

Modelagem da evapotranspiração em áreas de floresta tropical amazônica

Anderson Luis Ruhoff¹
Luiz Eduardo Aragão²
Walter Collischonn³
Humberto Ribeiro da Rocha⁴
Yadvinder Malhi⁵
Qiaozhen Mu⁶
Steven Running⁶

¹ Universidade Federal do Rio Grande – FURG
CEP 96201-900 – Rio Grande – RS, Brasil
anderson.ruhoff@ufrgs.br

² School of Geography – University of Exeter
Post Code EX4 4RJ – Exeter, United Kingdom
l.aragao@exeter.ac.uk

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/IPH
Caixa Postal 15029 – 91501-970 – Porto Alegre – RS, Brasil
collischonn@iph.ufrgs.br

⁴ Universidade de São Paulo – USP/IAG
CEP 05508-090 – São Paulo – SP, Brasil
humberto@model.iag.usp.br

⁵ Environmental Change Institute – University of Oxford
Post Code OX1 3QY – Oxford, United Kingdom
yadvinder.malhi@ouce.ox.ac.uk

⁶ Numerical Terrestrial Simulation Group – University of Montana
Post Code 59812 – Missoula - MT, United States
{qiaozhen, swr}@ntsg.umt.edu

Abstract. Tropical rainforests are a major source of terrestrial evapotranspiration, playing an important role in global hydrology and atmospheric circulation. Predict accurately evapotranspiration in tropical biomes is a significant challenge to our understanding of climate dynamics, terrestrial water balance, terrestrial ecosystems productivity and even partitioning mass and energy between surface and atmosphere. Estimates of evapotranspiration at the 1 km spatial resolution are now produced operationally for the global terrestrial surface using MODIS remote sensing data through MOD16 algorithm. Ground-based measurements of energy fluxes at flux tower sites installed in tropical biomes offer opportunities for validating MOD16 products. Here we examined such comparisons in the Amazon forest at 8 sites. We computed a six-year mean against a water balance over the Amazon basin as well. Intercomparison of the monthly MOD16 estimates of evapotranspiration yielded correlations from 0.10 to 0.69 and averaged root mean squared error of 37%. MOD16 algorithm tended to be less accurate at misclassified sites – the algorithm is coupled to land use and land cover information and misclassification leads to the selection of wrong parameters for vapor pressure deficit and minimum air temperature for stomatal conductance constraints, resulting in less accurate ET estimates. Comparison of the six-year average annual ET over the Amazon basin resulted in a mean error of $11\pm 6\%$ or 118 ± 60 mm yr⁻¹. MOD16 estimated an Amazonian wide-basin evapotranspiration of 1181 mm yr⁻¹. Our results indicate significant potential for regional mapping and monitoring evapotranspiration using MODIS remote-sensed information.

Palavras-chave: calor latente, florestas tropicais, fluxos de energia, MOD16, MODIS, vapor d'água.

1. Introdução

A Bacia do rio Amazonas cobre uma área de $6,2 \times 10^6 \text{ km}^2$ e contém o maior rio do mundo, com uma descarga aproximada de $6 \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$, o que representa aproximadamente 20% da descarga mundial de água doce nos oceanos. A cobertura natural da bacia amazônica corresponde principalmente a florestas pluviais tropicais, com dossel densamente fechado, entretanto partes significativas da bacia também são cobertas por áreas de cerrado. As trocas de energia e umidade nesse complexo sistema floresta-rio exercem um papel importante no processo de circulação global, atuando como fonte e sumidouro de dióxido de carbono e gases-traço como óxido nitroso, metano e carbono orgânico.

Estimativas obtidas a partir de modelos de simulação indicam que a evapotranspiração na bacia amazônica varia entre um intervalo de 2,7 a 5,2 mm dia^{-1} , com média de 3,9 mm dia^{-1} , enquanto que, a partir de observações em campo, obteve-se valores entre 3,1 e 3,9 mm dia^{-1} . Os padrões sazonais dos fluxos de energia e radiação variam significativamente ao longo da bacia amazônica. Em áreas sob influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ($0\sim 4^\circ\text{S}$), os máximos dos fluxos de calor latente ocorrem durante a estação seca, fortemente controlados pelo saldo de radiação, enquanto que ao sul da Bacia Amazônica ($\sim 10^\circ\text{S}$), esses processos variam de acordo com a precipitação, umidade do solo e com variações nos índices de vegetação (Rocha et al., 2009). Nesse contexto, estimativas precisas de ET são essenciais para entender potenciais alterações no ciclo hidrológico em escala regional e global a partir de diferentes cenários de mudanças climáticas, além de reduzir significativamente as incertezas na modelagem do balanço hídrico global nessas áreas e melhorar a qualidade das informações usadas nessas aplicações.

