

Utilização de dados MOD16 para análise da evapotranspiração em remanescentes florestais da Mata Atlântica no estado de São Paulo entre 2000 e 2010

Elisabete Caria Moraes¹
Gabriel de Oliveira¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{bete, gdo}@dsr.inpe.br

Abstract. The Atlantic Rainforest has been intensely devastated since the beginning of the colonization of Brazil, mainly due to logging for the generation of urban and rural areas. Although the Atlantic Rainforest is reduced and fragmented, its remnants are important sources of heat and water vapor to the atmosphere. The present study aimed to characterize and to analyze, based on MOD16 data, the temporal dynamics of evapotranspiration in Atlantic Rainforest remnants in São Paulo state for the period from January 2000 to December 2010. To achieve this, MOD16 global evapotranspiration data as well as forest remnant maps produced by SOS Mata Atlântica and INPE (2013) were used. The behaviour of evapotranspiration in São Paulo state as well as in Atlantic Rainforest remnants showed a strong seasonal pattern, with values peaking during the rainy season and with lowest values occurring in the dry season. In respect to Atlantic Rainforest remnants, time series analysis revealed an average annual evapotranspiration of 1248.3 mm year⁻¹, with the dry and the rainy seasons accounting for ≈38% and ≈62%, respectively. Moreover, it was observed that, on average for the period, the monthly evapotranspiration in the Atlantic Rainforest remnants was ≈52% higher than the verified for São Paulo state, which demonstrates the importance of these forests in the regional hydrological regime.

Palavras-chave: evapotranspiração, MOD16, Mata Atlântica, sensoriamento remoto, evapotranspiration, MOD16, Atlantic Rainforest, remote sensing.

1. Introdução

A Mata Atlântica foi intensamente devastada desde o início da colonização do Brasil devido, sobretudo, à extração de madeira e à ocupação rural e urbana. Estudos recentes mostram que da área original da Mata Atlântica no Brasil, calculada em torno de 1,3 milhões de km², restam apenas 8,5% (SOS Mata Atlântica e INPE, 2013). O estado de São Paulo engloba os maiores fragmentos de Mata Atlântica do país. Estima-se que restam 13,9% das formações florestais originais de Mata Atlântica nesse estado (Kronka et al., 2005).

Embora a Mata Atlântica esteja reduzida e fragmentada, seus remanescentes são importantes fontes de calor e vapor de água para a atmosfera, onde o calor latente liberado no processo de evapotranspiração influencia na circulação atmosférica nos trópicos e o vapor de água contribui para a geração de precipitação regional (Swann et al., 2012). Assim, entender o comportamento da variabilidade sazonal anual e interanual dos processos evapotranspirativos em biomas tropicais torna-se necessário para melhor compreender o particionamento energético entre a superfície e a atmosfera, o que possibilita detalhar as características da camada limite utilizadas em modelos de previsão do tempo e clima (Ruhoff et al., 2012).

Em termos gerais, estimativas de evapotranspiração são obtidas em superfície por instrumentos instalados em estações meteorológicas, no entanto, essas medidas possuem alto custo e não representam espacialmente a variabilidade desses processos (Papadavid e Hadjimitsis, 2012). Diante disso, o sensoriamento remoto se mostra como alternativa, pois possibilita a determinação de distintas variáveis ambientais com ampla cobertura espaço-temporal. O algoritmo MOD16 (Mu et al., 2011), desenvolvido para a estimativa da evapotranspiração global da superfície, tem sido bastante aceito e utilizado pela comunidade científica em estudos hidrológicos de larga escala (Liu et al., 2013).

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo caracterizar e analisar, com base em dados do algoritmo MOD16, a dinâmica temporal da evapotranspiração em remanescentes

florestais da Mata Atlântica no estado de São Paulo para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende o estado de São Paulo, localizado na região sudeste do Brasil (Figura 1). Os remanescentes florestais da Mata Atlântica estão concentrados, principalmente, nas encostas das serras do Mar, da Bocaina e da Mantiqueira, e nos vales do Ribeira e do Paraíba, locais onde a cobertura vegetal nativa foi menos alterada devido à dificuldade de mecanização agrícola (Joly e Speglich, 2003).

