

Evapotranspiração Real da Bacia do Alto Rio Negro, Região Sul Brasileira, por meio do SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) e Balanço Hídrico

Patrícia Kazue Uda*, Cláudia Weber Corseuil*, Masato Kobiyama*
patricia.kazue@posgrad.ufsc.br; cwcorseuil@hotmail.com; masato.kobiyama@ufrgs.br

Recebido: 11/07/13 - revisado: 31/07/13 - aceito: 05/09/13

RESUMO

Informações espaciais de evapotranspiração real podem ajudar a relacionar uso do solo e uso da água, bem como, auxiliar a compreensão das demandas hídricas em uma bacia hidrográfica. O *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) é um modelo que estima a evapotranspiração real distribuída pelo balanço de energia à superfície, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. A bacia do alto Rio Negro (BARN) possui 3454 km², localiza-se no Planalto Norte Catarinense e no Primeiro Planalto Paranaense, com quase metade de sua área coberta por Floresta Ombrófila Mista (FOM). A FOM pertence ao bioma mata atlântica, que abriga de 1 a 8% do total de espécies de fauna e flora do planeta e tem, atualmente, 11,7% de sua área original. Os objetivos deste estudo foram (i) estimar a evapotranspiração real na BARN por meio do SEBAL e de imagens do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) em diferentes usos e coberturas do solo; e (ii) avaliar e comparar as estimativas do SEBAL com dados obtidos pelo balanço hídrico sazonal. Para a aplicação do SEBAL foram utilizadas imagens ASTER de abril de 2006 e dados meteorológicos. Foram observados os menores valores médios de evapotranspiração para as áreas com maior interferência antrópica, como solo exposto e áreas urbanas e os maiores para as áreas mais conservadas, como florestas e água. Solo exposto claro e área urbana apresentaram as menores médias (2,2 e 2,4 mm dia⁻¹, respectivamente). Para FOM, reflorestamentos de *Pinus sp* e água, os valores observados foram de 4,1 mm dia⁻¹, 4,3 mm dia⁻¹ e 5,0 mm dia⁻¹, respectivamente. As áreas de floresta (abrangem 71% da bacia) são as que mais contribuem para a perda de água da bacia do alto Rio Negro e apresentam altas taxas evapotranspirativas. Destaca-se a importância de estudos relacionados ao papel da FOM e dos reflorestamentos no balanço hídrico da bacia. Em escala mensal, o SEBAL simula o comportamento sazonal da evapotranspiração em função das condições climáticas.

Palavras-chave: evapotranspiração real, SEBAL, ASTER, balanço hídrico sazonal, bacia do alto Rio Negro.

INTRODUÇÃO

No âmbito de bacias hidrográficas, informações quantitativas das ofertas e demandas hídricas são indispensáveis para o manejo adequado dos recursos hídricos. Especificamente, a perda de água por evapotranspiração, constitui importante fase do ciclo hidrológico e sua quantificação pode ser utilizada na resolução de questões que envolvem o manejo de água, como o planejamento de áreas de cultivo irrigado, a determinação de níveis seguros de aquíferos, o planejamento de reservatórios de contenção para o controle de enchentes em áreas urbanas e o projeto e otimização de reservatórios de água para abastecimento público e industrial e geração de energia (BRUTASERT, 1982; WARD & TRIMBLE, 2004; TUCCI, 2007).

Atualmente, técnicas de sensoriamento remoto propiciam o fornecimento de dados geográficos relevantes e parâmetros em escala apropriada para uso em modelos hidrológicos distribuídos (STISEN *et al.*, 2008). Podem ser uma alternativa para a representação da evapotranspiração distribuída, frente às dificuldades de medições apresentadas pelos métodos diretos, bem como, às de espacialização dos resultados obtidos pelos métodos clássicos indiretos, que representam valores pontuais de localização específica.

Uma técnica utilizada para tal finalidade é o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), um modelo semi-empírico, desenvolvido por Bastiaansen (1995), que estima a evapotranspiração real distribuída como um resíduo do balanço de energia da superfície. A evapotranspiração para grandes áreas heterogêneas pode ser calculada através de imagens (*pixel-a-pixel*), aplicando um conjunto consistente de equações que utilizam dados espectrais de cada *pixel*. Estudos têm aplicado o SEBAL na

*Laboratório de Hidrologia - CTC/ENS/UFSC

estimativa do fluxo evapotranspirativo de cultivos, no monitoramento das necessidades hídricas, na estimativa do rendimento de culturas e em estudos agrometeorológicos (BASTIAANSSEN, 2000; BEZERRA *et al.*, 2008; SANTOS *et al.*, 2010). Outros estudos apontaram que a depleção hídrica em uma bacia hidrográfica pode ser obtida a partir de mapas de evapotranspiração real e que esta pode ser relacionada ao uso e cobertura do solo e uso atual da água para embasar a gestão de direitos de água, planejamento e regulação dos recursos hídricos (e.g. ALLEN *et al.*, 2000 e 2005; BASTIAANSSEN *et al.*, 2005).

A bacia hidrográfica do alto Rio Negro (BARN) localizada no Planalto Norte Catarinense e no Primeiro Planalto Paranaense possui mais da metade de seu território coberto por vegetação. Sua vegetação original é composta basicamente pela Floresta Ombrófila Mista (FOM), pertencente ao bioma Mata Atlântica. Este bioma contém uma das mais altas taxas de biodiversidade e de endemismo do planeta, com sua flora e fauna incluindo de 1 a 8% do total de espécies em todo o mundo (MYERS *et al.*, 2000, SILVA & CASTELETI, 2003). No entanto, o cenário de extrema degradação deste bioma é historicamente conhecido. Ribeiro *et al.* (2009) apontaram que somente 11,7% da vegetação original estão conservados. A sub-região biogeográfica de Araucárias abrange parte dos estados do Paraná, de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul e caracteriza-se por possuir o segundo maior remanescente (17%) dentre as sub-regiões da Floresta Atlântica e por ser uma área transicional entre a Floresta Atlântica e a biota temperada da América do Sul. Assim, estudos nestas áreas podem auxiliar a compreensão e avaliação do estado atual deste bioma e de sua influência sobre os recursos hídricos.

Nesse contexto, o presente estudo teve por objetivos: (i) estimar a evapotranspiração real na BARN por meio de modelagem hidrológica a partir do SEBAL e de imagens do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) em diferentes usos e coberturas do solo; e (ii) avaliar e comparar as estimativas do SEBAL com os dados obtidos pelo método do balanço hídrico sazonal.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do alto Rio Negro (BARN) possui área de aproximadamente 3454 km² e localiza-se entre as longitudes 49°55'27"O e

48°56'07"O e as latitudes 26°42'14"S e 25°55'32"S (Figura 1).

