

# Análise comparativa entre formulações empíricas para estimativa da Radiação de Onda Longa Atmosférica (L<sub>a</sub>) sobre a Reserva Florestal de Caxiuanã-PA

Simone Nazaré Rodrigues da Silva<sup>1</sup>  
Glauber Guimarães Cirino da Silva<sup>2</sup>

## Resumo

Componentes da radiação na atmosfera (radiação solar incidente e refletida, bem como radiação de ondas longas incidente e reemitida) além do saldo dos fluxos de radiação, foram medidos por sensores instalados à altura de 52 m acima do solo sobre a floresta de Caxiuanã, na Amazônia Oriental. Um sistema automático de coleta de dados amostrou essas variáveis em intervalos de 30 minutos, produzindo dois conjuntos de dados. O primeiro compreendendo três meses (março a maio) da estação chuvosa local, e o segundo obtido durante a estação seca (agosto a outubro) de 2005. Esse experimento permitiu a determinação completa do balanço médio de radiação, sobre esse sítio de floresta nativa, destacando as diferenças no comportamento horário das variáveis para diferentes estações. Comparações entre os resultados desse estudo e outros realizados sobre outros sítios de floresta e/ou pastagem na Amazônia, foram feitas. Uma avaliação do desempenho de equações empíricas propostas por outros autores para estimar a radiação de ondas longas da atmosfera foi realizada, considerando os valores medidos dessa variável, durante dias nublados e de céu claro, selecionados.

## Palavras-chave

Amazônia, Floresta, Atmosfera, Balanço de Radiação, e Fórmulas Empíricas.

## Abstract

Atmospheric radiation components (incident and reflected solar radiation, incoming and outgoing long wave radiation) and net radiation fluxes 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 minute 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 during the dry season (August to October)

<sup>1</sup> Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia da UFPA, Belém - PA, Brasil. E-mail: simoneufpa@bol.com.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA. Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente. E-mail: glauber.cirino@inpa.gov.br

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 carried out considering the measured values of this variable, during selected cloudy and clear sky days.

## Keywords

Amazon Forest; Atmosphere; Radiation Balance and Empirical Formols.

## Introdução

O clima global e local depende principalmente da variação temporal e espacial da radiação. Estudos envolvendo a radiação solar são importantes por ser esta a principal fonte de energia para os processos físicos, biofísicos e biológicos que ocorrem na biosfera. Ao penetrar na atmosfera, a radiação solar sofre uma série de processos que a modificam. Uma considerável porção da radiação incidente é refletida pelas nuvens e difusamente espalhada pela atmosfera. Outras perdas ocorrem devido à absorção de radiação pelo ozônio, vapor d'água e dióxido de carbono. Mesmo assim, uma parte significativa incide na superfície da Terra, sendo uma porção refletida e outra absorvida pela mesma. Um percentual da parte absorvida é reemitido como radiação termal, enquanto o restante aquece a superfície e o ar logo acima dela ou fornece energia para a evapotranspiração (GALVÃO, et al., 2000).

Embora haja instrumentos para medir a radiação de onda longa da atmosfera, esta não é uma medida fácil de se obter. Uma das razões deve-se ao fato que tais instrumentos quando aquecidos, emitem radiação de comprimento de onda e intensidade comparável aos da suposta medida.

Entretanto, em muitas situações práticas em 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).

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento dos vários componentes do balanço de radiação, bem como avaliar o desempenho de fórmulas empíricas não ajustadas para as condições locais de floresta, a fim de obter informações que possam orientar adequadamente futuros ajustes nesses modelos empíricos de estimativa da ( $L_d$ ) para o caso da floresta amazônica, representada nesse estudo, por observações feitas na torre micrometeorológica de Caxiuanã, Melgaço / Pará.

Características e localização da área de estudo

O sítio experimental está localizado 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 (LISBOÁ 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.

Instrumentação e dados

O período de dados selecionados para este estudo foi de 05 de março a 31 de maio de 2005 (estação chuvosa) e 01 de agosto a 31 de outubro de 2005 (estação menos chuvosa). Portanto foram escolhidos 03 (três) meses representativos da estação chuvosa e menos chuvosa; local. Os dados utilizados foram registrados por instrumentos instalados em uma torre micrometeorológica com estação automática instalada no sítio experimental da ECFPn. Todos os dados foram armazenados por meio de um sistema de aquisição de dados (CR10X, Campbell Scientific / EUA).