O algoritmo MOD16 (Mu et al., 2011) combina dados de sensoriamento remoto e dados meteorológicos para estimar a ET global, baseando-se na equação de Penman-Monteith a partir da qual são calculados a transpiração das plantas e do dossel e a evaporação do solo. A acurácia das estimativas de ET depende principalmente de dois fatores: (i) do modelo propriamente dito e de sua parametrização e (ii) da acurácia dos dados de entrada desse modelo. Dentro desse contexto, o objetivo desse artigo consiste em avaliar a acurácia sazonal e espacial do algoritmo MOD16 entre o período 2000-2006 na bacia do rio Amazonas. Como objetivos específicos, buscou-se: (i) analisar a acurácia do algoritmo em diferentes usos e coberturas da terra; (ii) analisar o fechamento do balanço hídricos na bacia do rio Amazonas e nos seus principais tributários; e, (iii) quantificar a variabilidade espacial e sazonal do processo de evapotranspiração na bacia do rio Amazonas em diferentes escalas temporais.

2. Materiais e métodos

2.1. Sítios de monitoramento de vórtices turbulentos

Os sítios de monitoramento utilizados nesse estudo para validar os resultados do algoritmo MOD16 fazem parte do Experimento de Larga-Escala da Biosfera e Atmosfera na Amazônia (LBA) e englobam uma ampla gama de usos e cobertura da terra no bioma amazônico (tabela 1). Oito torres de fluxo instaladas em diferentes condições de uso e cobertura da terra no bioma amazônico (figura 1), cobrindo áreas de floresta pluvial tropical (sítios CAX, K34, K67), planícies de inundação sazonal (sítio BAN), floresta sazonal semi-decidual (sítio RJA), floresta com desmatamento seletivo (sítio K83), cultivos agrícolas (sítio K77) e pastagens (sítio FNS), foram utilizadas para validação dos resultados. Esses sítios apresentam intensas variações nos padrões sazonais de precipitação, radiação e nos fluxos de energia. Para análise dos dados medidos, foram selecionados apenas dados diários de calor latente com período de falhas inferior a 15% nas medições de 30 minutos ($n \geq 40$). Os dados armazenados de calor latente em médias de 30 minutos foram convertidos em evapotranspiração e integrados em períodos mensais e anuais.