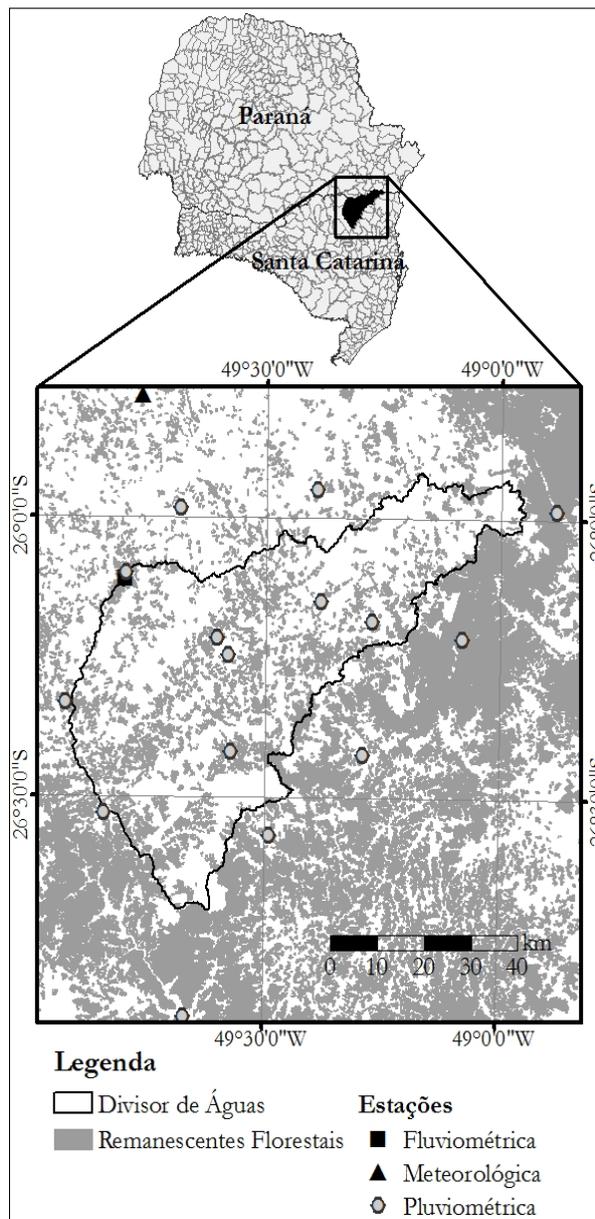


Figura 1 - Localização da bacia do alto Rio Negro.

Segundo a classificação de Köppen, a BARN possui clima Cfb, subtropical, mesotérmico úmido, com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, com verão fresco, temperatura do mês mais quente inferior a 22°C e sem estação seca definida. As cidades que abrangem a BARN estão inseridas na zona agroecológica 3B – Planalto Norte Catarinense (Tabela 1).

Tabela 1 - Principais características climáticas da zona agroecológica 3B.

Temperatura (°C)		Chuva (mm ano ⁻¹)	Dias chuva (soma)	Umidade relativa (%)	Insolação (h ano ⁻¹)
Média	Máx. Mín.				
15,5 a 17,0	26,6 a 10,8 a 24,0	1360 a 1670	138 a 164	80,0 a 86,2	1413 a 1613

A BARN é uma bacia de cabeceira tributária do rio Iguazu. Esta, caracteriza-se por ser a sub-bacia do rio Paraná com maior potencial hidrelétrico, com uma vazão específica média de 21,8 L s⁻¹ km⁻² enquanto que a vazão específica média do rio Paraná é de 13,9 L s⁻¹ km⁻² (ANA, 2001). Assim, estudos nesta região são de grande valia para a compreensão dos componentes do ciclo hidrológico, de suas potencialidades e distribuição espacial.

Segundo o Zoneamento Agroecológico de Santa Catarina, a região possui vegetação primária composta predominantemente por Mata Atlântica, especificamente Floresta Ombrófila Mista (Floresta de Araucária), além de campos com Capões, Florestas Ciliares e Bosques de Pinheiros e por Campos de Inundações dos Rios Negro e Iguazu (EPAGRI/CIRAM, 2009). Essa tipologia florestal é encontrada comumente em áreas de altitudes elevadas, superiores a 500 m, com característica climática de boa distribuição de chuvas ao longo do ano, sem períodos de seca e com temperatura média anual amena, com quatro a seis meses de frio (temperatura média de 15°C) e com no máximo seis meses quentes (temperatura média de 20°C) (RODERJAN et al., 2002; SANTA CATARINA, 2002).

Entretanto, a paisagem da região está bastante alterada devido à substituição da floresta original por áreas de pastagem, cultivos anuais e plantios de *Pinus* sp. Grande parte das áreas de reflorestamento é de *Pinus elliottii*, que abastecem a indústria de fabricação de papel e celulose e a indústria moveleira, e há algumas áreas de reflorestamento de eucaliptos, utilizadas para fins energéticos. As áreas de pastagem abrigam rebanhos bovinos, ovinos e equinos. A agricultura engloba os cultivos anuais, como de batata salsa, soja, milho, fumo e feijão, e tendo como extrativismo a erva-mate, o carvão e o caulim. Atualmente, restam fragmentos de FOM, alguns conectados a corredores ciliares remanescentes e outros ocorrendo de forma isolada. A Figura 2 apresenta o uso e cobertura do solo da BARN e a Tabela 2, a área respectiva de cada classe.

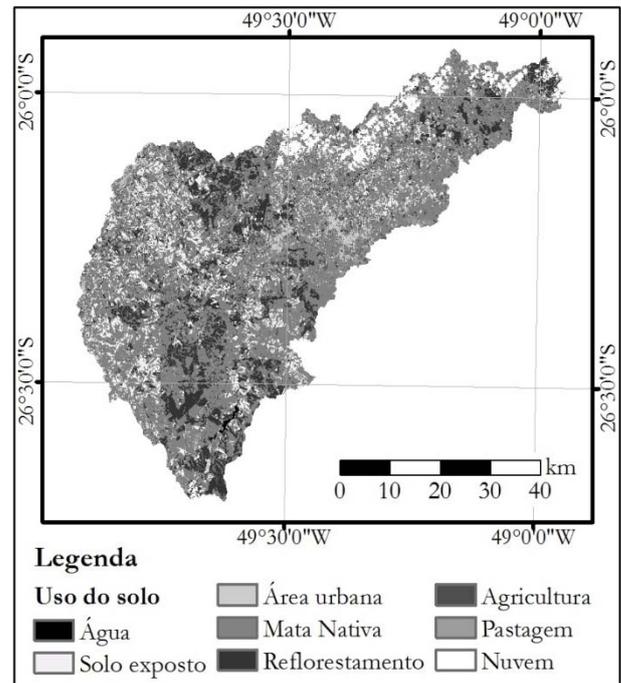


Figura 2 - Uso e cobertura do solo da BARN.

Tabela 2 - Uso e cobertura do solo da BARN.

Classe	Área (km ²)	Área (%)	Classe	Área (km ²)	Área (%)
Água	22	0,7	Reflorestamento	594	17,2
Solo exposto	502	14,5	Agricultura	154	4,4
Área urbana	61	1,8	Pastagem	95	2,8
Mata nativa	1853	53,7	Nuvem	171	4,9

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados Monitorados

Os dados meteorológicos para a implementação do SEBAL referem-se à radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa e temperatura do ar, adquiridos em escala horária na estação Lapa (latitude de 25°47'00"S e longitude de 49°45'58"O). Os dados de vazão e precipitação, necessários para a aplicação do balanço hídrico sazonal, foram obtidos nas estações de monitoramento listadas na Tabela 3. A localização das estações pode ser visualizada na Figura 1.

Tabela 3 - Estações fluviométrica, meteorológica e pluviométricas utilizadas no estudo.