A radiação solar foi medida através de um saldo radiômetro NR-Lite (Kipp & Zonen), que permitiu conhecer as 4 (quatro) componentes do Balanço de Radiação separadamente (radiação de ondas curtas e longas incidentes, radiação de ondas curtas refletidas e radiação de ondas longas reemitidas). A temperatura do ar foi medida por um termômetro de termistor (T 107-L, Campbell Scientific / EUA) no nível de 52 m de altura acima do solo, sobre o dossel da floresta.

Os valores de radiação de onda longa incidente foram estimados a partir das equações empíricas descritas abaixo: a) BRUNT (1932); b) SWINBANK (1963); c) IDSO & JACKSON (1969); d) SATTERLUND (1979); e da equação analítica e) BRUTSAERT (1975).

$$a) L \downarrow = cT^4 [(0,51 + 0,06 e^{-1/2})] \quad (1)$$

$$b) L \downarrow = 9,2 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma T^6 \quad (2)$$

$$c) L \downarrow = cT^4 \{1 - 0,26 \cdot \exp [-7,77 \cdot 10^{-4} (273 - T)^2]\} \quad (3)$$

$$d) L \downarrow = 1,08 \cdot \sigma T^4 [1 - \exp(-e/T/2016)] \quad (4)$$

$$e) L \downarrow = 1,24 \cdot \sigma T^4 (e/T) \quad (5)$$

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

Para a análise dos termos do balanço de radiação na floresta, calculou-se médias horárias 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), em que a razão entre a radiação solar incidente ( $K \downarrow$ ) e a radiação extraterrestre ( $R_0$ ) integrada ao longo do dia foi superior a 0,50, isto é,  $((K \downarrow) / (R_0)) > 0,50$ . As situações em que  $((K \downarrow) / (R_0))$  foi inferior a 0,35 foram classificados como dias de céu nublado (CN). Este procedimento pode ser utilizado tendo em vista que as nuvens são fortes emissoras de radiação de ondas longas (CULF et al., 1995; GALVÃO & FISCH, 2000 apud SOUZA FILHO, 2006). Para determinar a irradiância solar extraterrestre diária ( $R_0$ ), integrou-se os valores instantâneos de  $I_z$  (irradiância instantânea), obtendo assim a energia disponível em um dia para uma dada latitude, sem considerar os efeitos atenuantes da atmosfera (SOUZA FILHO, et al., 2006).

## Resultados e Discussões

### Componentes do balanço de radiação

Os componentes do balanço de radiação (Figura 1) 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 às 13 HL (hora local) chegando a  $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  e  $85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , respectivamente. O valor máximo de  $R_n$  ( $639 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) se observa às 12 HL e o da  $L \downarrow$  ( $462 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) às 16 HL, coincidentemente no mesmo horário do valor máximo da  $L \uparrow$  ( $410 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). 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 (á - 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 e Fisch (2000) para o caso de pastagem, o balanço de ondas longas ( $L\downarrow - L\uparrow$ ) em Caxiuana, 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  $20,3 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Para o saldo de radiação (Rn) essa energia foi de  $14,4 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , a energia de  $K\downarrow$  igual a  $2,25 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , seguida da  $L\downarrow$  com valor médio de  $33 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e da radiação reemitida pelo dossel ( $L\uparrow$ ) com valor de  $36,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . 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., (2006).

A figura 2 mostra que o ciclo diário da ( $L\downarrow$ ) apresenta-se bem definido nas situações de CC e CN, com maiores valores registrados durante os dias de CC a partir das 08 horas local, até o início da noite.

No período noturno de CN os valores da ( $L\downarrow$ ) foram sensivelmente maiores que aqueles verificados no período noturno de CC. Portanto em situações de CN a atmosfera se mostra sensivelmente mais aquecida entre as 01 e 07 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 ( $L\downarrow$ ) são observados as 16 HL no período de céu claro (CC) com  $410 \text{ W.m}^{-2}$  e as 13 HL no período nublado com  $385 \text{ W.m}^{-2}$ , sendo que a maior diferença entre os dois períodos ocorre as 16 HL ( $33 \text{ W.m}^{-2}$ ).

