

ESTIMATIVA SAZONAL DA EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE BRUTSAERT NO NORTE DO PANTANAL MATO-GROSSENSE

Leone Francisco Amorin Curado, Thiago Rangel Rodrigues, Marcelo Sacardi Biudes, Sérgio Roberto de Paulo, Iramaia Jorge Cabral de Paulo, José de Souza Nogueira

PPG em Física Ambiental
Instituto de Física - UFMT; Cuiabá, MT
e-mail: leone@pgfa.ufmt.br

Resumo

Nos últimos anos, têm-se intensificado as pesquisas ambientais na região do Pantanal a fim de se conhecer o comportamento micrometeorológico da região. No presente trabalho, buscou-se verificar se a equação de Brutsaert pode ser utilizada para a estimativa da emissividade atmosférica na região do pantanal Mato-grossense. Foram considerados dois períodos sazonais, sendo um chuvoso e um seco, tendo como base para comparação os dados obtidos na estação micrometeorológica aplicados na equação do balanço de energia, a fim de que possa contribuir para as pesquisas destinadas ao estudo das trocas de energia entre a superfície e a atmosfera da região pantaneira. Os resultados obtidos mostraram-se consistentes para o método utilizado, pois os valores estimados pela equação de Brutsaert aproximaram-se significativamente dos valores obtidos através da equação do balanço de energia, que utilizou dados coletados no local para os dois períodos estudados.

Palavras-chave: Equação de Brutsaert, períodos sazonais, balanço de energia, Pantanal.

Abstract

In last years, the environmental researches have been intensified in the region of the Pantanal in order to understand the micrometeorological behavior of the region. The present study sought to determine whether the equation of Brutsaert can be used to estimate the atmospheric emissivity in the region Pantanal, Mato Grosso-Brazil. Two seasons were considered, one wet and other dry, the basis of comparison were the data obtained in micrometeorological station used in the equation of energy balance, in order to contribute to the research for the study of energy exchanges between surface and atmosphere of the region. The results were consistent for the method used, because the values estimated by the equation of Brutsaert approached significantly from the values obtained using the equation of energy balance that used data collected on site for the two seasons studied.

Keywords: Equation of Brutsaert, seasons, energy balance, Pantanal

1. Introdução

O Pantanal é caracterizado como a maior planície inundada da América do Sul, com cerca de 140.000Km², ocupando 1,6% do território brasileiro. Sua posição geográfica é peculiar, sendo o elo entre a Amazônia, o Cerrado e os Chacos Boliviano e Paraguaio, considerados como um conjunto de vários ecossistemas que está em processo de formação, isto é, de sedimentação (quaternária), proveniente dos rios da Bacia do Alto Paraguai (IVERSSON et al., 1993; NUNES DA CUNHA e JUNK, 2004).

Devido à sua importância e por ser o Pantanal uma região de climatologia ainda pouco estudada e mal compreendida (VILA DA SILVA, 1991; Por, 1995), torna-se necessário investigar os aspectos micrometeorológicos que singularizam a atmosfera da região, particularmente os processos de troca de energia e suas variações sazonais.

Com um regime hidrológico peculiar, o Pantanal apresenta dois regimes sazonais distintos, com épocas secas (de abril a setembro) e, a

partir de outubro, épocas inundadas, de acordo com a intensidade e a duração das precipitações (RAO et al., 1996).

Todos os materiais sobre a Terra possuem uma temperatura mais baixa que a do Sol, tal que a radiação que eles emitem tem comprimentos de ondas maiores do que a da radiação solar global. A maior parte da radiação emitida pela Terra e pela atmosfera está contida no intervalo de 4 a 100 μm e por isso recebe a denominação de radiação de ondas longas (VILANI et al., 2010).

O conhecimento da radiação de onda longa é de grande importância em diversos estudos meteorológicos, como, por exemplo, para previsão de variações diurnas de temperatura, geadas e nevoeiros noturnos, bem como em avaliações do resfriamento radiativo noturno de construções (JIMENEZ et al., 1987).