Código	Nome	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Tipo de dados	Periodicidade dos dados	Responsável
65100000	Rio Negro	26°06'35" S	49°48'04" O	766	F	Diária	COPEL
2549104	Lapa	25°47'00" S	49°46'00" O	910	M	Horária	SIMEPAR
2649065	Barra do Avencal	26°34'08" S	49°29'30" O	650	P	Diária	ANA
2649061	Barragem Norte	26°25'26" S	49°17'33" O	200	P	Diária	ANA
2649057	Campo Alegre	26°11'11" S	49°16'24" O	870	P	Diária	ANA
2549076	Campo do Tenente	25°59'00" S	49°41'00" O	780	P	Diária	ANA
2649055	Corredeira	26°25'10" S	49°34'23" O	750	P	Diária	ANA
2649013	Corupá	26°25'26" S	49°17'33" O	200	P	Diária	ANA
2649018	Fragosos	26°08'59" S	49°22'59" O	790	P	Diária	COPEL
2649056	Itaiópolis	26°19'58" S	49°55'38" O	990	P	Diária	ANA
2649054	Moema	26°31'50" S	49°50'37" O	950	P	Diária	ANA
2548020	Pedra Branca do Araraquara	25°59'00" S	48°53'00" O	150	P	Diária	SUDERHSA
2649060	Primeiro Salto do Cubatão	26°12'57" S	49°04'50" O	790	P	Diária	ANA
2549003	Rio da Várzea dos Lima	25°57'00" S	49°23'35" O	810	P	Diária	ANA
2649015	Rio Negrinho	26°14'52" S	49°34'48" O	869	P	Diária	EPAGRI
2649006	Rio Negro	26°06'00" S	49°47'59" O	766	P	Diária	COPEL
2649016	Rio Preto do Sul	26°12'58" S	49°36'12" O	780	P	Diária	ANA

F = Fluviométrico

M = Meteorológico

P = Pluviométrico

Imagens de Satélite

Para a implementação do SEBAL foram adquiridas cinco imagens do sensor ASTER para cobrir toda a área da BARN. Três foram obtidas no dia 13 de abril de 2006 e duas no dia 22 de abril de 2006 correspondendo às mais recentes e com mínima cobertura de nuvens. As cenas foram adquiridas em nível de processamento L1B, com *pixels* em valores de radiância. Em adição, foram adquiridas imagens de temperatura da superfície através da plataforma de dados *online* da NASA *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC), USGS/*Earth Resources Observation and Science* (EROS) Center, *Sioux Falls, South Dakota*. A etapa de pré-processamento das imagens, realizada antes da aplicação do SEBAL e composta pelo georreferenciamento, calibração radiométrica e correção atmosférica, é descrita em Uda *et al.* (2013).

Cartas Topográficas Digitais

Para o georreferenciamento das imagens e elaboração do modelo digital de elevação (MDE) foram utilizados dados vetoriais de cartas topográficas digitais. As cartas foram obtidas por meio da

Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), os dados são compatíveis com a escala 1:50.000, com projeção Universal Transversa de Mercator, *datum* SAD-69 e fuso 22S.

Aplicação do SEBAL

O SEBAL foi aplicado separadamente para mosaicos das imagens do dia 13 e 22 de abril de 2006, com os dados apresentados na Tabela 4:

Como uma imagem de satélite fornece informações somente para o momento de passagem do satélite, o SEBAL calcula o fluxo de evapotranspiração *pixel a pixel*, para o momento próximo ao de aquisição da imagem, através do balanço de energia (BASTIAANSEN *et al.*, 1998; ALLEN *et al.*, 2000; ALLEN *et al.*, 2002):

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

onde λET é o fluxo de calor latente ($W m^{-2}$); R_n é o saldo de radiação à superfície ($W m^{-2}$); G é o fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); e H é o fluxo de calor sensível no ar ($W m^{-2}$).

Tabela 4 - Informações da estação meteorológica e do arquivo de cabeçalho das imagens.

Data Informação	13/04/2006	22/04/2006
	Ângulo de elevação solar (°)	46,09217
Temperatura do ar no horário próximo ao de passagem do satélite (°C)	21,0	17,7
Temperatura mínima do ar (°C)	11,2	11,4
Temperatura máxima do ar (°C)	26,2	23,1
Umidade relativa mínima do ar (%)	39	31
Umidade relativa máxima do ar (%)	100	100
Velocidade do vento no horário próximo ao de passagem do satélite (m s ⁻¹)	0,6	1,3
Radiação solar instantânea próxima ao horário de passagem do satélite (W m ⁻²)	594	617
Radiação de ondas curtas incidente (média diária) (W m ⁻²)	235	229

O saldo de radiação (R_n) é calculado por meio do balanço de radiação à superfície:

$$R_n = (1 - \alpha_{sup})R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

onde α é o albedo da superfície (adimensional); $R_{S\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente ($W m^{-2}$); $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa incidente ($W m^{-2}$); $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida ($W m^{-2}$); e ϵ_0 é a emissividade da superfície (adimensional). Uma descrição detalhada da metodologia para estimativa de R_n se encontra em Uda *et al.* (2013).

O fluxo de calor no solo é a taxa de armazenamento de calor no solo e vegetação, devido à condução. Em função de não haver dados medidos em campo para a data da imagem, G foi estimado segundo a equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000) para condições próximas ao meio dia:

$$G = \frac{T_s \times (0,0038\alpha_{sup} + 0,0007\alpha_{sup}^2)(1 - 0,98NDVI^4)}{\alpha_{sup}} \times R_n \quad (3)$$

onde T_s é a temperatura da superfície (°C); α_{sup} é o albedo da superfície e $NDVI$ é o índice de vegetação da diferença normalizada. Conforme Allen *et al.* (2002), para *pixels* com $NDVI < 0$, considerados como representativos de água, foi utilizada a relação $G/R_n = 0,5$.

O fluxo de calor sensível (H) foi calculado por (BASTIAANSEN *et al.*, 1998):

$$H = \frac{(\rho_{ar} \times c_p \times dT)}{r_{ah}} \quad (4)$$

onde ρ_{ar} é a densidade do ar ($kg m^{-3}$); c_p é o calor específico do ar ($1004 J kg^{-1} K^{-1}$); dT é a diferença de temperatura ($T_1 - T_2$) entre duas alturas ($z_1 - z_2$); e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($s m^{-1}$).

O valor de H foi calculado por um processo iterativo (Figura 3). Primeiramente, H foi considerado para a condição de estabilidade neutra da atmosfera. Portanto, para a estação meteorológica, foi estimada a velocidade do vento (u_x) na altura z_x de medição, o comprimento da rugosidade da superfície (z_{ome}), a velocidade de fricção (u_{*e}) e do vento a 200 m de altura (u_{200}). Após, foi estimada a velocidade de fricção (u_*), r_{ah} , dT e um H inicial para cada *pixel* na imagem. Um ponto chave é a escolha dos *pixels* âncoras (quente e frio) para a estimativa de dT . Foi escolhido o *pixel* quente em área de solo exposto e o *pixel* frio na superfície de água. Em seguida, foi determinada a condição de estabilidade da atmosfera pelo comprimento de Monin-Obukhov (L) e calculou-se os parâmetros de correção ψ_m , $\psi_h(2m)$, $\psi_h(0,1m)$. Esses parâmetros foram usados para estimar novos valores de u_* e r_{ah} . Já dT também é modificado pela correção de r_{ah} , para os *pixels* quente e frio. Corrigidos u_* , r_{ah} e dT , estima-se um novo valor de H . Continua-se o processo iterativo calculando L e os demais passos corrigindo os efeitos de fluatibilidade, até o valor de r_{ah} estabilizar.