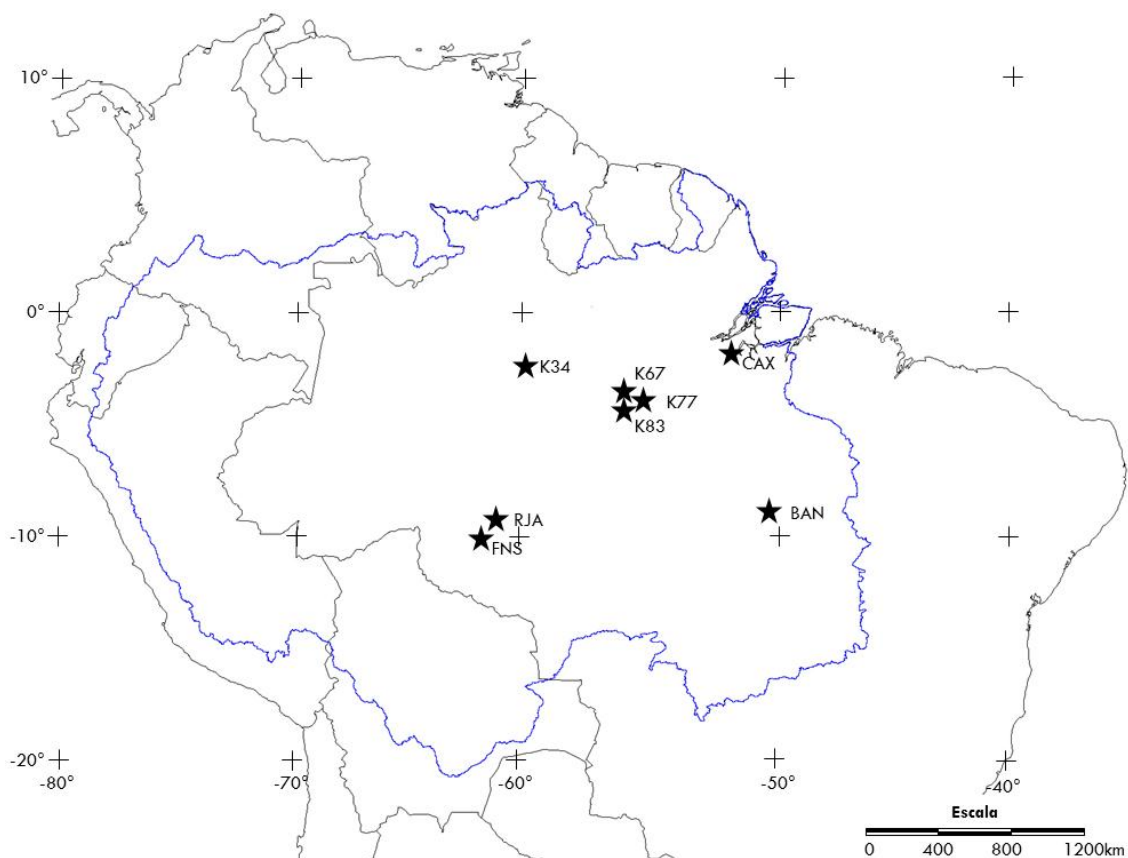


Figura 1. Localização dos sítios de monitoramento instalados em diferentes condições de uso e cobertura da terra na Bacia Amazônica.

2.2. Análise do fechamento do balanço hídrico

Para verificar o fechamento anual do balanço hídrico entre o período de 2000 a 2006 na Bacia do rio Amazonas utilizou-se dados de precipitação do sensor *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) produto 3B42 coleção 6 (Huffman et al., 2007) além de dados de vazão diária do Rio Amazonas em Óbidos (Agência Nacional de Águas, 2011). A estação fluviométrica em Óbidos está a aproximadamente 900 km do delta estuarino do rio Amazonas e é considerada para efeitos práticos nesse estudo como o exutório da bacia.

3. Resultados e discussões

3.1. Validação das estimativas mensais e anuais

A tabela 1 os resultados de validação das estimativas de evapotranspiração mensal e anual nos sítios analisados. A acurácia do algoritmo MOD16 está diretamente relacionada à classificação de uso e cobertura da terra usada no produto MOD12Q1. Nos sítios em que a classificação é coerente com o uso e cobertura da terra (considerando-se a classificação dos sítios fornecida pelo Programa LBA), como K34, K67, K77 e K83, os resultados apresentam maior acurácia quando comparados com os sítios que apresentam classificação incoerente do uso e cobertura da terra, como BAN, RJA e FNS.

Tabela 1. Comparação da ET mensal e anual estimada pelo algoritmo MOD16 e observada pelo sistema de correlação de vórtices turbulentos em diferentes sítios de monitoramento da Bacia Amazônica.

Sítio	Classificação do bioma		RMSE Mensal (%)	RMSE Anual (%)	ET anual ¹ (mm)	PPT anual ² (mm)
	Programa LBA	MOD12Q1				
K34	Floresta tropical latifoliada	Floresta tropical latifoliada	18	6,9	1244	2284
K67	Floresta tropical latifoliada	Floresta tropical latifoliada	20	2,5	1140	1811

K83	Floresta tropical latifoliada	Floresta tropical latifoliada	22	13	1134	1811
RJA	Floresta sazonal semi-decidual	Floresta tropical latifoliada	52	47	1294	2173
BAN	Cerrado/Cerradão com inundação sazonal	Floresta tropical latifoliada	20	6,7	1227	1766
K77	Pastagem/Agricultura	Mosaico de vegetação natural e agricultura	33	13	1153	1811
FNS	Pastagem	Savana (Cerrado)	94	69	1324	2173

Notas: ¹ET média anual (2000-2006) estimada pelo algoritmo MOD16. ²PPT anual média observada por Rocha et al. (2009).