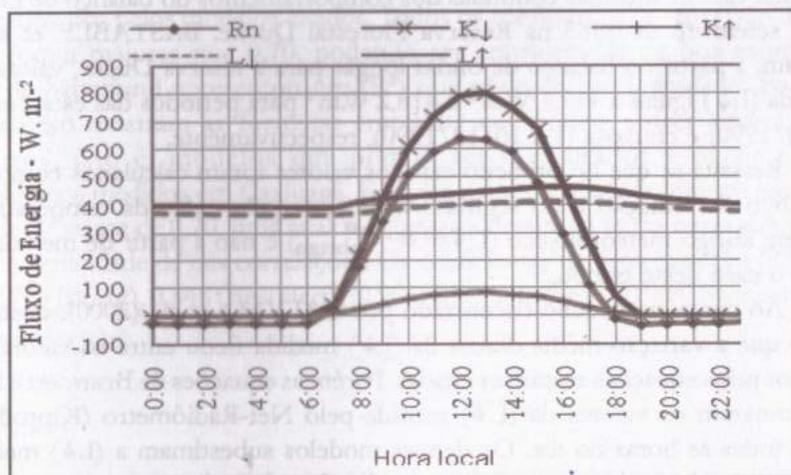


Figura 1 - Variação média horária dos componentes do balanço de radiação: radiação solar global incidente ( $K\downarrow$ ), radiação solar refletida ( $K\uparrow$ ), saldo de radiação (Rn), radiação de onda longa atmosférica ( $L\downarrow$ ) e radiação de onda longa emitida pela superfície ( $L\uparrow$ ), durante o período de 120 dias de céu claro (CC). Caxiuana / PA, 2005.

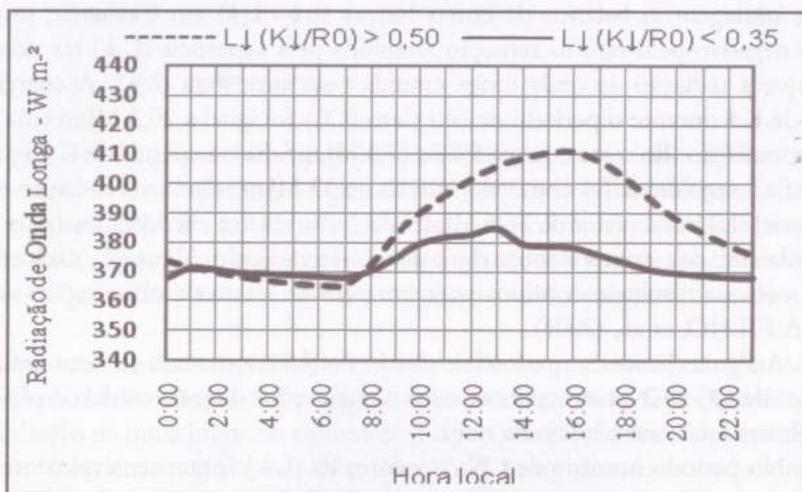


Figura 2 - Variação média horária da radiação de onda longa da atmosfera ( $L_{\downarrow}$ ) durante o período de 120 dias de céu claro (CC) e 16 dias de céu nublado (CN). Caxiuanã / PA, 2005.