O fluxo de radiação de onda longa proveniente da atmosfera (E_a) é um importante componente da troca radiativa no nível da superfície e esta, por sua vez, é uma importante componente do balanço de energia. O saldo de radiação de ondas longas, também chamada radiação termal ou radiação efetiva, é importante na determinação da troca de energia no período noturno, quando há ocorrência de orvalho e geadas. Por outro lado, o saldo de radiação total é importante na determinação da troca de energia durante o dia, quando ocorre a maior parte da evapotranspiração (VON RANDOW & ALVALÁ, 2006).

Segundo a Lei de Stefan-Boltzmann, todas as superfícies naturais emitem energia radiante, a qual depende de suas emissividades e de sua temperatura. Dessa forma, há a necessidade de se estimar parâmetros que nos levem a uma melhor compreensão dessa radiação, como é o caso da emissividade atmosférica.

Os gases atmosféricos absorvem parte da radiação de onda curta incidente e parte da radiação de onda longa radiada pela superfície da Terra e emitem, por sua vez, uma fração da radiação que seria emitida por um corpo negro submetido à mesma temperatura (HEITOR et al., 1991). Sendo assim, a emissividade atmosférica pode ser apresentada como uma função cuja variação depende do conteúdo de vapor d'água na atmosfera (Umidade Relativa) e da temperatura do ar.

A radiação de onda longa emitida pela atmosfera é uma das componentes do balanço de energia mais difícil de ser medida, devido à complexidade existente nessa região da troposfera (ventos, variações nos flu-

xos, etc.). Embora já existam instrumentos para fazerem essas medidas, ainda há muitas dificuldades para estimar essa componente radiativa por causa das variações já mencionadas. No entanto, em muitas situações práticas em meteorologia, pode-se estimar a radiação de onda longa através de variáveis mais facilmente medidas (BRUTSAERT, 1982).

A caracterização de elementos ambientais a partir de dados e informações atualizadas e abrangentes para regiões como a Amazônia e o Pantanal, regiões estas de acesso difícil e oneroso, porém com acentuada diversidade espacial, deve constituir objetivo de estudos detalhados em diferentes programas de pesquisa, que visem a melhor conhecer os mecanismos de funcionamento climatológico, ecológico, biogeoquímico, hidrológico e os impactos das mudanças dos usos da terra, fundamentais para subsidiar o desenvolvimento auto-sustentado dessas regiões. Nesse contexto, iniciativas de pesquisa, com cooperação internacional, têm sido propostas para estudar os processos de interação biosfera-atmosfera na Amazônia (NOBRE et al. 1996). Assim, devido à importância do Pantanal para a manutenção e a preservação dos ecossistemas, espera-se que iniciativas com fins voltados para o estudo dessa região sejam contempladas para uma melhor compreensão desse bioma tão importante para a regularidade ambiental do planeta.

O objetivo deste trabalho foi estimar a emissividade atmosférica através da equação de Brutsaert no norte do Pantanal Mato-grossense em dois períodos sazonais.

2. Materiais e método

2.1 Localização da área experimental

O estudo foi realizado numa área localizada na Reserva Particular do Patrimônio Natural - RPPN SESC – Pantanal, município de Barão de Melgaço – MT, distante 160 km de Cuiabá – MT em que estava instalada uma torre micrometeorológica de 32 m de altura (16°39'50''S; 56°47'50''O) e altitude de 120 m. Essa área apresenta vegetação monodominante de Cambará (*Vochysia divergens*, Phol), conhecido localmente como cambarazal, com altura do dossel variando entre 28 a 30 m.

2.2. Instrumentação utilizada

O saldo de radiação foi medido por meio de um saldo radiômetro (Net Radiometer, Kipp & Zonen Delft, Inc., Holland) e a radiação solar incidente através de um piranômetro (LI-200, Campbell Sci, Inc., USA) a 33 m de altura. Os gradientes de temperatura e umidade do ar foram estimados por meio de dois termohigrômetros (HMP 45 C, Vaisala, Inc., Helsinki, Finland), instalados a 33,7 e 37,7 m na torre micrometeorológica.