Em seguida, a evapotranspiração diária foi calculada com base em Bastiaanssen (2000):

$$ET_{24h} = \frac{86400 \times \Lambda \times R_{n24h}}{\lambda} \quad (5)$$

onde ET_{24h} é a evapotranspiração diária ($mm dia^{-1}$); Λ é a fração de evaporação (adimensional); R_{n24h} é o saldo de radiação médio diário ($W m^{-2}$); e λ é o calor latente de evaporação da água ($J kg^{-1}$).

A fração de evaporação Λ , é a razão entre o fluxo de calor latente e a energia disponível na superfície do solo. Ela tem influência da quantidade de umidade no solo, além de outros fatores, como profundidade do sistema radicular, índice de vegetação ajustado ao solo, temperatura e umidade relativa do ar. Estudos indicam que esta fração tende a variar pouco durante o período diurno (SHUTTLEWORTH *et al.*, 1989; CRAGO, 1996; GENTINE *et al.*, 2007). Gentine *et al.* (2007) afirmaram ainda que a componente Λ referente à contribuição do solo pode ser assumida como constante durante o dia, contrariamente à contribuição da componente dos

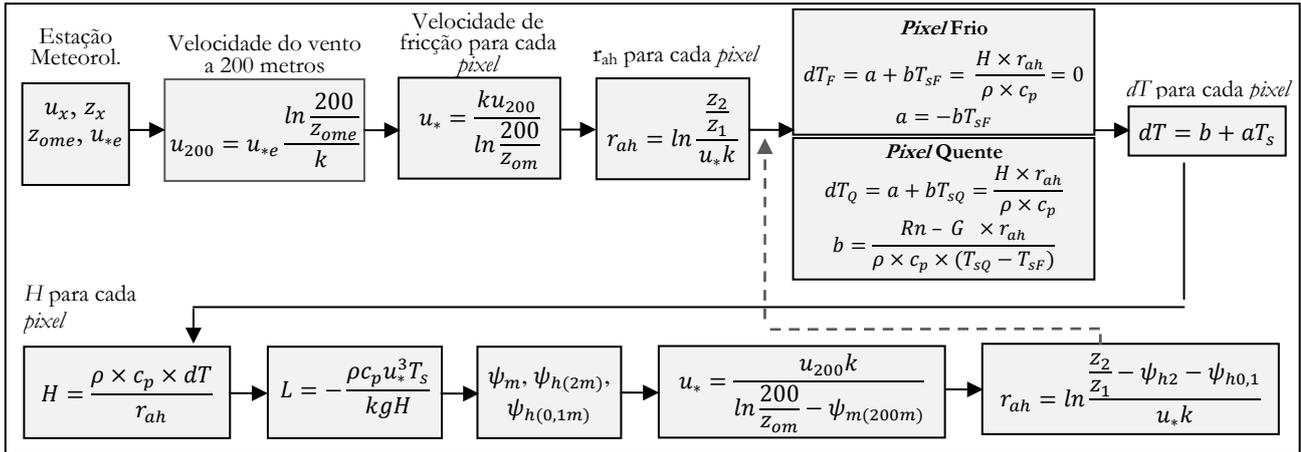


Figura 3 - Processo iterativo para a determinação de H .

dosséis. No SEBAL, Λ é assumida como constante durante as horas do dia (BASTIAANSEN *et al.*, 2005) e foi calculada por:

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{Rn - G} \quad (6)$$

Segundo de Bruin (1987), R_{n24h} foi calculado como:

$$R_{n24h} = (1 - \alpha_{sup}) \times R_{c\downarrow 24h} - 110\tau \quad (7)$$

onde $R_{c\downarrow 24h}$ é a radiação de ondas curtas incidente ($W m^{-2}$), obtida pela média da radiação medida na estação meteorológica; e τ é a transmissividade da atmosfera. O parâmetro τ é a razão entre a radiação solar global diária (radiação média de ondas curtas que chega à superfície, medida na estação) e a radiação solar no topo da atmosfera, e foi estimada pela Lei de Lambert:

$$R_{toa} = 37,586d_r(\omega_s \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s) \quad (8)$$

onde d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol; δ é a declinação solar (rad); ω_s ângulo horário do pôr do sol (rad); e φ é a latitude (rad).

Conforme Allen *et al.* (2002), a evapotranspiração de um período (mensal ou anual) pode ser calculada por:

$$ET_{perodo} = \Lambda \times ET_{0perodo} \quad (9)$$

onde $ET_{0perodo}$ é a evapotranspiração real do período em $mm\ mês^{-1}$ ou $mm\ ano^{-1}$, calculada conforme o método FAO Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998); Λ é a fração de evaporação, considerada co-

mo $\lambda ET/Rn$, visto que segundo Bastiaansen (2005), para períodos longos G pode ser ignorado e a disponibilidade de energia reduz-se ao saldo de radiação.

Aplicação do Balanço Hídrico Sazonal

O método do Balanço Hídrico Sazonal (BHS) proposto por Kan (2005) determina o armazenamento de água no solo, através da análise de recessão de hidrograma, previamente à estimativa da evapotranspiração. O balanço hídrico da BARN considerou o armazenamento de água igual à precipitação menos a vazão pela exutória e a evapotranspiração. Primeiramente, a precipitação sobre a bacia foi estimada pelo método dos Polígonos de Thiessen com dados das estações apresentadas na Tabela 3.

Os dados fluviométricos utilizados correspondem aos da estação fluviométrica de Rio Negro (código 65100000) de responsabilidade da COPEL. Para o cálculo do armazenamento, fez-se necessária a identificação do período de recessão, que compreende o número de dias seguidos, nos quais a precipitação é praticamente nula e a vazão decrescente, relativamente aos dados dos dias anteriores. Identificando o último dia de cada período de recessão, este serviu de referência para encontrar o número de dias de cada período. Para a determinação do último dia de um período de recessão aplicou-se à série histórica de dados fluviométricos os seguintes critérios de identificação:

- Para intervalo de tempo (Δt) < 15 dias: se a vazão do último dia de recessão Q_f for menor do que a Q_f do período anterior, foi considerado um único período a soma des-

ses dois períodos. Caso contrário, buscou-se o próximo Q_f ;

- Aceita-se Δt entre 15 e 60 dias se $Q_f \leq 1,0$ mm dia⁻¹;
- Somente nos casos em que Δt é > 60 dias, admitiu-se $Q_f \leq 2,0$ mm dia⁻¹.
- Em período de recessão, quando a vazão da bacia decai ao longo do tempo, atingindo o seu menor valor no último dia de recessão, pode-se supor que neste dia a evapotranspiração é insignificante e a vazão é função do armazenamento:

$$Q = f(S) \tag{10}$$

Para uma relação não linear, a Equação (10) torna-se a Equação (11)

$$Q = cS^d \tag{11}$$

Então, rearranjando a Equação (11), tem-se que o armazenamento é função da vazão:

$$S = \left(\frac{1}{c}Q\right)^{1/d} \tag{12}$$

Como o comportamento linear é comumente aceito por simplicidade e facilidade de cálculos, considerou-se que $d = 1$ e que c seja igual ao inverso do tempo de recessão T_r ($c = 1/T_r$). O valor de T_r foi encontrado por:

$$k = e^{\frac{-\Delta t}{T_r}} \tag{13}$$

onde k é o ângulo da inclinação da envoltória superior do gráfico $Q(t)$ versus $Q(t + \Delta t)$, determinado pelo método da correlação; e Δt é igual a 1 dia.

Determinados os parâmetros c e d e o último dia de cada período de recessão (e, consequentemente, o valor da vazão nesse dia), estimou-se o armazenamento de água do último dia de recessão pela Equação (12).