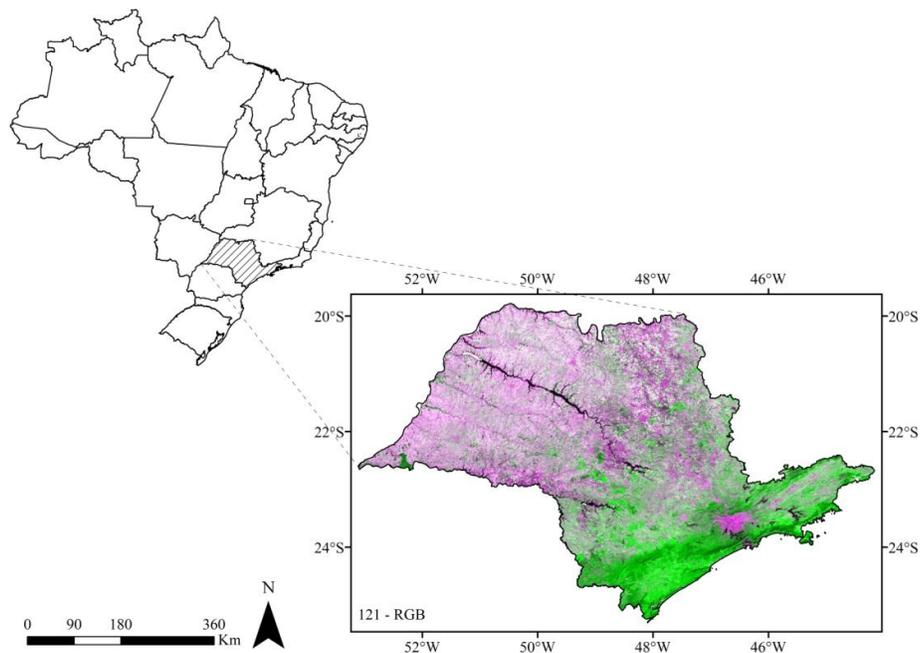


Figura 1. Localização do estado de São Paulo. A composição colorida foi obtida com imagens do sensor MODIS/Aqua de 23/08/2006.

2.2 Dados MOD16

O algoritmo MOD16 (Mu et al., 2011) foi concebido para estimar a evapotranspiração global da superfície a partir de imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (Terra e Aqua) e dados meteorológicos provenientes do *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO). O MOD16 é uma revisão do algoritmo proposto por Cleugh et al. (2007), que adaptaram a equação de Penman-Monteith para uso com dados de sensoriamento remoto. Os dados de entrada MODIS requeridos para o algoritmo MOD16 possuem resolução espacial entre 500 m e 1 km e incluem os produtos globais de uso e cobertura da terra, índice de área foliar, radiação fotossinteticamente ativa e albedo. Com relação aos parâmetros meteorológicos necessários para o algoritmo, são utilizados dados de reanálise diários do GMAO referentes à radiação solar incidente, temperatura do ar e pressão de vapor da água, com resolução espacial de $1,00^{\circ} \times 1,25^{\circ}$ (Zhao et al., 2005). Em suma, os dados MOD16 possuem 1 km de resolução espacial e abrangem uma superfície de ≈ 109 milhões de km^2 .

Os dados MOD16 foram adquiridos do endereço eletrônico do *Numerical Terradynamic Simulation Group/The University of Montana* (<http://www.ntsug.umt.edu/project/mod16>).

Assim, selecionaram-se os *tiles* H13V10 e H13V11 correspondentes ao produto de evapotranspiração real mensal, expresso em $\text{mm m\ddot{e}s}^{-1}$, para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010. Os dados MOD16 são disponibilizados em projeção sinusoidal, dessa forma, as imagens foram inicialmente tratadas no aplicativo MODIS *Reprojection Tools* (MRT). Os dados foram reprojatados para coordenadas geográficas, datum WGS 84 e, então, convertidos para o formato GeoTIFF. Com as imagens inicialmente tratadas foram executadas, no programa *Envi 4.5*, operações para reescalonamento dos valores brutos, e mascaramento de áreas urbanas, áreas permanentemente úmidas e corpos de água. Por fim, realizou-se o recorte das áreas de interesse.