O algoritmo MOD16 apresenta melhor performance nos sítios instalados em áreas de floresta pluvial tropical (K34, K67 e K83). Os sítios BAN, RJA e FNS, que apresentam incertezas na classificação de uso e cobertura da terra e consequentemente utilização incorreta dos parâmetros baseados nos bioma, apresentam menor acurácia quando comparados aos sítios corretamente classificados. As incertezas na avaliação pontual da evapotranspiração estimada através do algoritmo MOD16 são semelhantes às incertezas verificadas na medição dos fluxos de H e LE, que podem se aproximar de 10% (podendo chegar a 25%) em escala anual (Kruijt et al., 2004), e no balanço de energia das torres de monitoramento de vórtices turbulentos, que variam entre 20 e 30% (Baldocchi et al., 2008). Além das incertezas associadas ao processo de medição e ao fechamento do balanço de energia, o fator de escala também deve ser levado em consideração. O *footprint* dos dados de sensoriamento remoto varia entre 1 e 110 km, enquanto que o *footprint* das torres de fluxo normalmente são inferiores a 1 km, sugerindo que, a partir da análise em diferentes resoluções espaciais, a comparação entre torres de fluxo e dados de sensoriamento remoto é sempre problemática.

3.2. Fechamento do balanço hídrico

Para avaliar o fechamento do balanço hídrico, determinaram-se os valores mensais médios de precipitação e evapotranspiração para toda a Bacia Amazônica entre o período 2000-2006 (figura 2). Observa-se que a precipitação média mensal varia entre 80 mm mês⁻¹ (agosto), durante a estação seca, e 240 mm mês⁻¹ (março) durante a estação chuvosa. O primeiro trimestre (JFM) constitui-se no período mais chuvoso, com média de 217 mm mês⁻¹, uma vez que a ZCIT encontra-se posicionada sobre a Bacia Amazônica. O terceiro trimestre (JAS) é o período menos chuvoso, com média de 91 mm mês⁻¹, quando a ZCIT desloca-se ao norte (sobre a América Central) e o sistema atmosférico na Amazônia é dominado principalmente pelo ramo descendente da Célula de Hadley, induzindo um período de seca característico (Fisch et al., 1998). A precipitação média anual é de 1963±146 mm, coerente com a precipitação estimada a partir da interpolação de dados obtidos em estações meteorológicas, com variabilidade interanual entre 1660 e 2050 mm (Nepstad et al., 2004) ou ainda da média anual de 2180 mm (Malhi e Wriath, 2004).

A evapotranspiração média apresenta variações entre 86 mm mês⁻¹ (junho) no início da estação seca e 112 mm mês⁻¹ (outubro) no início da estação chuvosa. O quarto trimestre (OND) apresenta a maior média ao longo do ano (110 mm mês⁻¹), enquanto o segundo trimestre (AMJ) apresenta a menor média (90 mm mês⁻¹). A evapotranspiração média anual é de 1181±16 mm, diferentemente daquelas estimadas por Fisher et al. (2009), de 1370 mm (para o período 1986-1995) e 1096 mm ano⁻¹ e muito inferiores a variabilidade média interanual estimada por Nepstad et al. (2004), com valores entre 1612 e 1728 mm (para o período 1996-2001).