Os equipamentos foram alimentados com tensão de 12 V por duas baterias de 150 Ah, carregadas por um painel solar de 64 W com regulador de tensão. Os dados produzidos por sinais e pulsos elétricos dos transdutores foram processados e armazenados por um datalogger (CR 10X, Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah), com médias de 15 minutos. Para aumentar o número de canais de entrada do registrador, foi utilizada uma placa multiplexadora (AM16/32A-ST-SW, Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah).

2.3. Estimativa da emissividade atmosférica através da equação de Brutsaert

A equação de Brutsaert vem sendo utilizada para o cálculo da radiação de ondas longas relacionados com as trocas energia entre a superfície e a atmosfera. Tal equação é um método analítico derivada da equação de Schwarzschild. Segundo JIMÉNEZ et al. (1987), a principal diferença de métodos analíticos e empíricos de estimativa da radiação de onda longa da atmosfera está em sua fundamentação, pois os primeiros são derivados de princípios físicos e os segundos a partir de relações empíricas. Os métodos analíticos utilizam perfis detalhados dos constituintes da atmosfera, juntamente com informações de suas propriedades radiativas, para derivar a emissão atmosférica.

Segundo a Lei de Stefan-Boltzmann, a energia emitida por uma superfície natural depende da sua temperatura e de sua emissividade, sendo, essa última, um índice que define a capacidade de emissão de uma superfície, que é calculada pela razão entre a energia emitida pela superfície e a energia absorvida por ela. O valor da emissividade varia de 0 a 1, sendo o valor zero um indicador de que a superfície não emite radiação, e o valor 1 indicando que toda energia absorvida é reemitida. A Lei de Stefan-Boltzmann é representada por:

$$R = \varepsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

em que R é a energia emitida por unidade de área e unidade de tempo ($W.m^{-2}$), ϵ é a emissividade da superfície que emite a radiação (adimensional), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($W.m^{-2}K^{-4}$), T é a temperatura da superfície emissora (K).

Para encontrar a emissividade da superfície, tem-se:

$$\epsilon = \frac{R}{\sigma T^4} \quad (2)$$

Para o caso da energia de onda longa emitida pela atmosfera, tem-se, pela equação de Brutsaert:

$$L_d = 1,24\sigma T^4 (e / T)^{\frac{1}{7}} \quad (3)$$

em que L_d é a energia de onda longa emitida pela atmosfera, e é a pressão de vapor de água.

Analogamente à equação de Stefan-Boltzmann, tem-se:

$$\epsilon = \frac{L_d}{\sigma T^4} = 1,24(e / T)^{\frac{1}{7}} \quad (4)$$

$$e = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (5)$$

em que UR é a umidade relativa do ar medida no local. e_s é a pressão de saturação do vapor de água do ar saturado calculado em função da temperatura do ar para a altura considerada. Segundo a equação de Tetens (Saucier, 1955), tem-se:

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{(7,5T/237,3+T)} \quad (6)$$

Assim, a emissividade pode ser calculada por:

$$\epsilon = 1,24 \left[\frac{UR 6,1078 \cdot 10^{(7,5T/237,3+T)}}{100T} \right]^{\frac{1}{7}} \quad (7)$$

Portanto, tem-se uma equação para a estimativa da emissividade dependente apenas da umidade relativa e da temperatura do ar medidas no local.

2.4. Cálculo da emissividade atmosférica pela equação do balanço de energia

Os resultados estimados pela equação de Brutsaert foram comparados com os valores da emissividade, calculada através da equação do balanço de energia, com dados coletados na torre durante o ano de 2008. Pela equação do balanço de energia, tem-se:

$$\varepsilon = \frac{Rn - Rg + rRg + \sigma T_s^4}{\sigma T_a^4} \quad (8)$$

em que Rn é o saldo de radiação, Rg é a radiação global incidente, rRg é o albedo da superfície, σT_a^4 é a energia emitida pela atmosfera, σT_s^4 é a energia emitida pelo solo e ε é a emissividade atmosférica

3. Resultados e discussão

3.1 Distribuição sazonal da temperatura e umidade relativa

Durante o estudo, os valores da temperatura e da umidade relativa oscilaram, respectivamente, entre 16,07ffC a 38,87ffC e entre 42,09% a 97,91%, tendo uma média de 24,43ffC e 81,58% na estação chuvosa. Na estação seca, esses valores oscilaram entre 12,07ffC a 39,51ffC e 12,75% a 99,33% com médias de 25,39ffC e 56,88%. As variações sazonais da emissividade atmosférica estimadas pela equação de Brutsaert são decorrentes das variações sazonais da temperatura e da umidade.

