maior diferença de L_{\downarrow} entre os dois períodos ocorre às 16 HL (33 W.m^{-2}).

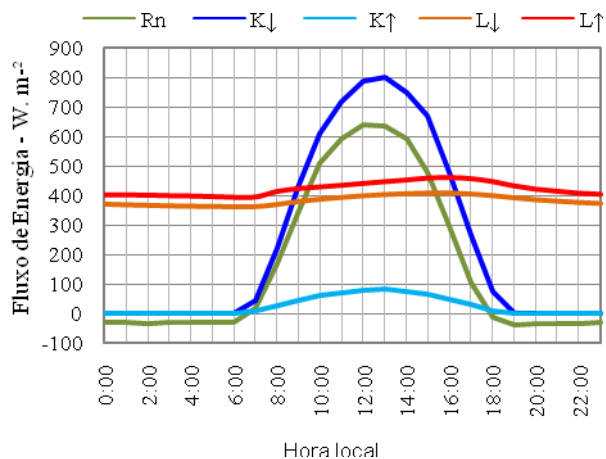


Figura 2 - Variação média horária dos componentes do balanço de radiação: radiação solar global incidente (K_{\downarrow}), radiação solar refletida (K_{\uparrow}), saldo de radiação (R_n), radiação de onda longa atmosférica (L_{\downarrow}) e radiação de onda longa emitida pela superfície (L_{\uparrow}), durante o período de 120 dias de céu claro (CC). Caxiuana / PA, 2005.

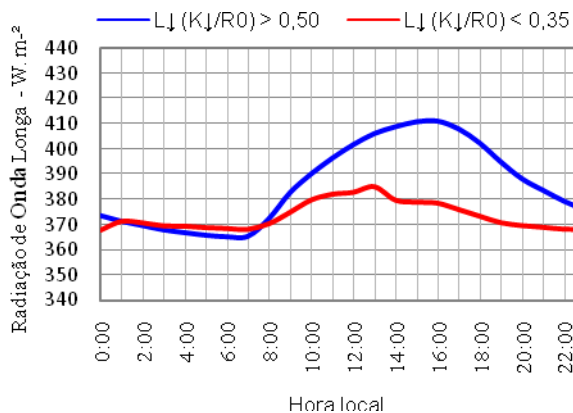


Figura 3 - Variação média horária da radiação de onda longa da atmosfera (L_{\downarrow}) durante o período de 120 dias de céu claro (CC) e 106 dias de céu nublado (CN). Caxiuana / PA, 2005.

O fluxo médio diário de radiação de onda longa durante o período de Céu Claro (CC) foi de 387 W.m^{-2} , superior ao do período de Céu Nublado (CN) que apresentou um valor médio igual a 373 W.m^{-2} . Estes resultados chegam próximos daqueles encontrados por SHUTTLEWORTH, et al., (1984), que foi de 412 W.m^{-2} , considerando

apenas seis dias de medidas contínuas dos comportamentos do balanço de radiação no mês de setembro de 1983, na Reserva Florestal Ducke. BASTABLE et al., (1993) obtiveram, a partir do balanço de ondas longas para a reserva Ducke, valores médios diários da (L_{\downarrow}) iguais a $411,1 \text{ W.m}^{-2}$ e $418,2 \text{ W.m}^{-2}$ para períodos das estações seca (12 a 12/10/1990) e chuvosa (1 a 10/12/1990), respectivamente. Ressalta-se que no primeiro caso, os valores foram calculados como resíduos do balanço de radiação e no segundo estimados pelo valor da temperatura do ar obtida em abrigo meteorológico ($L_{\downarrow} \cong \sigma \cdot T_{\text{abrigo}}^4$) e não a partir de medidas diretas, como é o caso deste estudo. Ao contrário do encontrado por GALVÃO, et al., (2000), observa-se na figura 3 que a variação média diurna da (L_{\downarrow}) medida, ficou entre os valores diurnos estimados pelas equações empíricas citadas. Porém as equações de Brutsaert e Swinbank superestimaram os valores da (L_{\downarrow}) medida pelo saldo-radiômetro (Kipp & Zonen) durante todas as horas do dia. Os demais modelos subestimam a (L_{\downarrow}) medida. Isso pode ter ocorrido devido os coeficientes utilizados nessas equações serem específicos para a localidade onde foram desenvolvidos, diferentes das condições ambientais encontradas em área de floresta tropical na Amazônia.