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

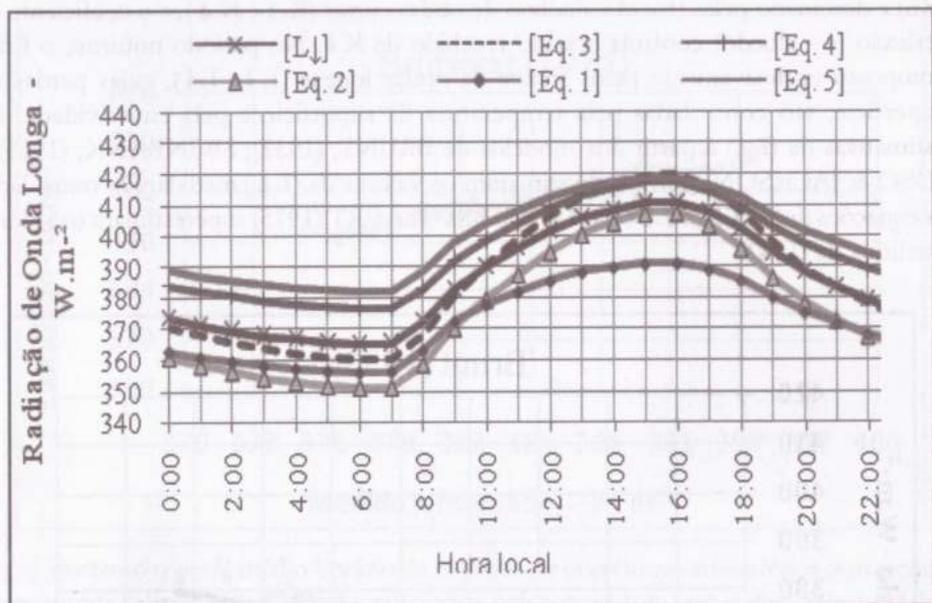


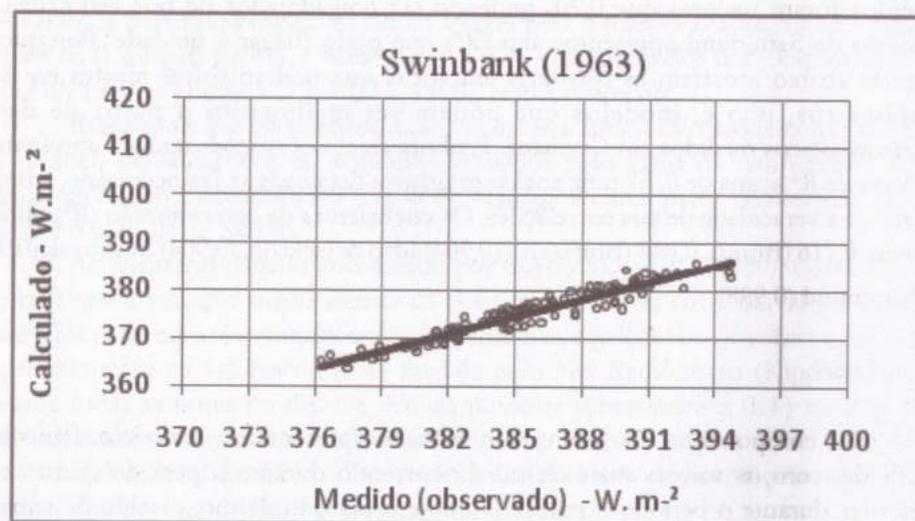
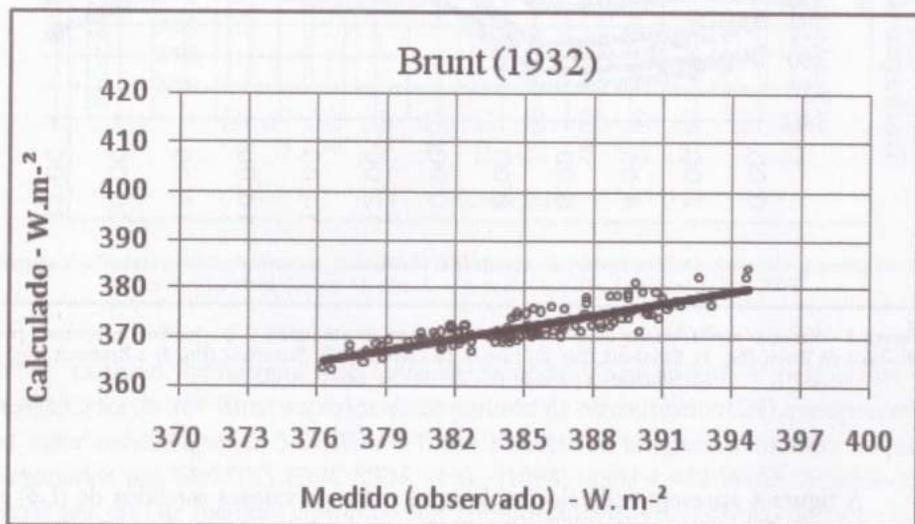
Figura 3 - Variação média horária da radiação de onda longa da atmosfera ( $L_{\downarrow}$  - medida) e estimada pelos modelos de Brunt (Eq. 1), Swinbank (Eq. 2), Idso & Jackson (Eq. 3), Satterlund (Eq. 4) e Brutsaert (Eq. 5) durante o período de 120 dias de céu claro (CC).