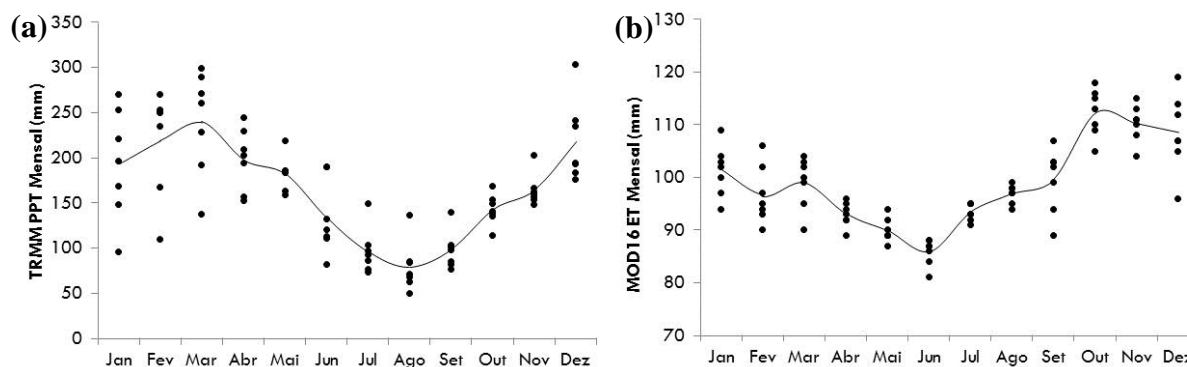


Figura 2. Valores mensais médios da precipitação estimada pelo TRMM 3B42 (a) e evapotranspiração estimada pelo MOD16 (b) para toda a Bacia Amazônica durante o período 2000-2006. A linha sólida representa a média mensal desse período.

A tabela 2 apresenta o fechamento do balanço hídrico na Bacia Amazônica considerando a área definida pelo exutório em Óbidos. Para o período analisado, a média anual baseada no balanço hídrico corresponde a 1091 ± 45 mm, enquanto essa média estimada pelo MOD16 corresponde a 1181 ± 16 mm, o que corresponde a uma superestimativa anual de 11,1% (ou 118 mm). Para a mesma bacia, [Vinukollu et al. \(2011\)](#) obtiveram evapotranspiração média anual de 1041 mm (balanço hídrico), baseando-se em dados do *Global Precipitation Climatology Center* (GPCC) e Q do *Global River Discharge Center* (GRDC) e evapotranspiração anual de 1188 mm estimada para o período 2003-2004 a partir do algoritmo SEBS ([Su, 2002](#)), o que representa uma diferença média de 14% (ou 147 mm ano^{-1}) no fechamento do balanço hídrico.

Tabela 2. Fechamento do balanço hídrico na Bacia Amazônica para o período 2000-2006.

Ano	PPT _{TRMM} (mm)	Q _{ANA} (mm)	ET = PPT _{TRMM} - Q _{ANA} (mm)	ET _{MOD16} (mm)	Diferença (%)	Diferença (mm)
2000	2092	1017	1075	1239	15,2	164
2001	1996	980	1016	1189	20,3	207
2002	2119	994	1125	1187	8,2	92
2003	2019	952	1067	1175	12,4	132
2004	2032	918	1114	1178	9,1	101
2005	2057	904	1153	1149	1,4	16
2006	2238	*	--	1183	--	--
Média	2079	960	1091	1181	11,1	118
Desvio	76	40	45	16	6,0	60

Nota: *Os dados de vazão do Rio Amazonas durante o ano de 2006 não foram disponibilizados no sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas, impossibilitando o cálculo do fechamento do balanço hídrico nesse ano.

Apesar da superestimativa da ET média anual de 11,1% do MOD16 em relação a ET estimada pelo fechamento do balanço hídrico, salienta-se que essas incertezas não devem ser associadas apenas ao algoritmo MOD16, uma vez que a PPT estimada pelos sensores do TRMM também apresenta inaccurácias. Observou-se que o TRMM apresenta tendência de subestimativa em casos de altas taxas de precipitação ([Malhi et al., 2009](#)), o que poderia sugerir valores superiores a 2079 mm ano^{-1} e evapotranspiração estimada pelo balanço hídrico superior a 1091 mm ano^{-1} , alterando assim a acurácia do fechamento do balanço hídrico.

3.3. Variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração

Para compreender a variabilidade espacial e temporal do processo de precipitação e evapotranspiração na Bacia Amazônica, os mapas mensais foram reagrupados em intervalos de tempo trimestrais (figura 3).