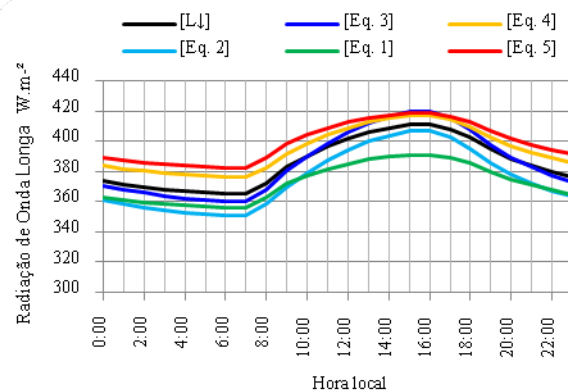


Figura 4 - Variação média horária da radiação de onda longa da atmosfera (L_{\downarrow}) medida e estimada pelos modelos de Brunt (Eq. 1), Swinbank (Eq. 2), Idso & Jackson (Eq. 3), Satterlund (Eq. 4) e Brutsaert (Eq. 5) durante o período de 120 dias de Céu Claro (CC). Caxiuana / PA, 2005.

Estimativa da (L_{\downarrow}) por equações clássicas

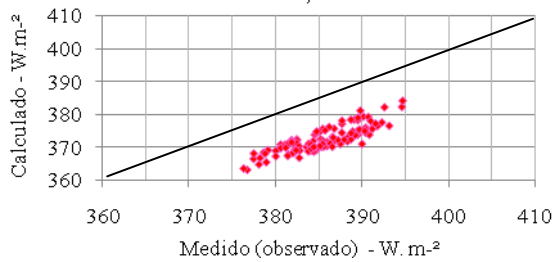
A Figura 5 apresenta correlações lineares entre os valores medidos de (L_{\downarrow}) e os valores estimados pelos modelos citados. Todos os coeficientes de regressão linear (R^2) obtidos foram maiores que 0,70, podendo ser considerados de boa estimativa. O modelo de Satterlund apresentou um (R^2) que pôde chegar próximo à unidade. Portanto as figuras abaixo mostram as fórmulas empíricas que podem sofrer ajustes em seus parâmetros, isto é, modelos que podem ser melhorados a partir de dados meteorológicos medidos em Caxiuana. Embora essas correlações tenham apresentado valores de R^2 acima de 0,70, uma análise estatística detalhada se fez necessário, a fim de verificar a veracidade de tais correlações. De acordo com IQBAL (1983), comparar

valores calculados através de modelos de estimativa de radiação incidente em superfícies horizontais ou inclinadas com valores medidos não é suficiente para comprovar a acurácia dos modelos de radiação, o que torna necessário utilizar outros testes estatísticos. Os mais utilizados baseiam-se nos cálculos do Erro Médio Absoluto (EMA), Desvio Médio Quadrático (DMQ) e Coeficiente de Correlação (R). Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos foram: 0,716 (Brunt), 0,848 (Brutsaert), (0,904) Idso & Jackson, (0,904) Swinbank e Satterlund (0,998), conforme a (Tabela 2).

Brunt (1932)

$$y = 0,797x + 65,2$$

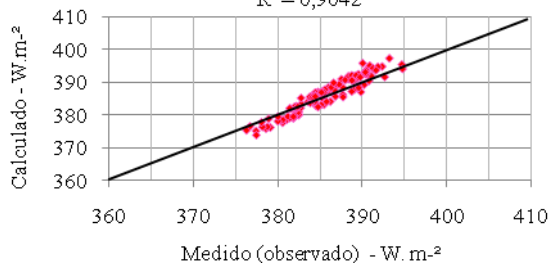
$$R^2 = 0,7165$$



Idso & Jackson (1969)

$$y = 1,2837x - 108,79$$

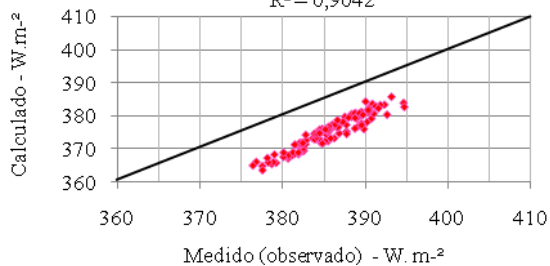
$$R^2 = 0,9042$$



Swinbank (1963)