Para cada período do hidrograma calculou-se as médias de precipitação e de vazão e, juntamente com os dados de armazenamento, foi calculada a evapotranspiração média sazonal, com a equação do balanço hídrico:

$$\overline{E}_{ts} = \overline{P}_s - \overline{Q}_s - \frac{S_f - S_i}{\Delta t} \tag{14}$$

onde \overline{E}_{ts} é a evapotranspiração média sazonal (mm dia⁻¹); \overline{P}_s é a precipitação média sazonal (mm dia⁻¹);

\overline{Q}_s é a vazão média sazonal (mm dia⁻¹); e S_f e S_i são, respectivamente, o armazenamento final e inicial (mm), referentes ao intervalo de tempo Δt .

Por fim, foram obtidos valores mensais de evapotranspiração pelas médias ponderadas relativas ao número de dias de cada período Δt .

$$\overline{E}_{ti} = \frac{n_e \overline{E}_{tse} + n_c \overline{E}_{tsc} + n_d \overline{E}_{tsd}}{n_e + n_c + n_d} \tag{15}$$

onde \overline{E}_{ti} é a evapotranspiração média do mês i ; \overline{E}_{tse} , \overline{E}_{tsc} e \overline{E}_{tsd} são as estimativas sazonais sobre os períodos situados à esquerda, ao centro e à direita dos limites do mês i , cujos comprimentos totais de cada Δt são m_e , m_c e m_d e os termos n_e , n_c e n_d são os comprimentos em dias dentro do mês de ocorrência de \overline{E}_{tse} , \overline{E}_{tsc} e \overline{E}_{tsd} , respectivamente (Figura 4).

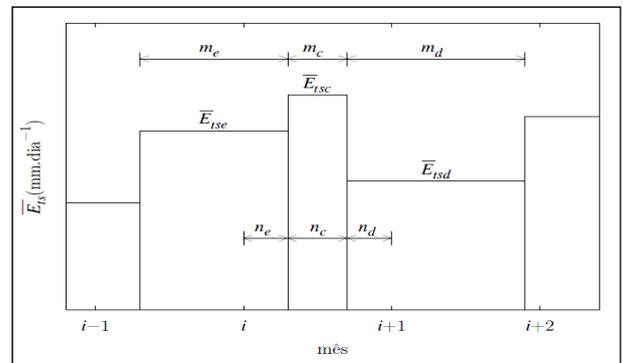


Figura 4 - Cálculo da evapotranspiração média do mês i .

Fonte: Kan (2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 mostra a distribuição da evapotranspiração real da área de estudo para os mosaicos de imagens de 13 e 22 de abril de 2006. Os resultados mostraram que a evapotranspiração variou de 0,02 a 5,45 mm dia⁻¹. As diferenças em ET_{24h} para as diferentes coberturas do solo são devidas principalmente ao albedo da superfície, que interfere diretamente na disponibilidade de radiação para o processo evapotranspirativo, além da Λ , que está relacionada com a umidade do solo, SAVI, etc. Espacialmente, os menores valores de ET_{24h} concentram-se no lado esquerdo do mosaico, predominantemente em áreas de solo exposto. As áreas com vegetação densa e água resultaram em valores mais elevados de fluxo de calor latente e, consequentemente, ET_{24h} mais elevada, e podem ser visualizadas no lado direi-

to do mosaico. O maior valor de ET_{24h} (5,45 mm dia⁻¹) foi observado no local da represa da Cia. Volta Grande Papel, ao sul da BARN.

A partir do mapa da área de estudo (Figura 5) foi calculada a estatística zonal para cada uso e cobertura do solo, utilizando amostras representativas dos mesmos (Tabela 5). Observaram-se os menores valores médios de ET_{24h} para as áreas com maior interferência antrópica e, os maiores, para as áreas com florestas preservadas e água. Bastiaanssen *et al.* (2005), Giacomoni (2008), Hendrickx *et al.* (2005), também verificaram a influência do tipo de cobertura da superfície no comportamento da evapotranspiração. De maneira geral, a floresta nativa apresentou 4,1 mm dia⁻¹, o reflorestamento 4,3 mm dia⁻¹ e a água um valor médio maior (5,0 mm dia⁻¹). O solo exposto claro e a área urbana apresentaram valores médios de evapotranspiração (2,2 menores e 2,4 mm dia⁻¹, respectivamente). Em adição, estes apresentaram os maiores coeficientes de variação (27 e 25%, respectivamente) em função de haver uma maior mistura espectral nessas áreas. Isto pode ser justificado, por exemplo, pela presença de vegetação entre as construções das áreas urbanas.

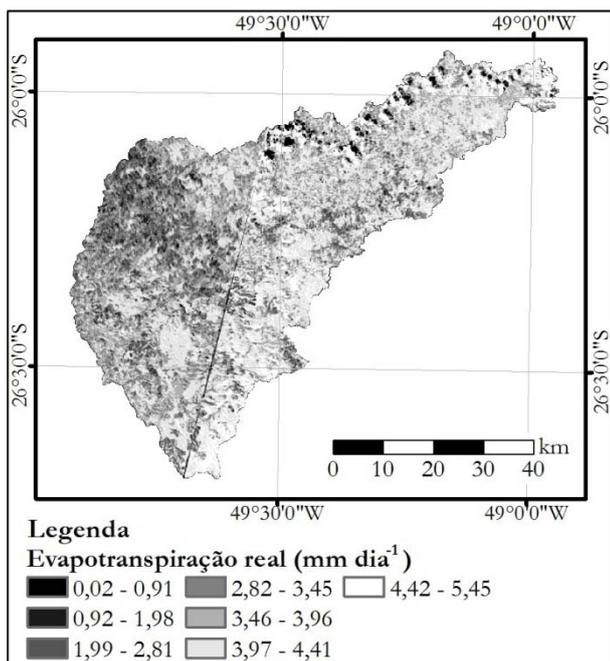


Figura 5 - Evapotranspiração real diária da BARN.

Pelo histograma da Figura 6, constata-se uma maior frequência de valores de ET_{24h} próximos às medianas das classes com maior porcentagem de cobertura do solo da BARN, ou seja, ET_{24h} próximos

a 4,2 mm dia⁻¹ (floresta nativa) e 4,3 mm dia⁻¹ (reflorestamento).

Tabela 5 - Evapotranspiração real diária para os diferentes usos e coberturas do solo da BARN.

Uso e cobertura	Evapotranspiração Real Diária				
	Mínimo (mm dia ⁻¹)	Máximo (mm dia ⁻¹)	Média (mm dia ⁻¹)	Mediana (mm dia ⁻¹)	CV (%)
Água	2,0	5,4	5,0	5,1	6
Solo Exposto Claro	0,02	4,0	2,2	2,2	27
Solo Exposto Escuro	0,4	4,8	3,5	3,6	17
Área Urbana	0,02	4,3	2,4	2,5	25
Floresta Nativa	1,7	4,9	4,1	4,2	7
Reflorestamento	1,0	5,1	4,3	4,3	7
Agricultura	0,02	4,6	2,9	2,9	21
Pastagem	0,7	4,2	2,9	2,9	21

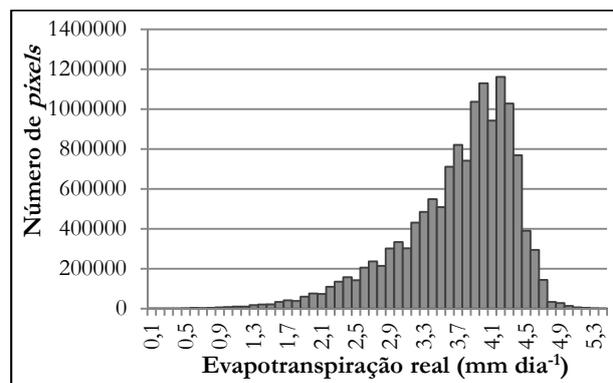


Figura 6 - Histograma de frequência da ET_{24h} .