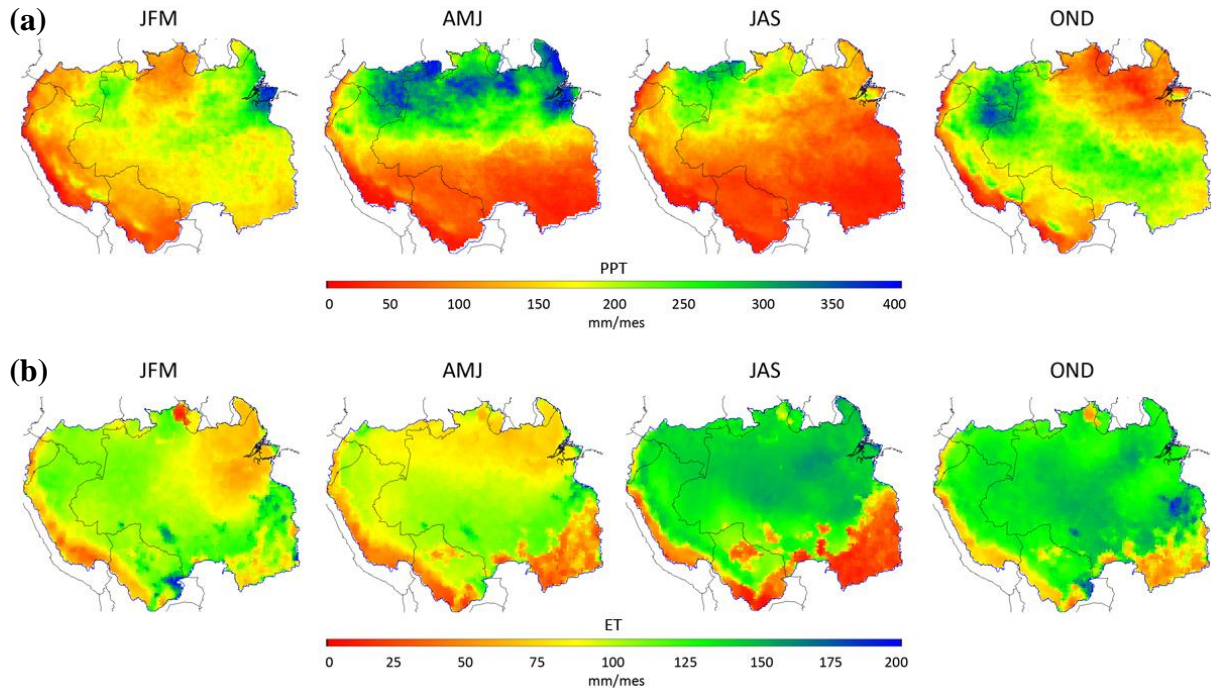


Figura 3. Média sazonal (JFM, AMJ, JAS, OND) para o período 2000-2006 da precipitação estimada a partir do sensor TRMM 3B42 (a) e da evapotranspiração estimada a partir do algoritmo MOD16 (b) na Bacia Amazônica.

Entre janeiro e março (JFM) os valores máximos de evapotranspiração (entre 110 e 125 mm m-1) ocorrem nos setores noroeste e sul da Bacia Amazônica, enquanto a precipitação máxima ocorre no setor nordeste da bacia, próximo ao delta estuarino do Rio Amazonas (valores superiores a 300 mm m-1). Entre abril e junho (AMJ), a evapotranspiração concentra-se principalmente na parte sul da bacia (aproximadamente 100 mm m-1), coincidente com os menores índices de precipitação (entre 50 e 75 mm m-1), enquanto que a parte norte apresenta menores índices de evapotranspiração (entre 60 e 90 mm m-1) e maiores de precipitação (acima de 200 mm m-1). O período compreendido entre julho e setembro (JAS) caracteriza-se como a estação seca, com índices de precipitação inferiores a 100 mm m-1 em praticamente toda extensão da Bacia Amazônica. Entretanto, observa-se que esse período apresenta os maiores índices de evapotranspiração (superiores a 110 mm m-1), superando o volume de 150 mm m-1 na região central e no norte-nordeste da bacia.