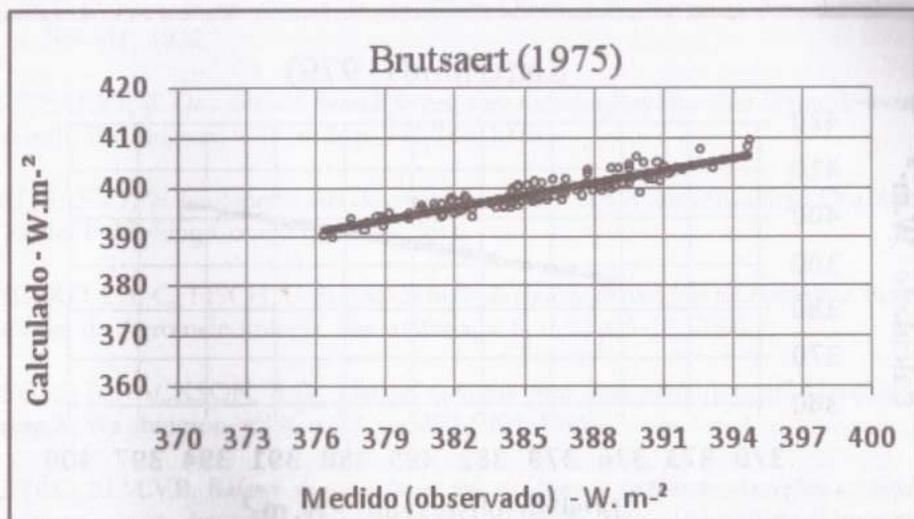
A figura 4 apresenta correlações lineares entre os valores medidos de ( $L_{\downarrow}$ ) e os valores estimados pelos modelos citados. Todos os coeficientes de regressão linear ( $R^2$ ) obtidos foram maiores que 0,70, podendo ser considerados de boa estimativa. O modelo de Satterlund apresentou um ( $R^2$ ) que pôde chegar 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 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 (0,904) e Satterlund (0,998).

## Conclusão

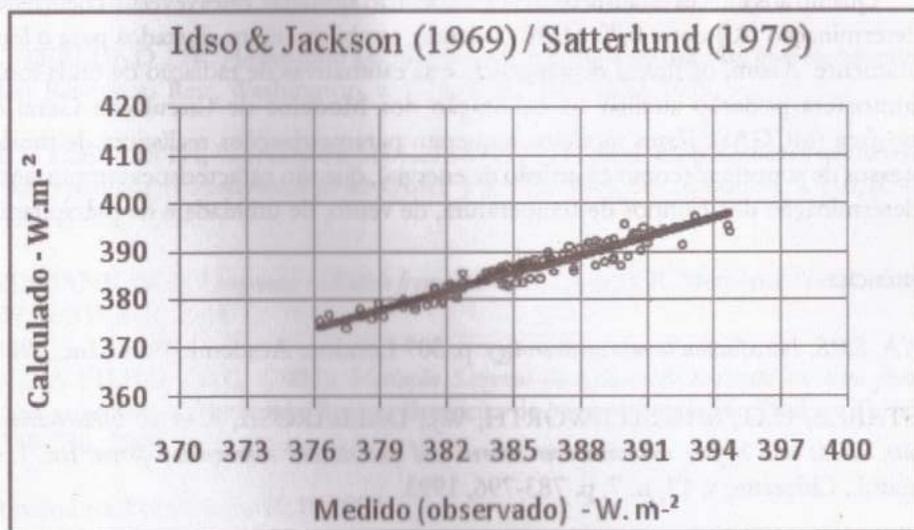
Os componentes do balanço de radiação apresentaram um ciclo diário bem definido, com os valores mais elevados ocorrendo durante o período diurno e os menores durante o período noturno. Durante o período diurno, o saldo de radiação