As Figuras 1, 2, 3 e 4 mostram que houve variações bruscas da temperatura na estação seca. Já na estação chuvosa, a temperatura não apresentou altas oscilações, devido à elevada umidade nesse período. A umidade relativa apresentou um padrão mais definido na estação chuvosa do que na seca, ocasionado pela regularidade de chuvas dessa época. Como o Pantanal apresentou um período de junho a setembro caracterizado por temperaturas médias elevadas e escassez de chuvas, houve maiores oscilações nos valores médios diários da umidade relativa nesse período, devido à baixa umidade

Assim, como no período chuvoso houve valores maiores da umidade relativa e menores da temperatura, se comparados com o

período seco, espera-se que a emissividade atmosférica seja maior no período chuvoso do que no seco.

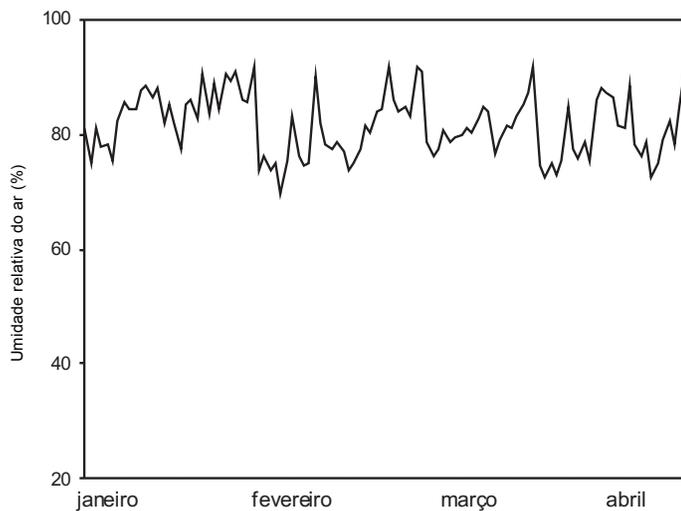


Figura 1. Umidade relativa do ar na estação chuvosa.