$$y = 1,2092x - 90,956$$

$$R^2 = 0,9042$$



Brutsaert (1975)

$$y = 0,8225x + 81,862$$

$$R^2 = 0,8484$$

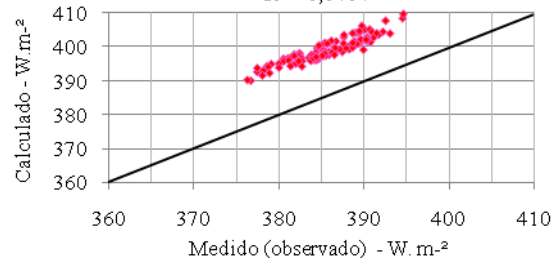


Figura 5 - Comparação entre os valores medidos de radiação de onda longa da atmosfera (\downarrow) e os valores estimados pelos modelos de Brunt; Idso & Jackson (esquerda) e Swinbank; Brutsaert (direita) para 120 dias de céu claro (CC) selecionados. Caxiuanã /PA, 2005.

Tabela 3 - Resultados estatísticos das equações empíricas com os coeficientes ajustados às condições locais de floresta ($W.m^{-2}$) e os diferentes efeitos das estimativas de $L(\downarrow)$ sobre a energia média diurna integrada do saldo de radiação (R_n) durante 120 dias de céu claro para os respectivos métodos: BRUNT (1932), SWINBANK (1963), IDSON & JACKSON (1969) E BRUTSAERT (1975).

Métodos	R^2	DMQ	EMA	ERRO %
Brunt	0,7165	9,246	31,51	-8,38
Swinbank	0,9042	14,590	28,80	-7,45
Idso & Jack.	0,9042	15,400	17,89	-4,42
Brutsaert	0,8484	9,335	5,020	1,35

A Figura 6 apresenta correlações lineares entre os valores medidos de (\downarrow) e os valores estimados pelos modelos citados. Todos os coeficientes de regressão linear (R^2) obtidos foram maiores que 0,70, podendo ser considerados de boa estimativa. O modelo de Satterlund apresentou um (R^2) que pôde chegar à unidade. Portanto as figuras abaixo mostram as fórmulas empíricas que podem sofrer ajustes em seus parâmetros, isto é, modelos que podem ser melhorados a partir de dados meteorológicos medidos em Caxiuanã. Embora essas correlações tenham apresentado valores de R^2 acima de 0,70, uma análise estatística detalhada se faz necessário, a fim de verificar a veracidade de tais correlações. Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos foram: 0,716 (Brunt), 0,848 (Brutsaert), (0,904) Idso & Jackson, (0,904) Swinbank e Satterlund (0,998).