Os resultados apresentados concordam com os de Santos *et al.* (2010), Giongo (2011), Paiva *et al.* (2011) e Cabral *et al.* (2010), sinteticamente expostos na Tabela 6.

Santos *et al.* (2010) utilizaram uma imagem ASTER e aplicaram o SEBAL para uma região no município de Paraíso do Sul – RS. Eles encontraram valores de ET_{24h} inferiores a 3,6 mm dia⁻¹ para solo exposto, enquadrando-se no intervalo observado na Tabela 5 para solo exposto claro e escuro. Para pastagem, observaram valores de 3,97 a 5,8 mm dia⁻¹, em comparação a amplitude de variação de 0,7 a 4,2 mm dia⁻¹ obtida neste estudo. Giongo (2011) analisou a evapotranspiração da bacia do Rio Corumbataí (1700 km²), no centro-leste de São Paulo por meio de dez imagens Landsat/TM5 de julho de 2008 a julho de 2010 aplicadas a uma modificação do SE-

BAL, o METRIC. Especificamente para áreas de pasto, o autor encontrou valores médios entre 2 e 3 mm dia⁻¹ e, para área de pastagem obteve o valor médio de 2,38 mm dia⁻¹ para 22 de abril de 2009. Observa-se que os valores encontrados por Giongo (2011) estão dentro do intervalo apresentado na Tabela 5 e próximos à média de 2,9 mm dia⁻¹ para pastagem. Paiva *et al.* (2011) aplicaram o SEBAL na Fazenda Cambara, município de Piraí do Sul - PR. Em semelhança à BARN, a fazenda localiza-se em clima Cfb segundo Köppen e possui cobertura de agricultura de sequeiro. Foram utilizadas 10 imagens para análise da ET_{24h} de um ciclo de cultura. Os resultados apontaram uma amplitude de variação de 0 a 3,2 mm dia⁻¹, que está dentro do intervalo encontrado para este estudo (0,02 a 4,6 mm dia⁻¹). Cabral *et al.* (2010) utilizaram o método da correlação de vórtices turbulentos para estimar o balanço de energia de março de 2006 a março de 2008, de uma área com altitude de 761 m, com reflorestamento de *Eucalyptus* sp, no estado de São Paulo. Para abril de 2006, os autores obtiveram valores médios entre 3,0 e 4,5 mm dia⁻¹, em comparação às médias de 4,1 e 4,3 mm dia⁻¹ para floresta nativa e reflorestamento, como apresentado na Tabela 5.

Tabela 6 - Amplitude (Ampl.) e média de ET_{24h} obtidas em outros estudos.

Uso e cobertura	Santos ET	Giongo	Paiva ET	Cabral et al.
	al. (2010)	(2011)	al. (2011)	(2010)
	Amplitude	Média	Amplitude	Amplitude
	(mm dia ⁻¹)			
Água				
Solo Exp. Claro	< 3,96			
Solo Exp. Escuro	< 3,96			
Área Urbana				
Floresta Nativa				3,0 a 4,5
Reflorestamento				3,0 a 4,5
Agricultura			0 a 3,2	
Pastagem	3,97 a 5,8	2 a 3 e 2,38		

A partir da extrapolação da evapotranspiração da BARN para cada dia do ano de 2006, foi gerada a evapotranspiração mensal, através do acumulado diário (Figura 7). Com os dados de médias mensais de evapotranspiração real, de radiação solar e de temperatura do ar para o ano de 2006, verificou-se o comportamento sazonal da evapotranspiração em função das condições climáticas. As maiores taxas evapotranspirativas foram observadas nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e pri-

mavera (setembro, outubro e novembro), nos quais houve temperaturas mais elevadas e uma maior disponibilidade de energia na forma de radiação solar (com valores médios superiores a 15 MJ m⁻²dia⁻¹ até 21 MJ m⁻²dia⁻¹). As menores taxas foram observadas nos meses de outono (março, abril e maio) e inverno (junho, julho e agosto), em que o fluxo de radiação solar diminuiu, e apresentou valores inferiores a 15 MJ m⁻²dia⁻¹, chegando ao mínimo em junho (9,9 MJ m⁻²dia⁻¹).

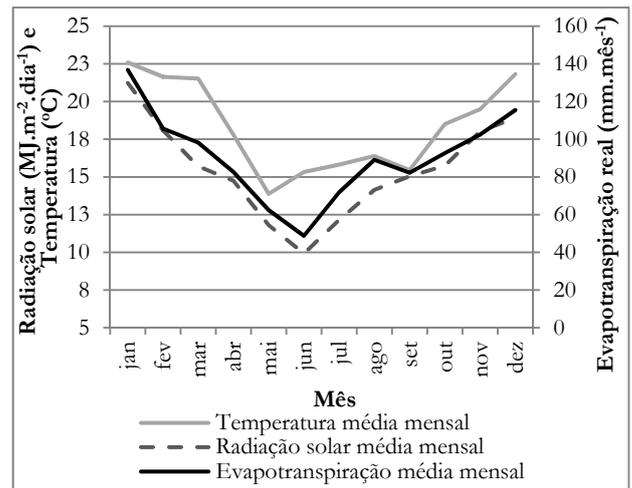


Figura 7 - Valores médios mensais de evapotranspiração real, radiação solar e temperatura do ar para o ano de 2006.

A Figura 8 mostra o comportamento médio da evapotranspiração mensal para os diferentes usos e coberturas do solo da BARN. Para todos os meses do ano de 2006, em média, o solo exposto claro obteve as menores taxas evapotranspirativas, sendo que no mês de junho, apresentou o valor mínimo de 37 mm mês⁻¹ e, em janeiro, o máximo de 104 mm mês⁻¹. A área urbana também apresentou baixos valores de evapotranspiração mensal para todos os meses. Pastagem, agricultura e solo exposto escuro apresentaram valores intermediários. Dentre todas as classes, a água, floresta nativa e reflorestamento obtiveram as maiores médias em todos os meses. A máxima média (151 mm mês⁻¹) foi estimada para o reflorestamento no mês de janeiro. Para os meses mais quentes, houve uma maior amplitude de variação da evapotranspiração média entre as classes, comportamento oposto quando se compara aos meses mais frios. Como exemplo, para os meses de janeiro, fevereiro e dezembro a diferença da ET entre o solo exposto claro e reflorestamento atingiu

valores de 47, 36 e 33 mm. Já para os meses de maio, junho e julho, essa diferença caiu para 21, 16 e 24 mm, respectivamente.