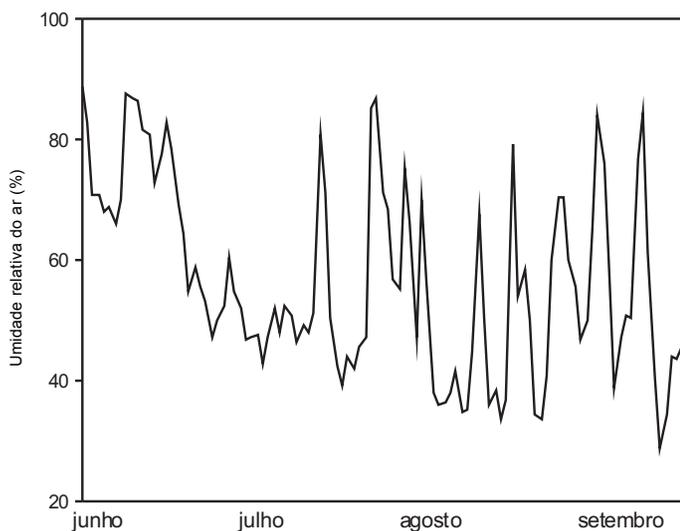


Figura 2. Umidade relativa do ar na estação seca

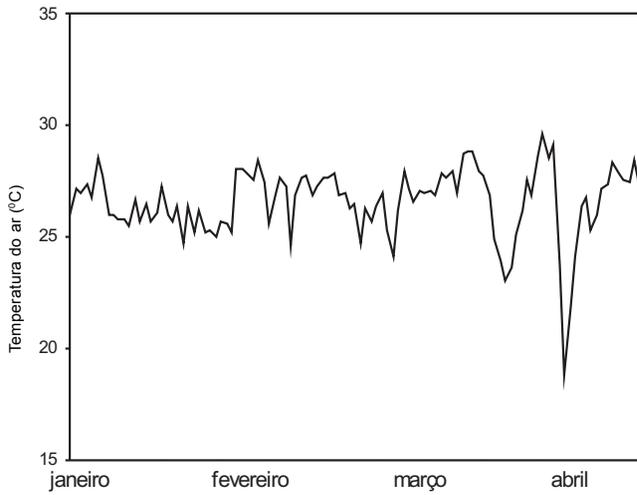


Figura 3. Temperatura do ar na estação chuvosa.

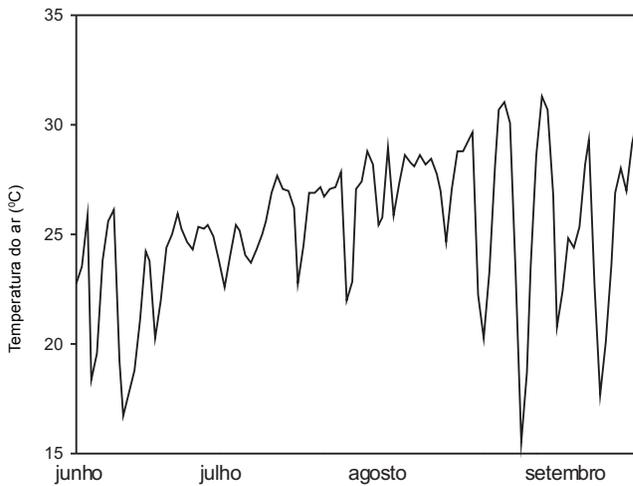


Figura 4. Temperatura do ar na estação seca.

3.2 Comportamento sazonal da emissividade atmosférica

Para esta pesquisa, utilizaram-se os dados coletados entre os meses de janeiro a setembro de 2008, sendo o período de janeiro a abril a estação

chuvosa e de junho a setembro a estação seca. O mês de maio não foi considerado por ser um período de transição entre as duas estações citadas.

Os instrumentos utilizados para a coleta de dados foram programados para fazerem medidas a cada 15 minutos, sendo que foram feitas as médias diárias desses valores. Os valores médios da emissividade atmosférica estimados pela equação de Brutsaert em cada estação foram comparados com os valores médios obtidos através dos dados coletados, utilizando a equação do balanço de radiação.

Com base nos dados coletados, foram feitos gráficos dos valores médios diários da temperatura, umidade relativa e da emissividade Atmosférica estimada. A seguir, apresentam-se os gráficos dos valores diários médios da emissividade medidos no local e dos valores estimados pela equação de Brutsaert.

Durante o período de estudo, os valores médios diários da emissividade atmosférica estimado pela equação de Brutsaert oscilaram entre 0,84 e 0,90 para a estação chuvosa (Figura 5) e 0,75 a 0,87 para a estação seca (Figura 6), tendo uma média de 0,88 e 0,82 para as estações chuvosa e seca, respectivamente.

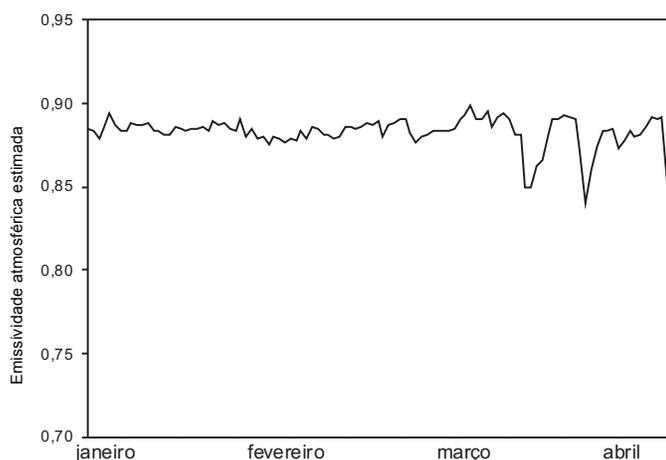


Figura 5. Emissividade atmosférica estimada pela equação de Brutsaert na estação chuvosa.