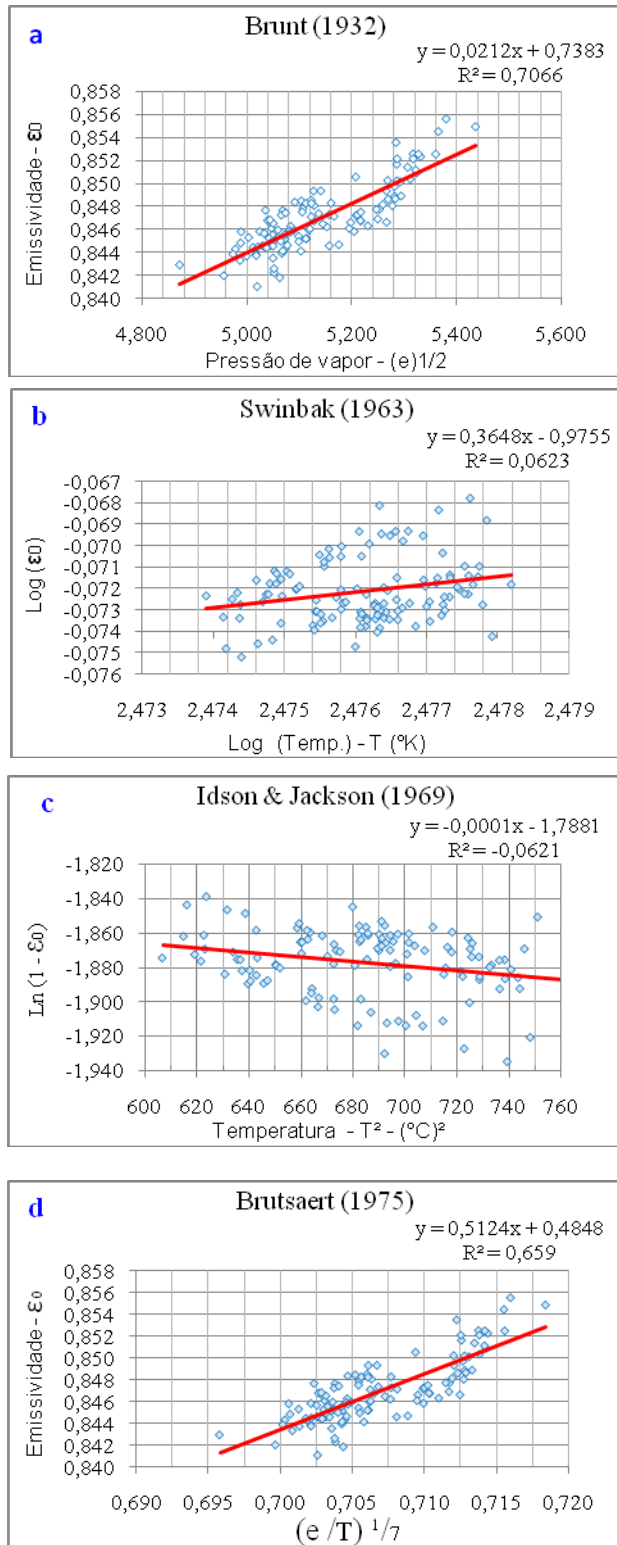


Figura 6 - Ajuste local dos coeficientes dos modelos de Brunt (a), Swinbank (b), Idso & Jackson (c) e Brutsaert (d), a partir dos dados horários medidos durante 120 dias de céu claro.

Tabela 4 - Equações empíricas com os coeficientes ajustados às condições de Floresta Tropical Úmida na Amazônia. Caxiuanã /PA, 2005.

MÉTODOS	
EQUAÇÕES AJUSTADAS PARA O LOCAL	
1. BRUNT (1932)	$L \downarrow = \sigma T^4 \left[\left(0,7383 + 0,0212 \cdot e^{1/2} \right) \right]$
2. SWINBANK (1963)	$L \downarrow = \sigma T^4 \left[10^{(-0,9755 + 0,3648 \log T)} \right]$
3. IDSO & JACKSON (1969)	$L \downarrow = \sigma T^4 \left[1 - 0,2 \cdot \exp[-1,79 - 0,0001 \cdot (273 - T)^2] \right]$
4. BRUTSAERT (1975)	$L \downarrow = 1,24 \cdot \sigma T^4 \left[0,4848 + 0,5124 \cdot \left(\frac{e}{T} \right)^{1/7} \right]$

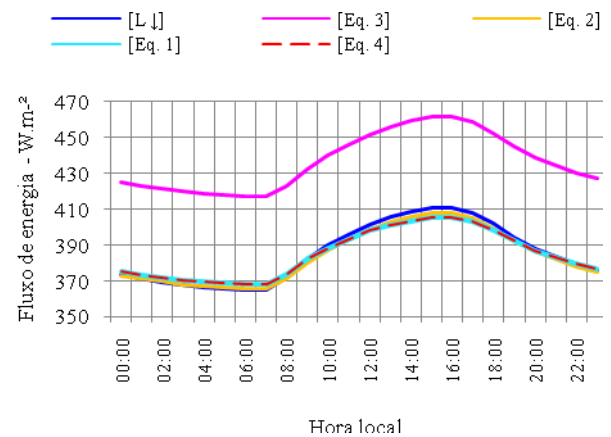


Figura 7 - Variação média horária da radiação de onda longa da atmosfera ($L \downarrow$ - medida) e estimada pelos modelos de Brunt (Eq. 1), Swinbank (Eq. 2), Idso & Jackson (Eq. 3), Satterlund (Eq. 4) e Brutsaert (Eq. 5), figura (esquerda) e Variação média horária da emissividade atmosférica figura (direita) durante o período de 120 dias de Céu Claro (CC).

Tabela 5 - Resultados estatísticos das equações empíricas com os coeficientes ajustados e os diferentes efeitos das estimativas de L_d sobre a energia média diurna integrada do saldo de radiação (R_n) durante o período de céu claro para os respectivos métodos (de cima para baixo): BRUNT (1932), SWINBANK (1963), IDSON & JACKSON (1969); BRUTSAERT (1975) E SATTERLUND (1979).