Durante o período compreendido entre outubro e dezembro (OND) também ocorrem elevadas taxas de evapotranspiração (superiores a 100 mm m-1) ao longo de toda extensão da bacia, com os maiores índices de evapotranspiração ocorrendo em sua porção oriental, quando os índices de precipitação são inferiores a 100 mm m-1 nessas áreas, sendo consistente com observações de campo (Nepstad et al., 2004; Rocha et al., 2004). O aumento da evapotranspiração entre julho e novembro, durante a estação seca, é consistente com o aumento dos índices de vegetação e de radiação em áreas compostas por florestas tropicais (Huete et al., 2006). Em contrapartida, áreas de transição entre os biomas amazônico e cerrado localizadas no setor sudeste da Bacia Amazônica, que se caracterizam principalmente pela conversão de vegetação natural em pastagens e áreas agrícolas com grande suscetibilidade ao estresse hídrico (Aragão et al., 2007), apresentam os menores índices de precipitação (inferiores a 1.600 mm ano^{-1}) e evapotranspiração (inferiores a 800 mm ano^{-1}), situação que se verifica tanto na estação chuvosa quanto na estação seca.

A figura 4 apresenta as anomalias de precipitação e evapotranspiração nos quatro trimestres (JFM, AMJ, JAS, OND) do ano de 2005, considerando a normalização em função

do período 2000-2006. As anomalias negativas de evapotranspiração iniciaram-se no primeiro trimestre (JFM) de 2005, localizados na Amazônia Ocidental, coincidente com as anomalias negativas de precipitação registrados por Marengo et al. (2008) nos rios Solimões e Negro. No período mais intenso da seca (JAS) essas anomalias concentraram-se no setor meridional e ocidental da bacia, em áreas previamente identificadas por Saleska et al. (2007). Os setores mais afetados pela seca também são coincidentes com as áreas que apresentam as maiores incidências de desmatamento (com posterior conversão para pastagens e áreas agrícolas) e focos de incêndios (Aragão e Shimabukuro, 2010).

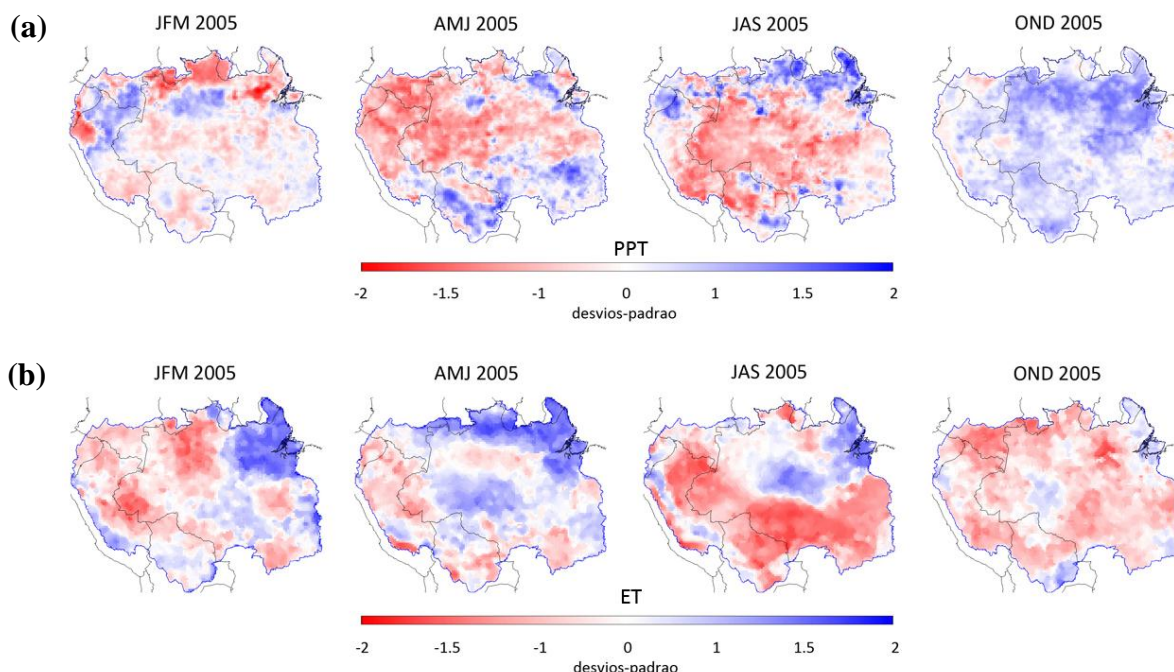


Figura 4. Evolução temporal e espacial das anomalias de precipitação estimada a partir do sensor TRMM 3B42 (a) e da evapotranspiração estimada a partir do algoritmo MOD16 (b) na Bacia Amazônica durante o ano de 2005 em relação ao período 2000-2006.