2.3 Remanescentes florestais da Mata Atlântica

Desde a década de 1980 a Fundação SOS Mata Atlântica em conjunto com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) vêm mapeando a cobertura florestal do bioma Mata Atlântica. Essas instituições utilizam imagens de sensoriamento remoto para produzir o ‘Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica’. Esses mapeamentos têm possibilitado determinar a distribuição espacial dos remanescentes florestais e de ecossistemas associados da Mata Atlântica, monitorar as alterações da cobertura vegetal, e gerar informações permanentemente aprimoradas e atualizadas desse bioma (Farinaci e Batistella, 2012).

As informações sobre os remanescentes florestais foram obtidas a partir do mapeamento realizado por SOS Mata Atlântica e INPE (2013). Esse mapeamento serviu para atualização do período 2011-2012, ou seja, consistiu em registrar alterações naqueles polígonos referentes aos fragmentos florestais (remanescentes florestais, mangues e restinga) que já haviam sido identificados nas versões anteriores do ‘Atlas’. Para tanto, foram utilizadas imagens do sensor orbital LISS III/Resourcesat-1 do segundo semestre de 2012. Os polígonos de fragmentos florestais foram adquiridos sob forma de arquivos vetoriais no endereço eletrônico <<http://mapas.sosma.org.br/>> e, então, editados no programa *ArcGis 9.3*. O processo de edição consistiu em selecionar os polígonos referentes aos remanescentes florestais que possuísem área igual ou superior a 100,0 ha. O fato de selecionar somente os polígonos $\geq 100,0$ ha se deu com o intuito de que as áreas avaliadas possuísem certa homogeneidade espacial. Cabe salientar que, como o estudo compreende o período de 2000 a 2010, subentende-se que os remanescentes florestais mapeados por SOS Mata Atlântica e INPE (2013), referentes à atualização do período 2011-2012, estavam em pé no período estudado.

3. Resultados e Discussão

Na Figura 2 é apresentada a distribuição espacial da evapotranspiração média mensal (janeiro a dezembro) no estado de São Paulo nos anos de 2000 a 2010. De modo geral, as imagens referentes à estação chuvosa (outubro a março) apresentam maiores valores de evapotranspiração em relação às imagens do período seco (abril a setembro). O processo de evapotranspiração está condicionado à variação da radiação solar incidente, ao processo de circulação atmosférica local, que regula o sistema de precipitações e as condições de umidade do ar e do solo, e às condições da vegetação, que apresentam modificações consideráveis de acordo com as estações chuvosas e secas (Ruhoff et al., 2009). Dentre esses condicionantes destaca-se a radiação solar, cuja quantidade incidente varia, entre outros fatores, conforme a época do ano (Fan e Thomas, 2013). Assim, esse comportamento é esperado, pois as maiores incidências de radiação solar no estado de São Paulo ocorrem durante a estação chuvosa (Giongo, 2010). Ainda, destaca-se que, ao longo do ano, os maiores valores de evapotranspiração estão situados nas regiões sul e leste, enquanto os menores valores localizam-se nas regiões norte e oeste do estado.