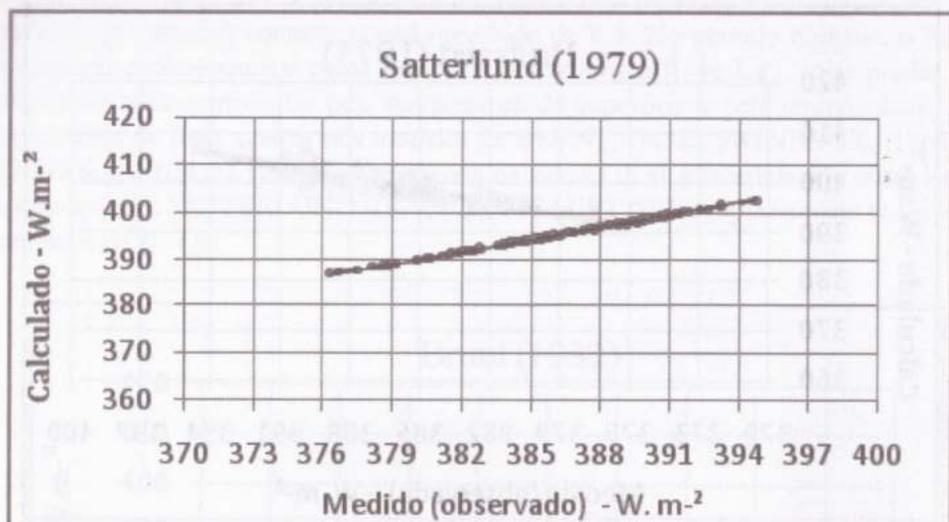
( $R_n$ ) é dominado pelas trocas radiativas de ondas curtas ( $K \downarrow$  e  $K \uparrow$ ), e o coeficiente de reflexão ( $\alpha$  - albedo) controla o saldo recebido de  $K \downarrow$ . No período noturno, o  $R_n$  é composto exclusivamente pelos fluxos de ondas longas ( $L \downarrow$  e  $L \uparrow$ ), cujas perdas na superfície, são controladas pela temperatura da superfície e pela emissividade. 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. De 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 e Fisch (2000), cujo trabalho foi realizado sobre área de pastagem na Amazônia. Os dias de céu claro selecionados foram obtidos a partir da relação  $K\downarrow / R_{\nu}$ , integrado ao longo do dia. Um número elevado de dias de céu claro foi encontrado.





**Figura 4** - Comparação entre os valores medidos de radiação de onda longa da atmosfera ( $L\downarrow$ ) e os valores estimados pelos modelos de Brunt; Brutsaert (esquerda) e Idso & Jackson; Swinbank (direita).

A série de 120 dias de céu claro selecionados ainda pode está contaminada pela presença de nuvens. Sendo assim, a eficiência de estimativa de ROL atmosférico pelas formulações empíricas utilizadas neste trabalho, pode está comprometida. Futuramente um critério mais minucioso de separação de dias de céu claro poderá ser aplicado, a fim de se obter uma série de dias predominantemente claros.

Quanto aos índices estatísticos das equações não ajustadas, estes revelam coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre 0,70 e 0,90 podendo, também, serem ajustados para o local futuramente. 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.

#### Referências

ARYA, S.P.S. *Introduction to micrometeorology*. p. 307 London: Academic Press, Inc. 1988.

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 long-wave 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.

GALVÃO, J. A. C.; FISCH, G. *Balço de radiação em área de pastagem na Amazônia*. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2000.

IDSO, S. B.; JACKSON, R.D. *Thermal radiation from atmosphere*. Journal Geophysical Research, Washington, v. 74, n. 23, p. 5397-5403, 1969.

LEITÃO, M.M.V.B. *Balço 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.

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 Caxiuanã (PA)*. In: Pedro Luiz Braga Lisboa. (Org.). Caxiuanã: populações, meio físico e diversidade biológica. Belém: 2002, v., p. 289-319.

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.

SATTERLUND, D.R. *An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere*. Water Resources Rev., Washington, v. 15, n. 6, p. 1649-1650, 1979.

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.

SWINBANK, W. C. *Long-wave radiation from clear skies*. Quart. J. R. Meteorol. Soc., London, v. 89, p. 339-348, 1963.

SOUZA FILHO, J.D.C. (2006). *Variação Sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia*. Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, v.21, n.3b, p. 318-330, 2006.

Submetido à Publicação: 10.10.2009

Aceito: 20.10.2009