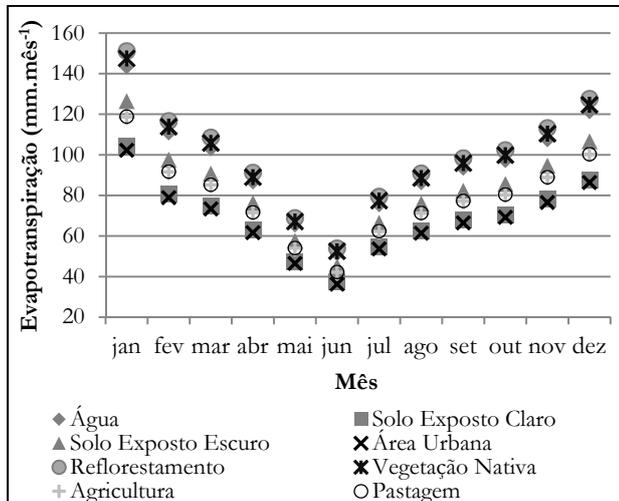


Figura 8 - Evapotranspiração real mensal para os diferentes usos e coberturas do solo da BARN.

Tabela 7 - Comparação dos resultados de evapotranspiração obtidos pelo BHS e pelo SEBAL para 2006.

Mês	Evapotranspiração (mm mês ⁻¹)		Diferença Relativa (%)
	BHS	SEBAL	
janeiro	95	137	44
fevereiro	95	106	11
março	74	98	33
abril	40	83	107
maio	27	62	127
junho	17	49	180
julho	31	72	131
agosto	71	89	25
setembro	107	82	-23
outubro	79	93	18
novembro	99	102	3
dezembro	123	116	-6
Anual (mm ano⁻¹)	841	1088	29

Pelo método do Balanço Hídrico Simplificado foi obtida a evapotranspiração real mensal para a BARN. Este método foi considerado validado, visto que a evapotranspiração anual (841 mm ano⁻¹), teve uma diferença de apenas 5% em relação à estimativa por Balanço Hídrico Simplificado (801 mm ano⁻¹). Considera-se que as estimativas realizadas por esse

balanço estão coerentes e, que podem ser comparadas aos resultados mensais gerados pelo SEBAL.

A Tabela 7 e a Figura 9 mostram os dados de evapotranspiração obtidos pelo BHS e SEBAL. Pela Tabela 7, através do cálculo das diferenças relativas, verificou-se que os valores obtidos pelo SEBAL estão superestimados em relação aos do BHS, em quase todos os meses. As maiores discrepâncias foram observadas nos meses com menores índices pluviométricos, ou seja, abril, maio, junho e julho, com diferença relativa de 107, 127, 180 e 131%, respectivamente.

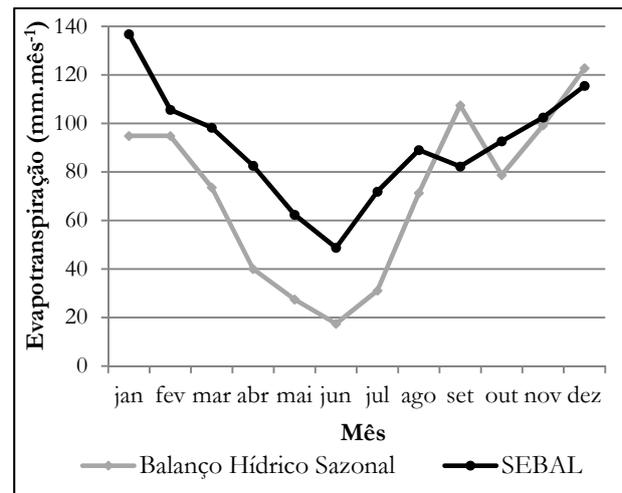


Figura 9 - Evapotranspiração mensal obtida pelo Balanço Hídrico Sazonal e pelo SEBAL na BARN.

Em escala mensal, grande parte dos valores obtidos pelo SEBAL foi superestimado em relação ao BHS. A baixa pluviosidade no ano de 2006 influenciou os resultados mensais pelo BHS aumentando a amplitude da diferença relativa entre os dois métodos. Um ponto de grande importância relaciona-se à etapa de extrapolação dos dados de evapotranspiração real diária no SEBAL. Somente um mosaico de imagens foi utilizado para extrapolação dos dados mensais e anual. O ideal seria a utilização de imagens obtidas em diferentes épocas do ano. Em função da resolução temporal de 16 dias do satélite TERRA e das condições climáticas, não foi possível obter imagens de toda a BARN em outras datas. Por consequência, utilizou-se apenas uma imagem de fração de evaporação para todo o período extrapolado. Bastiaanssen (2005) afirma que a disponibilidade de energia líquida para o processo de evapotranspiração pode ter diferentes escalas de tempo de representatividade e, dependendo da escala de tem-

po utilizada (por exemplo, sazonal, anual) há a necessidade de se determinar uma fração de evaporação para diferentes períodos dentro do intervalo analisado. Folhes *et al.* (2009) comentam que quanto maior o período de tempo utilizado para extrapolação da evapotranspiração, com apenas uma imagem de fração de evaporação, maior o erro na estimativa da mesma. A radiação solar, na forma de radiação líquida, dentre outros fatores, tem influência na fração de evaporação (CRAGO *et al.*, 1996; GENTINE *et al.*, 2007). Assim, a utilização de apenas uma imagem de fração de evaporação pode ter acarretado erros na estimativa da evapotranspiração mensal e anual, visto que a radiação solar incidente tem considerável variação nos diferentes meses do ano.

CONCLUSÕES

Em se tratando da bacia do alto Rio Negro, o SEBAL estimou adequadamente a evapotranspiração real diária, em comparação com estudos semelhantes, a partir de um mosaico de imagens ASTER de abril de 2006. As áreas com maior interferência antrópica apresentaram os menores valores médios de evapotranspiração real diária (2,2 e 2,4 mm dia⁻¹ para solo exposto claro e área urbana, respectivamente). A vegetação nativa e o reflorestamento apresentaram valores elevados (4,3 e 4,1 mm dia⁻¹, respectivamente), sendo as áreas com menor interferência antrópica e de maior predominância na bacia do alto Rio Negro (aproximadamente 71%).

A utilização de um modelo de balanço de energia à superfície, integrado a técnicas de sensoriamento remoto, como o SEBAL, possibilitou a estimativa e a análise da evapotranspiração com suficiente detalhamento espacial, bem como sua avaliação em função dos diferentes usos e coberturas do solo. Isso evidencia a potencialidade deste método para estudos que envolvam manejo do uso do solo e dos recursos hídricos em bacias hidrográficas.

Os valores de evapotranspiração real, em sua maioria, foram superestimados em comparação aos obtidos pelo método de BHS. Para melhorar o desempenho do modelo SEBAL, seria necessária a aquisição de imagens em diferentes épocas do ano que representassem a variação sazonal das variáveis climáticas.

Foram observadas taxas de evapotranspiração mais elevadas nas áreas com maior porcentagem de cobertura na bacia, ou seja, florestas, mostrando que estas são as que mais contribuem para a perda

de água da BARN. Desta maneira, pode-se verificar a importância de estudos relacionados ao papel da Floresta Ombrófila Mista e de reflorestamentos com *Pinus* sp. no balanço hídrico da bacia do alto Rio Negro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos, ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), pelo fornecimento dos dados meteorológicos, à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), pelas cartas topográficas digitais e ao *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota*, pelo fornecimento das imagens ASTER. Em adição, agradecem ao Projeto Estudo de Mudanças Climáticas na Região Sul do Brasil – CLIMASUL, Convênio FINEP: 01.08.0568.00, referência: 1406/08.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; MORSE, A.; TASUMI, T.; BASTIAANSSEN, W.; KRAMBER, W.; ANDERSON, H. Evapotranspiration from Landsat (SEBAL) for Water Rights Management and Compliance with Multi-State Water Compacts. 2000.