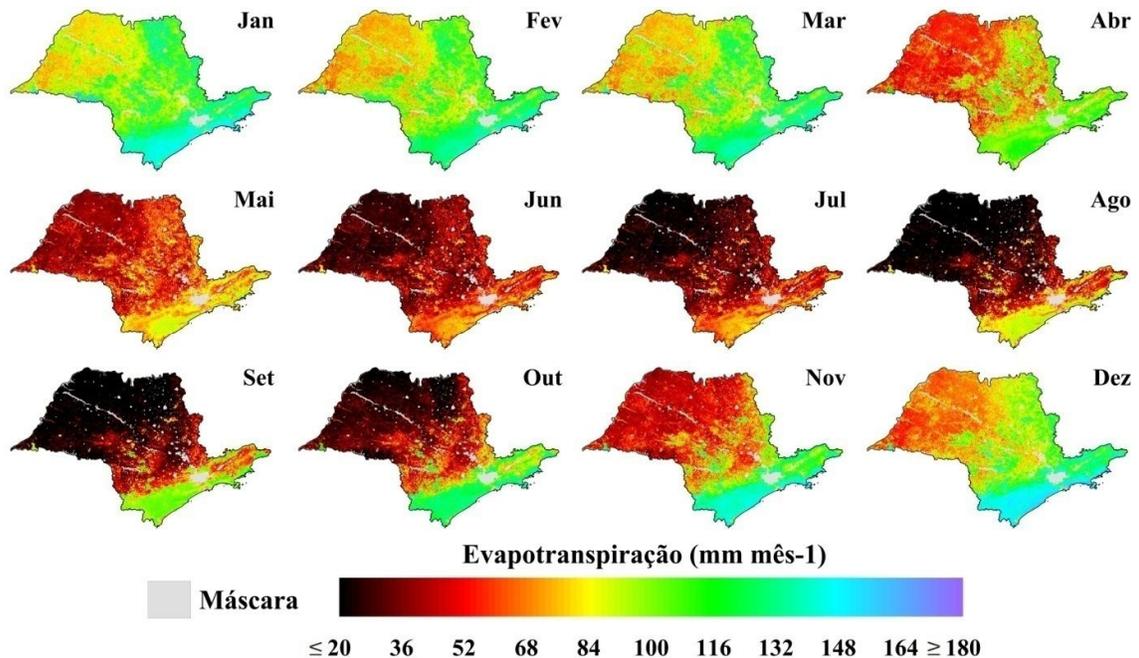


Figura 2. Distribuição espacial da evapotranspiração média mensal (mm mês⁻¹) (meses de janeiro (Jan), fevereiro (Fev), março (Mar), abril (Abr), maio (Mai), jun (Junho), julho (Jul), agosto (Ago), setembro (Set), outubro (Out), novembro (Nov) e dezembro (Dez)) no estado de São Paulo no período entre os anos de 2000 a 2010.

A Figura 3 ilustra a evapotranspiração mensal no estado de São Paulo entre o período de 2000 a 2010. A evapotranspiração mensal oscilou no intervalo entre 26,1 e 116,8 mm mês⁻¹, o que representa uma variação absoluta de 90,7 mm mês⁻¹. Nesse sentido, o menor valor de evapotranspiração mensal foi encontrado para julho de 2000 e o maior para janeiro de 2003. Ao considerar o período de 2000 a 2010 a evapotranspiração mensal correspondeu, em média, a 68,2 mm mês⁻¹.

Os meses de agosto e janeiro apresentaram, respectivamente, a menor e maior evapotranspiração média mensal, com valores de 36,6 e 107,1 mm mês⁻¹. A evapotranspiração média mensal na estação seca foi de 48,0 mm mês⁻¹, enquanto na estação chuvosa correspondeu a 88,3 mm mês⁻¹, o que demonstra um aumento de ≈84% dessa variável no período mais úmido do ano no estado de São Paulo. Os valores de evapotranspiração anual oscilaram entre 765,7 e 942,0 mm ano⁻¹, com os anos de 2003 e 2009 apresentando, respectivamente, o menor e maior valor. No ano de 2003 observaram-se valores de evapotranspiração mensal variando de 32,7 (agosto) a 116,8 mm mês⁻¹ (janeiro), enquanto no ano de 2009 verificaram-se valores variando de 44,6 (junho) a 110,4 mm mês⁻¹ (dezembro). No que diz respeito à evapotranspiração média anual, obteve-se um valor de 817,9 mm ano⁻¹. Os meses referentes à estação seca e chuvosa representaram, respectivamente, ≈35% e ≈65% da evapotranspiração média anual.