Métodos	R ²	DMQ	EMA	ERRO %
Brunt	1,000	4,88	-0,56	-0,31
Swinbank	0,9040	5,26	-1,42	-0,31
Ids. & Jack.	0,9042	5,70	51,3	13,29
Brutsaert	0,999	4,81	-0,55	-0,12

Conclusão e Sugestões

Os componentes do balanço de radiação apresentaram um ciclo diário bem definido, com os valores mais elevados ocorrendo durante o período diurno e os menores durante o período noturno. Durante o período diurno, o saldo de radiação (R_n) é dominado pelas trocas radiativas de ondas curtas (K_{\downarrow} e K_{\uparrow}), e o coeficiente de reflexão (α = albedo) controla o saldo recebido de K_{\downarrow} . No período noturno, o R_n é composto exclusivamente pelos fluxos de ondas longas (L_{\downarrow} e L_{\uparrow}), cujas perdas na superfície, são controladas pela temperatura e pela emissividade da superfície. As estimativas da (L_{\downarrow}) a partir dos modelos de BRUNT, (1932); SWINBANK, (1963) e IDSO & JACKSON, (1969) subestimaram os valores da (L_{\downarrow}) medida. Por outro lado, as equações de SATTERLUND (1979) e BRUTSAERT (1975) superestimam os valores medidos da (L_{\downarrow}). Portanto o perfil médio horário da radiação de onda longa atmosférica representa, neste estudo, a média dos valores calculados pelos modelos, sem defasagens horárias significativas entre os máximos e os mínimos valores calculados da (L_{\downarrow}). Os resultados mostram que a variação diurna de cada componente do balanço de radiação, apresenta valores semelhantes àqueles verificados por outros pesquisadores, especialmente por GALVÃO (2000), cujo trabalho foi realizado sobre área de pastagem na Amazônia.

Os índices estatísticos das equações não ajustadas revelam coeficientes de determinação (R^2) entre 0,70 e 0,90 podendo futuramente ser ajustadas para o local. Assim, os fluxos de superfície e as estimativas de radiação de onda longa da atmosfera poderão auxiliar na calibração dos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs). Estes modelos requerem parametrizações realísticas de muitos processos de superfície (como a partição de energia), que são características importantes na determinação dos campos de temperatura, de vento, de umidade e de precipitação.

Referencias Bibliográficas

- André, R.G.B., Silva Filho, V.P., Molion, L.C.B., et al.** Balanço de radiação sobre a Floresta Amazônica (Estações seca e úmida). Rev. Bras. Meteorologia, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 269-274, 1988.
- Arya, S.P.S.** Introduction to micrometeorology. London : Academic Press, Inc. 1988. 307 p.
- Bastable, H.G., Shuttleworth, W.J., Dallarosa, et al.** Observation of climate, albedo and surface radiation over cleared and undisturbed Amazonian forest. Int. J. of Climatol., Chicester, v. 13, n. 7, p. 783-796, 1993.
- Brunt, D.** Notes on radiation in the atmosphere. Quart. J. R. Meteorol. Soc., London, v. 58, p. 389-418, 1932.
- Brutsaert, W.** On a derivable formula for longwave radiation from clear skies. Water Resources Research, Washington, v. 11, n. 5, p. 742-744, 1975.
- Brutsaert, W.** Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications. Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1982. 299 p.
- Culf, A., Esteves, J.L., Marques Filho, A.O., et al.** Radiation, temperature and humidity over forest and pasture Amazonian. In: GASH, J.H., NOBRE, C.A., ROBERTS, J.M. et al., eds. Amazonian Deforestation and Climate, Chicester : J. Willey & Sons, 1996. p. 175-191.
- Culf, A.D., Gash, J.H.C.** Longwave radiation from clear skies in Niger: a comparison of observations with simple formulas. J. of App. Meteorol., Boston, v. 32, p. 539-547, 1993.
- Feitosa, J.R.P.** Balanço de energia e evapotranspiração em áreas de pastagem e de floresta densa na Amazônia central. Campina Grande : UFPb, 1993. 95 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, 1996.
- Costa, F.R., Feitosa, J.R.P., Fisch, G., et al.** Variabilidade diária da precipitação em regiões de floresta e de pastagem na Amazônia. Acta Amazonica, Manaus, v. 28, n. 4, p. 395-408, 1998.
- Fisch, G.** Camada limite Amazônica: aspectos observacionais e de modelagem. São José dos Campos : INPE, 1995. 171 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- Galvão, J. A. C.; Fisch, G.** Balanço de radiação em área de pastagem na Amazônia. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2000.
- Gash, J. H., Nobre, C. A., Roberts, J. M., et al** An overview of ABRACOS. In: GASH, J.H., NOBRE, C.A., ROBERTS, J.M. et al., eds. Amazonian Deforestation and Climate. Chicester : John Willey & Sons, 1996. p. 1-14.
- Idso, S.B., Jackson, R.D.** Thermal radiation from atmosphere. Journal Geophysical Research, Washington, v. 74, n. 23, p. 5397-5403, 1969.
- Iqbal, M.** An introduction to solar radiation, Toronto: Academic Press, 1983. 390p.
- Leitão, M.M.V.B.** Balanço de radiação em três ecossistemas da floresta Amazônica: campina, campinarana e mata densa. São José dos Campos : INPE, 1994. 153 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1994.
- Lemon, E.R.** Energy Conversion and Water Use Efficiency in Plants. In: Plant Environment and Efficient Water Use. American Meteorological Society, Madson, 1965
- Lisboa, R. C. L.; Lisboa, P. L. B.; Silva, A. S. L.; Ilkiu-Borges, A. L.** Florestas de terra firme das bacias dos