4. Considerações finais

As análises aqui realizadas sugerem que o algoritmo MOD16 captura as respostas da vegetação em função da variabilidade climática em larga escala. Considerando que o algoritmo apresenta parametrização para ser aplicado em escala global, os resultados estão em um intervalo aceitável de acurácia, indicando um potencial significativo no monitoramento espacial e temporal do processo de ET de forma contínua e sistemática a partir de informações obtidas por sensoriamento remoto.

5. Referências bibliográficas

Agência Nacional de Águas. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 23 de Novembro de 2011.

Aragão, L.E.O.C.; Malhi, Y.; Roman-Cuesta, R.M.; Saatchi, S.; Anderson, L.O.; Shimabukuro, Y.E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L07701, 2007.

Aragao, L.E.O.C.; Shimabukuro, Y.E. The incidence of fire in amazonian forests with implications for REDD. **Science**, v. 328 (5983), p. 1275-1278, 2010.

Baldocchi, D. 'Breathing' of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. **Australian Journal of Botany**, v. 56, p. 1-26, 2008.

- Fisch, G.; Marengo, J.A.; Nobre, C.A. Uma revisão geral do clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 28 (2), p. 101-126, 1998.
- Fisher, J.B.; Malhi, Y.; Bonal, D.; Rocha, H.R.; Araújo, A.C.; Gamo, M.; Goulden, M.L.; Hirano, T.; Huete, A.R.; et al. The land-atmosphere water flux in the tropics. **Global Change Biology**, v. 15, p. 2694-2714, 2009.
- Huete, A.R.; Didan, K.; Shimabukuro, Y.E.; Ratana, P.; Saleska, S.R.; Hutyrá, L.R.; et al. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v. 33, L06405-L06408, 2006.
- Huffman, G.J.; Adler, R.F.; Bolvin, D.T.; Gu, G.; Nelkin, E.J.; Bowman, K.P.; Hong, Y.; Stocker, E.F.; Wolff, D.B. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8 (1), p. 38-51, 2007.
- Kruijt, B.; Elbers, J.A.; Von Randow, C.; et al. The robustness of eddy correlation fluxes for Amazon rainforest conditions. **Ecological Applications**, v. 14 (4), S101-S113, 2004.
- Malhi, Y.; Wright, J. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 359 (1443), p. 311-329, 2004.
- Malhi, Y.S.; Aragão, L.E.O.C.; Galbraith, D.; Huntingford, C.; Fisher, R.; Zelazowski, P.; Sitch, S.; Mcsweeney, S.; Meir, P. Tipping Elements in Earth Systems Special Feature: Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 106 (49), p. 20610-20615, 2009.
- Marengo, J.A.; Nobre, C.A.; Tomazella, J.; et al. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21 (3), p. 495-516, 2008.
- Mu, Q.; Zhao, M.; Running, S.W. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115 (8), p. 1781-1800, 2011.
- Nepstad, D.; Lefebvre, P.; Da Silva, U.L.; Tomasella, J.; Schlesinger, P.; et al. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. **Global Change Biology**, v. 10 (5), p. 704-717, 2004.
- Rocha, H.R.; Goulden, M.L.; Miller, S.D.; Menton, M.C.; Pinto, L.D.V.O.; Freitas, H.C.; Figueira, A.M.S. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. **Ecological Applications**, v. 14 (4), p. S22-S32, 2004.
- Rocha, H.R.; Manzi, A.O.; Cabral, O.M.; Miller, S.D.; Goulden, M.L.; Saleska, S.R.; Coupe, N.R.; Wofsy, S.C.; Borma, L.S.; et al. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, G00B12, p. 1-8, 2009.
- Saleska, S.R.; Didan, K.; Huete, A.R.; Rocha, H.R. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v. 318 (5850), p. 612, 2007.
- Su, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6 (1), p. 85-99, 2002.
- Vinukollu, R.K.; Wood, E.F.; Ferguson, C.R.; Fisher, J.B. Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three process-based approaches. **Remote Sensing of Environment**, v. 115 (3), p. 801-823, 2011.