Salienta-se que as estimativas do algoritmo MOD16 não foram validadas no presente estudo. O ideal seria realizar a validação com medidas de superfície ao longo do estado de São Paulo de modo a identificar qual a margem de erro desses dados para as condições estudadas. No entanto, existe uma grande carência desse tipo de informação, tanto sob o ponto de vista espacial quanto temporal, o que dificulta esse tipo de análise. A título de comparação, Ruhoff (2011), em um estudo de validação do algoritmo MOD16, encontrou erros relativos entre 18 e 22% em áreas de florestas tropicais, 20% em áreas de inundação sazonal e 33% em áreas agrícolas. Por fim, destaca-se que os resultados observados com

relação ao regime da evapotranspiração no estado de São Paulo foram concordantes com os obtidos por Martins (2011) em um estudo de modelagem utilizando o algoritmo *Simple Biosphere Model* (SiB2).

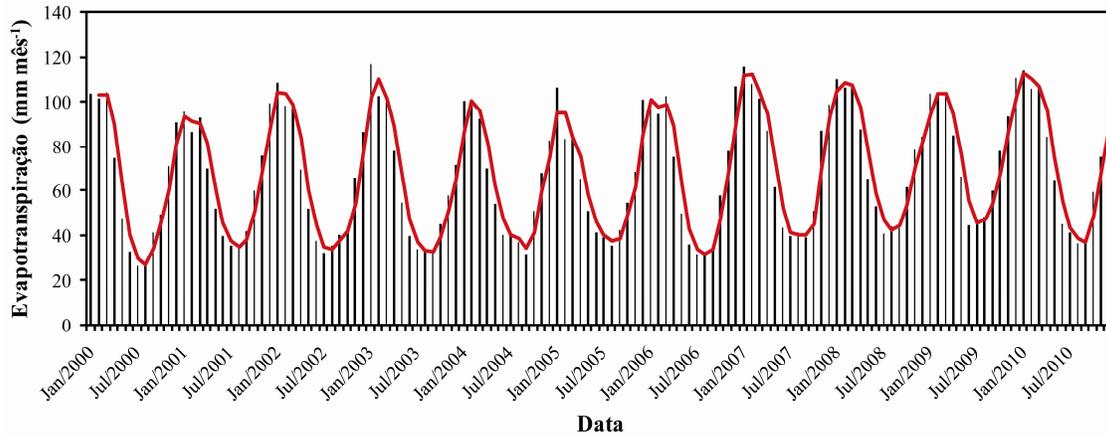


Figura 3. Evapotranspiração mensal (mm mês^{-1}) no estado de São Paulo entre janeiro de 2000 a dezembro de 2010. A linha vermelha representa a média móvel da série temporal (período=2).

A Figura 4 mostra os remanescentes florestais da Mata Atlântica no estado de São Paulo com área $\geq 100,0$ ha, e a sobreposição de polígonos de remanescentes, mapeados na região de São José do Rio Preto, em imagem do sensor MODIS/Terra de 27/06/2010. É possível observar que a maioria dos remanescentes localiza-se nas porções sul e leste do estado, em oposição às regiões norte e oeste (Joly e Speglich, 2003). Foram mapeados, para o período 2011-2012 em São Paulo, 25554 polígonos de remanescentes florestais, totalizando uma área de $\approx 2.421.538$ ha. Após a seleção dos remanescentes com área $\geq 100,0$ ha chegou-se a um número de 2054 polígonos, representando uma área de $\approx 1.914.331$ ha. Cabe salientar que as análises referentes à evapotranspiração se deram apenas para os remanescentes florestais da Mata Atlântica iguais ou superiores a 100,0 ha.