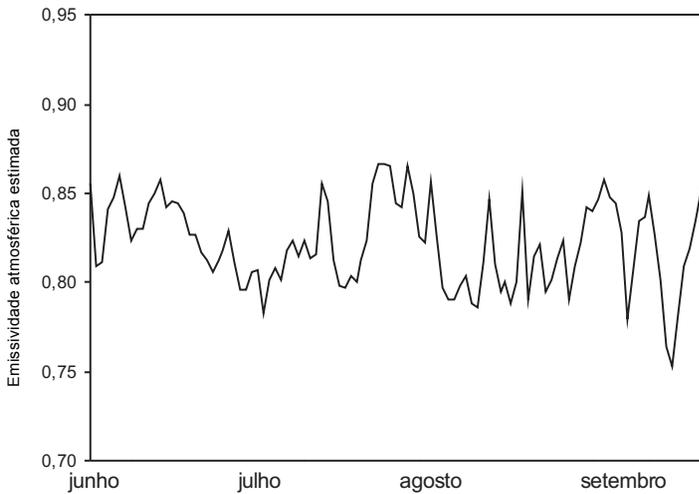


Figura 6. Emissividade atmosférica estimada pela equação de Brutsaert na estação seca.

A média da emissividade atmosférica obtida através dos dados coletados utilizando a equação do balanço de energia foi de 0,93 para a estação chuvosa e de 0,82 para a seca. Esses resultados mostraram uma variação entre os valores obtidos pelos dados e aqueles estimados pela equação de Brutsaert de aproximadamente 5,4% para a estação chuvosa e de aproximadamente 0,4% para a estação seca, o que é um resultado satisfatório para a aplicação da equação de Brutsaert no Pantanal.

Os valores do balanço de radiação foram adotados como referência neste estudo, por faltarem na literatura valores da emissividade atmosférica para o norte do Pantanal que pudessem ser adotados como referência. Porém, mesmo os valores obtidos com o balanço de radiação apresentam erros dos instrumentos que fizeram as medidas embutidos nesses valores. Quanto aos de Brutsaert, além dos erros dos instrumentos, também há o erro associado ao método, visto que apresenta dois parâmetros de ajuste para a equação 1. Assim, os resultados aqui apresentados mostram que o modelo de Brutsaert obteve erros próximos dos erros dos instrumentos de medidas utilizados neste estudo o que torna esse modelo uma alternativa para a estimativa da emissividade atmosférica no norte do Pantanal, utilizando apenas duas variáveis: temperatura e umidade relativa.

3.3 Variação Sazonal da Emissividade Atmosférica

A emissividade atmosférica apresentou valores maiores na estação chuvosa do que na estação seca. A emissividade atmosférica é dependente da temperatura do ar e da umidade relativa, como mostra a equação (2) e, observando as Figuras (1), (2), (3) e (4), essas duas grandezas variaram sazonalmente durante o período considerado. Assim, a emissividade atmosférica também variou nas duas estações de acordo com a variação da temperatura e da umidade relativa.

A energia disponível ao meio é uma função da emissividade atmosférica, pois esta última revela o quanto de energia que a superfície, no caso a atmosfera, está devolvendo ao meio em relação àquela recebida pela superfície. Como a emissividade atmosférica variou sazonalmente, tendo seu valor médio maior na estação chuvosa, a energia média de onda longa proveniente da atmosfera disponível para o ambiente também variou de estação para estação. Sendo que, assim como a emissividade atmosférica teve um maior valor na estação chuvosa do que na seca, houve uma maior disponibilidade dessa energia para o meio. Em valores médios, observou-se que, de acordo com os valores estimados pela equação (2), aproximadamente 88,3% da energia recebida pela atmosfera foi devolvida ao ambiente na estação chuvosa e 82,2% na seca, o que mostra que a estação chuvosa obteve 7% a mais de energia proveniente da atmosfera com relação à estação seca.