- rios Juruá (AM) e Caxiuana (PA). In: Pedro Luiz Braga Lisboa. (Org.). Caxiuana: populações, meio físico e diversidade biológica. Belém: 2002, v., p. 289-319.
- Manzi, A.O., Viswanadam, Y., Sá, L.D.A., et al.** Um estudo sobre o balanço de radiação da Floresta Amazônica. Workshop on GTE/ABLE-2A, INPE, São José dos Campos, Jul. de 1986. MENDONÇA, E.D., CAMPELO JÚNIOR, J.H., PRIANTE FILHO, N. Estimativa de emissividade atmosférica em Santo Antônio do Laverger-MT. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 2, n. 4, p. 63-71, 1996.
- Nkemdirim, L. C.** A note on the albedo of surfaces. Journal of Applied Meteorology, v. 11, n. 5, p. 867-874, Aug.1972.
- Oke, R.** Boundary layer Climates. 2. ed. London: Routledge, 1987. 435 p.
- Reschke, G.A.** Influência do desmatamento no balanço de radiação e nos fluxos de calor sensível e calor latente em Ji-Paraná, Rondônia. Viçosa : UFV, 1996. 51 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- Ribeiro, J.B.M.** Análise comparativa das características microclimáticas entre áreas de floresta e de pastagem na Amazônia. Viçosa : UFV, 1994. 67 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- Sá, L.D.A., Viswanadam, Y., Manzi, A.O.** Energy flux partitioning over the Amazon forest. Theoretical and App. Climatol., Amsterdam, v. 1, n. 39, p. 1-16, 1988.
- Satterlund, D.R.** An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere. Water Resources Res., Washington, v. 15, n. 6, p. 1649-1650, 1979.
- Senkova A., Rontu L.,** 2003. A study of the radiation parameterization for sloping surfaces. Baltic HIRLAM Workshop, St.Peterburg, 17-20 November, 79-82.
- Shuttleworth, W.J., GASH, J.H.C., LLOYD, C.R., et al.** Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. Quart. J. R. Meteorol. Soc., London, v. 110, n. 466, p. 1143-1162, 1984.
- Silva, R. C.** Estudo do balanço de radiação no pantanal sul Mato-Grossense / R. C. Silva. – São José dos Campos: INPE, 2002. 213p. (INPE-9776-TDI/860).
- Souza Filho, J.D.C. (2002).** Variação Sazonal dos componentes do balanço de radiação e energia sobre a floresta de Caxiuana. Viçosa, MG: UFV. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa.
- Swinbank, W. C.** Long-wave radiation from clear skies. Quart. J. R. Meteorol. Soc., London, v. 89, p. 339-348, 1963.
- Victoria, I. M. B.,** Medição da radiação solar global e difusa utilizando o piranômetro com sensores fotoelétricos–Pelotas, 2008. – 95f. – Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Faculdade de Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2008.
- Yamasoe, M. A.** Effect of smoke and clouds on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. Atmos. Chem. Phys., 6, 1645–1656, 2006.