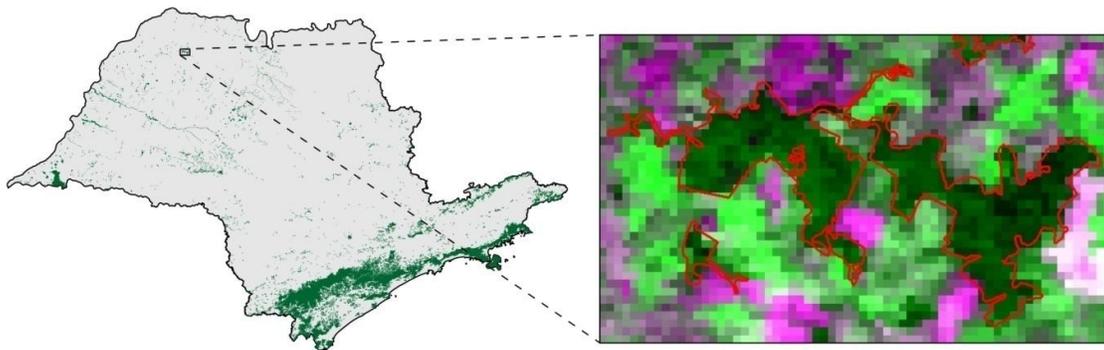


Figura 4. Remanescentes florestais da Mata Atlântica no estado de São Paulo com área igual ou superior a 100,0 ha. O recorte ilustra a sobreposição de polígonos de remanescentes, mapeados na região de São José do Rio Preto, em imagem do sensor MODIS/Terra (R1G2B1) do dia 27/06/2010.

A Figura 5 ilustra a evapotranspiração (mensal e média mensal) nos remanescentes florestais da Mata Atlântica entre o período de 2000 a 2010. Denota-se que a variabilidade temporal dos valores mensais caracteriza a sazonalidade desse parâmetro, com uma estação

seca e uma estação chuvosa bem definidas. A evapotranspiração mensal apresentou oscilação entre 55,3 e 144,6 mm mês⁻¹. Nesse sentido, o menor valor correspondeu a julho de 2000, enquanto o maior valor se referiu a dezembro de 2002. Na média para o período avaliado (2000 a 2010) a evapotranspiração mensal foi de 104,0 mm mês⁻¹. Cicco (2009) obteve, para microbacia experimental em área de Mata Atlântica no município de Cunha (SP), valores de evapotranspiração mensal oscilando entre 26,5 e 142,3 mm mês⁻¹, semelhantes aos obtidos no presente estudo. É válido destacar que, para o período de estudo, a evapotranspiração mensal nos remanescentes da Mata Atlântica foi, em média, ≈52% superior à verificada para o estado de São Paulo.