Esse aumento da emissividade atmosférica na estação chuvosa, segundo Souza Filho et al. (2006), foi devido à maior presença de nuvens nessa estação, pois as nuvens são muito eficientes na absorção de ondas longas e, aja que a estação chuvosa é caracterizada por céu nublado na maioria dos dias, faz com haja maior absorção de energia por parte das nuvens, inclusive da própria energia emitida pelo solo, o que dificulta o resfriamento da superfície, provocando aumento na emissividade da atmosfera bem como no saldo de radiação.

4. Conclusão

Na comparação entre os dados obtidos e os valores estimados pela equação de Brutsaert, foi possível observar que esta última demonstrou consistência, podendo assim ser utilizada para estimar os valores da

emissividade atmosférica na região do Pantanal mato-grossense.

Observou-se também que o valor médio da emissividade atmosférica variou entre a estação chuvosa e a seca, mostrando, assim, que ela depende de outras variáveis micrometeorológicas como temperatura e umidade relativa durante o período e local de estudo, como é o caso da cobertura do céu, que fez com que a estação com maior presença de nuvens apresentasse maiores valores da emissividade atmosférica.

Considera-se importante que pesquisas nessa área sejam incentivadas, a fim de que se possam revelar novos conhecimentos referentes ao tema estudado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e ao Programa de Pós Graduação em Física Ambiental (PPGFA) da Universidade Federal de Mato Grosso pelo incentivo a pesquisa.

5. Referências

BRUTSAERT, W. Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications. Dordrecht: D. Reidel, 299p, 1982.

BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. **Water Resources Research**, v. 11, n. 5, p. 742-744, 1975.

HEITOR, A.; BIGA, A. J.; ROSA, R. Thermal Radiation Components of the Energy Balance at the Ground. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 54, n. 1, p. 29-48, 1991.

IVERSSON, L.B.; SILVA, R.A.M.S.; TRAVASSOS DA ROSA, A.P.A.; BARROS, V.L.R.S. Circulation of eastern equine encephalitis, western equine encephalitis, Ilhéus, Maguari and Tacaiuma viruses in equines of the Brazilian Pantanal, South América. *Revista do Instituto Médico Tropical*, v.35, n.4, p.355-359, 1993.

JIMENEZ, J. I.; ALADOS-ARBOLEDAS, L.; CASTRO-DIÉZ, Y; BALLESTER, G. On the estimation of long-wave radiation flux from

clear skies. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 38, n. 1, p. 37-42, 1987.

NOBRE, D. A.; DOLMAN, A. J.; GASH, J. H. C.; The large scale biosphere – atmosphere experiment in Amazonia. *Contise experimental plan*. The LBA Science Planning Group, 44p. 1996.

NUNES da CUNHA, C.; JUNK, W.J. Year-to-year changes in water level drive the invasion of *Vochysia divergens* in Pantanal glassland. *Applied Vegetation Science*, v.7, p.103-110, 2004.

RAO, V. B.; CAVALCANTI, I. F. A.; HADA, K. Annual variation of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. *Journal of Geophysical Research*, v. 101, n. D21, p.26539-26551, 1996.

SAUCIER, W. J. *Principles of meteorological analysis*. Chicago: University of Chicago Press. 1955.

SOUZA FILHO, J. D. C., RIBEIRO, A., COSTA, M. H., COHEN, J. C. P., DA ROCHA, E. J. P. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no Nordeste da Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3b, 318-330, 2006.

VILA DA SILVA, J. S. Aplicações de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográfica na Avaliação da Dinâmica de Inundação no Pantanal. São José dos Campos. (INPE-5353-TDI/462). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1991.

VILANI, M.T.; SANCHES, L.; PINHEIRO, M.R; JUNIOR, O.B.P.; Estimativa da radiação de onda longa incidente em uma floresta semidecídua tropical da Bacia Amazônica. *Ciência e Natura*, UFSM, 32(1): 65 - 81, 2010.

VON RANDOW, R. C. S. & AVALÁ, R. C. S. Estimativa Da Radiação De Onda Longa Atmosférica No Pantanal Sul Mato Grossense Durante Os Períodos Secos De 1999 E 2000. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3b, 398-412, 2006.

Submetido em: 05/07/2010

Aceito em: 16/08/2011