ALLEN, R. G.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; TREZZA, R.; TASUMI M.; WATERS, R. Surface energy balance algorithms for land - Advance training and user's manual, version 1.0, p. 98, 2002.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M., Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: United Nations FAO, Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. Irrigation and Drainage Systems, v. 19, p. 251-268, 2005.

ANA Bacias brasileiras do rio da Prata: Avaliações e propostas. Brasília: ANA, 2001. 102p.

- BASTIAANSSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. 273f. Tese. Wageningen Agricultural University, 1995.
- BASTIAANSSEN, W.G.M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, v. 229, p. 87-100, 2000.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) I. Formulation. *Journal of Hydrology*, v.212, p. 198-212, 1998.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; NOORDMAN, E.J.M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B.P.; ALLEN, R.G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, p. 85-93, jan/fev 2005.
- BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B. da; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM – Landsat 5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.
- BRUTSAERT, W.H. *Evapotranspiration into the atmosphere*. New York: Springer, 1982. 316p.
- CABRAL, O.M.R.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H.C.; LIGO, M.A.V.; FREITAS, H.C.; TATSCH, J.D. The energy and water balance of a Eucalyptus plantation in southeast Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 388, p. 208–216, 2010.
- CRAGO, R.D. Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. *Journal of Hydrology*, 180, p. 173-194, 1996.
- DE BRUIN, H.A.R. From Penman to Makkink', in Hooghart, C. (Ed.), *Evaporation and Weather, Proceedings and Information*. Comm. Hydrological Research TNO, The Hague. p. 5-30, 1987.
- EPAGRI/CIRAM – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A./Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina. Zoneamento Agroecológico. Disponível em: < <http://ciram.epagri.sc.gov.br/images/documentos/ZonAgroecoMapas.pdf> >. Acesso em: junho de 2009.
- FOLHES, M.T. RENNÓ; C.D.; SOARES; J.V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agricultural Water Management*, v.96, n. 10, p. 1398-1408, 2009.
- GENTINE, P.; ENTEKHABI, D.; CHEHBOUNI, A.; BOULET, G.; DUCHEMIN, B. Analysis of evaporative fraction diurnal behaviour. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, p. 13-29, 2007.
- GIACOMONI, H.M.; MENDES, C.A.B. Estimativa de Evapotranspiração Regional por meio de Técnicas de Sensoriamento Remoto Integradas a Modelo de Balanço de Energia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol 13, n. 4, p. 33-42, out/dez 2008.
- GIONGO, P. R. Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto. 126 f. Tese (Doutorado em Ciências). ESALQ, Piracicaba, 2011.
- HENDRICKX, J.M.H.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; NOORDMAN, E.J.M.; HONG, S.-H.; GOBBETTI, L.E.C. Estimation of regional actual evapotranspiration in the Panama Canal watershed using SEBAL, In: R. S. Harmon, ed. *The Rio Chagres: A multidisciplinary profile of a tropical watershed*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, vol. 52, p. 315-323, 2005.
- KAN, A. Estimativa de Evapotranspiração Real com Base na Análise de Recessão dos Hidrogramas. 257 f. Tese (Doutorado em Ciências, pós graduação em Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de Tecnologia e Ciências Exatas). Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.
- MYERS, N., MITTERMEIER, R.A., MITTERMEIER, C.G., FONSECA, G.A.B., KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858, 2000.
- PAIVA, C.M.; TSUKAHARA, R.Y.; FRANÇA, G.B.; NICACIO, R.M. Estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto para fins de manejo de irrigação. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba: INPE, Anais, p. 101-107, 30 de abril a 05 de maio de 2011.
- RIBEIRO, C.R.; METZGER, J.P.; MARTENSEN, A.C.; PONZONI, F.J.; HIROTA M.M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how much is the remaining forest distributed? Implications for

conservation. *Biological Conservation*. v. 142, p. 1141 – 1153, 2009.

RODERJAN, C.V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y.S.; HATSCHBACH, G.G. As unidades fitogeográficas do Estado do Paraná. *Ciência & Ambiente*. UFSM, v. 24, p. 75-92, jan/jun 2002.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura – EPA-GRI/CIRAM. Dados e Informações Biofísicas da Unidade de Planejamento Regional do Planalto Norte Catarinense. Florianópolis, 2002.

SANTOS, T.V. dos; FONTANA, D.C.; ALVES, R.C.M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. *Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.45, n. 5, p. 488-496, 2010.

SHUTTLEWORTH, W.J.; GURNEY, R.J. HSU, A.Y.; ORMSBY, J.P. The variation in energy partition at surface flux sites. *Remote Sensing and Large-Scale Global Processes*. IAHS Publ, n. 186, 1989.

SILVA, J.M.C.; CASTELETI, C.H.M. Status of the biodiversity of the Atlantic Forest of Brazil. In *The Atlantic Forest of South America: biodiversity status, threats, and outlook*. In: GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I.G. (eds.). Island Press, Washington, 2003. p. 43-59.

STISEN, S.; JENSEN, K.H.; SANDHOLT, I.; GRIMES, D.I.F. A remote sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin. *Journal of Hydrology*, v. 354, p. 131-148, 2008.

TUCCI, E. M. et al. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4ª edição. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007.

UDA, P.K.; CORSEUIL, C.W.; KOBAYAMA, M. Mapeamento do saldo de radiação da bacia do alto Rio Negro, região sul brasileira. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v.18, n.2, p.249-258, abr/jun 2013.

WARD, A.D.; TRIMBLE, S.W. *Environmental Hydrology*. 2nd Ed. USA: Lewis Publishers, 2004. 475 p.

Real Evapotranspiration Of The Upper Rio Negro Watershed , In Southern Brazil, Using SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) And Water Balance

ABSTRACT

Actual evapotranspiration spatial information helps understand water demands and also allows relating land use to water use in a watershed. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) is a semi-empirical model that estimates the distributed actual evapotranspiration as the residual of the surface energy balance, using remote sensing techniques. The upper Rio Negro watershed - BARN (3454 km²) is located in the Northern Plateau of Santa Catarina state and the First Plateau of Paraná state and nearly half of its area is covered by Mixed Ombrophilous Forest (FOM). The FOM is part of the Atlantic Forest biome which supports 1-8% of the planet's flora and fauna species. Currently only 11.7% of its original area remain. The objectives of this study were (i) to estimate the actual evapotranspiration in BARN through SEBAL and Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images on different land uses, and (ii) to evaluate and compare the SEBAL estimates with the seasonal water balance estimates. For the SEBAL application five ASTER images acquired in April 2006 and meteorological data were used. The results showed lower actual evapotranspiration values for areas with greater human interference, such as bare soil and urban areas, and the larger values for preserved areas, such as forests and water. The values for bare soil and urban area had the lower averages (2.2 mm day⁻¹ and 2.4 mm day⁻¹, respectively). For FOM, Pinus sp reforestation and water averages of 4.1 mm day⁻¹, 4.3 mm day⁻¹ and 5.0 mm day⁻¹, respectively were found. The Study indicates that the water loss from the upper Rio Negro watershed is greatly affected by the forested areas (approximately 71% of the basin land surface), which has high evapotranspiration rates. Thus, we highlight the importance of studies related to the role of FOM and Pinus sp in the water balance of the upper Rio Negro watershed. On a monthly scale, it was found that SEBAL simulates the evapotranspiration seasonal variation according to climatic conditions.

Key-words: *actual evapotranspiration, SEBAL, ASTER, upper Rio Negro watershed.*