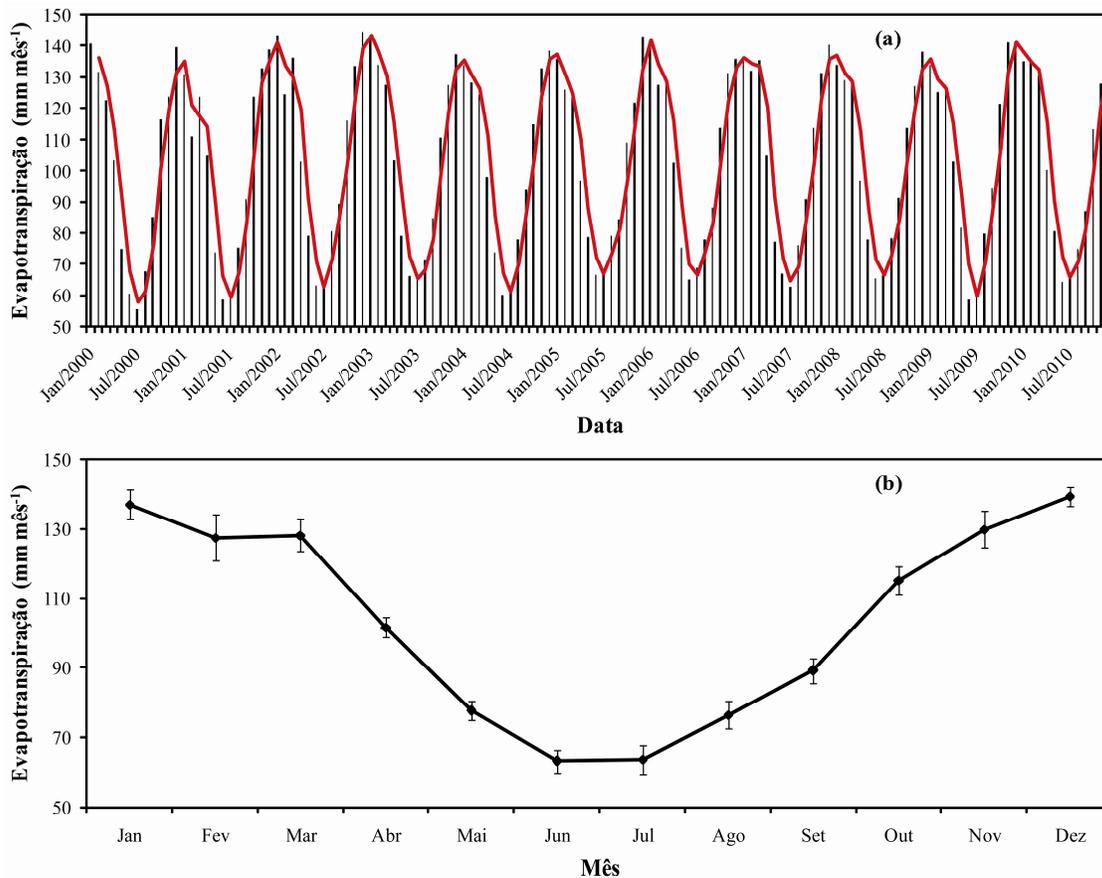


Figura 5. Evapotranspiração mensal (mm mês⁻¹) (a) e média mensal (mm mês⁻¹) (b) em remanescentes florestais da Mata Atlântica no estado de São Paulo entre janeiro de 2000 a dezembro de 2010. Em (a) a linha vermelha representa a média móvel da série temporal (período=2) e em (b) as barras verticais ilustram o desvio padrão.

Os valores de evapotranspiração média mensal variaram de 63,2 a 139,3 mm mês⁻¹, que corresponderam, respectivamente, aos meses de junho e dezembro. Nesse contexto, Anido (2002), em um estudo realizado no Parque Estadual da Serra do Mar (SP), observou valores de evapotranspiração média mensal variando de 35,8 (julho) a 95,0 mm mês⁻¹ (janeiro). A evapotranspiração média mensal para a estação seca foi de 78,6 mm mês⁻¹, enquanto na estação chuvosa foi de 129,5 mm mês⁻¹. A partir desses valores observa-se que a evapotranspiração média mensal nos remanescentes da Mata Atlântica foi ≈65% maior no período úmido em relação ao período seco. Os valores de evapotranspiração anual variaram entre 1220,4 (2000) e 1275,2 mm ano⁻¹ (2002), o que representa variação absoluta de ≈55 mm ano⁻¹, e relativa de ≈5%. A evapotranspiração mensal para os anos de 2000 e 2002 variou

entre 55,3 (julho) e 140,7 mm mês⁻¹ (janeiro), e entre 62,5 (julho) e 144,6 mm mês⁻¹ (dezembro), respectivamente. A evapotranspiração média anual foi de 1248,3 mm ano⁻¹, com os meses da estação seca e chuvosa representando, respectivamente, ≈38% e ≈62% desse total. Estudos de evapotranspiração em florestas tropicais mostram, de modo geral, valores variando, em termos médios anuais, entre 1000 e 1400 mm ano⁻¹ (Bruijnzeel, 1990). Especificamente com relação à Mata Atlântica no estado de São Paulo, Donato et al. (2008) obtiveram um valor médio anual de 697,5 mm ano⁻¹, aproximadamente 44% inferior ao obtido neste estudo.

4. Conclusões

O comportamento da evapotranspiração, tanto no contexto de São Paulo quanto nos remanescentes florestais, apresentou um forte padrão sazonal, com os maiores valores ocorrendo durante a estação chuvosa e os menores na estação seca. A análise das séries temporais referentes aos remanescentes da Mata Atlântica demonstrou uma evapotranspiração média anual de 1248,3 mm ano⁻¹, com os meses da estação seca e chuvosa representando, respectivamente, ≈38% e ≈62% desse total. Ainda, observou-se que, na média para o período, a evapotranspiração mensal nos remanescentes da Mata Atlântica foi ≈52% superior à verificada para o estado de São Paulo, o que demonstra a importância dessas florestas no regime hídrico regional.

Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela infraestrutura disponibilizada e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

- Anido, N. M. R. **Caracterização hidrológica de uma microbacia experimental visando identificar indicadores de monitoramento ambiental**. 2002. 69 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- Bruijnzeel, L. A. **Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review**. Amsterdam: Free University Amsterdam/UNESCO, 1990. 224 p.
- Cicco, V. **Determinação da evapotranspiração pelos métodos dos balanços hídrico e de cloreto e a quantificação da interceptação das chuvas na Mata Atlântica: São Paulo, SP e Cunha, SP**. 2009. 138 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- Cleugh, H. A.; Leuning, R.; Mu, Q. Z.; Running, S. W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 3, p. 285-304, 2007.
- Donato C. F.; Ranzini, M.; Cicco, V.; Arcova, F. C. S.; Souza, L. F. S. Balanço de massa em microbacia experimental com Mata Atlântica, na Serra do Mar, Cunha, SP. **Revista do Instituto Florestal**, v. 20, n. 1, p. 1-11, 2008.
- Fan, Z.; Thomas, A. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in Yunnan Province, SW China, 1961-2004. **Climatic Change**, v. 116, n. 2, p. 309-325, 2013.
- Farinaci, J. S.; Batistella, M. Variação na cobertura vegetal nativa em São Paulo: um panorama do conhecimento atual. **Revista Árvore**, v. 36, n. 4, p. 695-705, 2012.
- Giongo, P. R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2011. 122 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

- Joly, C. A.; Speglich, E. Programa Biota/Fapesp: um novo paradigma no estudo da conservação e do uso sustentável da biodiversidade. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 3, p. 41-43, 2003.
- Kronka, F. J. N.; Nalon, M. A.; Matsukuma, C. K.; Kanashiro, M. M.; Ywane, M. S. S.; Pavão, M.; Durigan, G.; Lima, L. M. P. R.; Guillaumon, J. R.; Baitello, J. B.; Borgo, S. C.; Manetti, L. A.; Barradas, A. M. F.; Fukuda, J. C.; Shida, C. N.; Monteiro, C. H. B.; Pontinha, A. A. S.; Andrade, G. G.; Barbosa, O.; Soares, A. P. **Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto Florestal, 2005. 200 p.
- Liu, Y.; Wu, G.; Zhao, X. Recent declines in China's largest freshwater lake: trend or regime shift?. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, p. 1-9, 2013.
- Martins, C. A. **Estimativa da evapotranspiração no estado de São Paulo com o modelo da biosfera SiB2**. 2011. 130 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- Mu, Q.; Zhao, M.; Running, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, 2011.
- Papadavid, G.; Hadjimitsis, D. Adaptation of SEBAL for estimating groundnuts evapotranspiration, in Cyprus. **South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics**, v. 1, n. 2, p. 59-70, 2012.
- Ruhoff, A. L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. 2011. 166 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- Ruhoff, A. L.; Saldanha, C. B.; Collischon, W.; Uvo, C. B.; Rocha, H. R.; Cabral, O. M. R. Análise multivariada do processo de evapotranspiração em áreas de cerrado e cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 4, p. 137-146, 2009.
- Ruhoff, A. L.; Paz, A. R.; Collischonn, W.; Aragão, L. E. O. C.; Rocha, H. R.; Malhi, Y. S. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical Savannas. **Remote Sensing**, v. 4, n. 3, p. 703-725, 2012.
- Fundação SOS Mata Atlântica (SOS Mata Atlântica); Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: Período 2011-2012**. São Paulo: SOS Mata Atlântica, 2013, 61 p.
- Swann, A. L. S.; Fung, I. Y.; Chiang, J. C. H. Mid-latitude afforestation shifts general circulation and tropical precipitation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 3, p. 712-716, 2012.
- Zhao, M.; Heinsch, F. A.; Nemani, R.; Running, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, n. 2, p. 164-176, 2005.