



Revista Brasileira de Cartografia (2017), Edição de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Nº 69/6: 1189-1210  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA O ESTUDO DAS INTERAÇÕES BIOSFERA-ATMOSFERA EM ECOSISTEMAS AMAZÔNICOS: UMA REVISÃO**

*Remote Sensing Data for the Study of Biosphere-Atmosphere Interactions in  
Amazonian Ecosystems: a review*

**Gabriel de Oliveira<sup>1,2</sup>, Elisabete Caria Moraes<sup>2</sup>, Yosio Edemir Shimabukuro<sup>2</sup>, Luiz  
Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão<sup>2</sup> & Guilherme Augusto Verola Mataveli<sup>3</sup>**

### **<sup>1</sup>Universidade do Kansas**

**Departamento de Geografia e Ciências Atmosféricas**

Avenida Jayhawk, 1.475, CEP: 66045, Lawrence, KS, Estados Unidos da América  
gabreloliveira@ku.edu

### **<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**

**Divisão de Sensoriamento Remoto**

Avenida dos Astronautas, 1.758, CEP: 12227-010, São José dos Campos, SP, Brasil.  
{bete, yosio, laragao}@dsr.inpe.br

### **<sup>3</sup>Universidade de São Paulo - USP**

**Departamento de Geografia**

Avenida Prof. Lineu Prestes, 338, CEP: 05508-000, São Paulo, SP, Brasil  
mataveli@usp.br

*Recebido em 24 de Fevereiro, 2016/ Aceito em 4 de Abril, 2016*

*Received on February 24, 2016/ Accepted on April 4, 2016*

## **RESUMO**

Atualmente é grande a preocupação com o desmatamento das áreas tropicais, em particular na Amazônia, e sua influência no clima. Há alguns anos vêm sendo realizados experimentos de campo envolvendo coletas contínuas de dados relacionados às trocas de energia e CO<sub>2</sub> entre a superfície e a atmosfera na região amazônica. No entanto, as medidas obtidas por esses experimentos são geralmente representativas de pequenas áreas. Este estudo tem como objetivo apresentar e discutir alguns dos principais modelos desenvolvidos para estimativa dos fluxos energéticos na superfície e CO<sub>2</sub> mediante dados de satélite, ressaltando as potencialidades e limitações de aplicação na região amazônica. De modo geral, os algoritmos de fluxos de energia utilizam imagens nas regiões do visível e infravermelho (próximo e termal) e são baseados em métodos empíricos e físicos. As variáveis *in situ* necessárias correspondem à temperatura do ar e velocidade do vento, e as maiores incertezas estão na determinação dos fluxos de calor no solo e sensível. Por sua vez, os modelos de fluxos de CO<sub>2</sub> baseiam-se nos espectros do visível e infravermelho próximo, sendo alicerçados no conceito de eficiência de uso da radiação (RUE). O maior desafio está justamente na definição do termo de RUE para distintos ecossistemas, e a informação básica de campo refere-se à radiação solar. Em suma, o uso de algoritmos baseados em imagens de satélite possui um importante papel no entendimento espacial e temporal de parâmetros biofísicos da superfície em uma região onde a maioria das informações são geradas pontualmente. Os dados gerados podem ser utilizados para alimentar modelos de superfície acoplados aos modelos de circulação geral

da atmosfera, permitindo, entre outros, avaliar o impacto, em âmbito regional e global, causado por mudanças de uso/cobertura da terra.

**Palavras-chave:** Amazônia, Evapotranspiração, Produtividade Primária Bruta e Líquida, Modelagem, Produtos MODIS, Imagens Orbitais.

## ABSTRACT

Currently there is a great concern about deforestation of tropical areas, particularly in the Amazon, and its influence on climate. Field experiments have been conducted involving continuous collection of data about CO<sub>2</sub> and energy exchange between the land surface and the atmosphere in the Amazon region. However, the measurements obtained by these experiments are generally representative of small areas. This study aims to present and discuss some of the most important models developed to estimate CO<sub>2</sub> and energy fluxes at the surface through satellite data, highlighting the potentialities and limitations for application in the Amazon region. In general, the energy flux algorithms make use of images in the visible and infrared (near and thermal) spectrum regions and are based on empirical and physical methods. The observational variables needed as input for these models are air temperature and wind speed, and the largest uncertainties relies on obtaining ground and sensible heat fluxes. The CO<sub>2</sub> flux models need images in the visible and near-infrared spectrum regions, being based on the radiation use efficiency (RUE) concept. The ground measurements needed for these models refers to solar radiation and the biggest challenge is to precisely define the RUE parameter for different ecosystems. The use of algorithms based on satellite images plays an important role for understanding the temporal and spatial behavior of the biophysical parameters in a region where most of the information are generated locally. The data obtained can be used to feed surface models coupled to general circulation models, allowing, among others, the evaluation of the impact, both in regional and global scales, caused by land use/land cover changes.

**Keywords:** Amazonia, Evapotranspiration, Net and Gross Primary Productivity, Modeling, MODIS Products, Orbital Images.

## 1. INTRODUÇÃO

A floresta tropical amazônica influencia diretamente o sistema climático terrestre pela emissão ou absorção de gases e da evapotranspiração (ET), ou seja, através dos processos de transpiração das plantas e de evaporação da água contida nas folhas, caules, serrapilheira e solo (DAVIDSON *et al.*, 2012). Além de fornecer vapor de água para o ambiente, influenciando na circulação geral dos trópicos e contribuindo para a precipitação regional, possui importância no ciclo de gás carbônico atmosférico (SWANN *et al.*, 2012; ZANCHI *et al.*, 2015). As práticas de desmatamento podem, portanto, ocasionar mudanças no balanço de radiação da superfície (R<sub>n</sub>), resultando em uma maior ou menor disponibilidade de energia para os processos evapotranspirativos, e, ainda, na quantidade absorvida ou liberada de CO<sub>2</sub> na atmosfera (VON RANDOW *et al.*, 2004; QUERINO *et al.*, 2006; STARK *et al.*, 2016).

A relevância dos fenômenos físicos relacionados às trocas de energia entre a superfície e a atmosfera frente a um cenário de mudanças climáticas leva à necessidade do aprimoramento de pesquisas para o seu conhecimento nas

escalas temporal e espacial (HOUBORG *et al.*, 2007; EL-MASRI *et al.*, 2013). Nas últimas três décadas vêm sendo desenvolvidas campanhas intensivas e experimentos para aquisição de dados micrometeorológicos em ecossistemas amazônicos, o que têm permitido entender como se dá a variação, em especial ao longo das estações, do total de energia disponível para os processos de aquecimento da atmosfera pela superfície, evapotranspiração e trocas de CO<sub>2</sub> atmosférico (MALHI *et al.*, 2002; ZERI *et al.*, 2014). Porém, as medidas obtidas por tais experimentos são geralmente pontuais e representativas de pequenas áreas, não representando espacialmente a variabilidade desses processos (PAPADAVID & HADJIMITSIS, 2012; WANG *et al.*, 2015).

Nesse contexto, novas metodologias vêm sendo desenvolvidas para a obtenção dos componentes relacionados às trocas energéticas e de CO<sub>2</sub> entre a superfície e a atmosfera, como o uso do sensoriamento remoto (SR). De modo geral, a utilização de sensores orbitais para estimativa dos fluxos de energia e CO<sub>2</sub> é realizada por meio de modelos que utilizam como entrada informações obtidas diretamente das imagens satelitais, como reflectância e temperatura da

superfície (TS) (BHATTARAI *et al.*, 2012). No que diz respeito à estimativa dos fluxos energéticos, diversos algoritmos vêm sendo desenvolvidos, entre eles o Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI) (ROERINK *et al.*, 2000) e o Evapotranspiration Assessment from Space (EVASPA) (GALLEGO-ELVIRA *et al.*, 2013). Com relação à determinação dos fluxos de CO<sub>2</sub>, destacam-se os modelos Parametric Production Efficiency Model (C-Fix) (VEROUSTRAETE *et al.*, 2002) e o Temperature and Greenness Rectangle Model (TGR) (YANG *et al.*, 2013a). Esses modelos foram aplicados em distintos biomas ao redor do planeta, no entanto, salienta-se que para a Amazônia a abordagem relativa à determinação dos fluxos de energia e CO<sub>2</sub> por SR é ainda incipiente (POTTER *et al.*, 2009; OLIVEIRA e MORAES, 2013).

Diante do exposto, este estudo tem como objetivo apresentar e discutir alguns dos principais modelos desenvolvidos para estimativa dos fluxos energéticos na superfície e CO<sub>2</sub> mediante dados de satélite, ressaltando as potencialidades e limitações de aplicação na região amazônica.

## **2. ESTUDO DAS INTERAÇÕES BIOSFERA-ATMOSFERA NA AMAZÔNIA ATRAVÉS DE MEDIDAS *IN SITU***

Desde a década de 1980 uma série de experimentos micrometeorológicos foi realizada na Amazônia visando aumentar o conhecimento sobre a interação entre a floresta tropical e a atmosfera (p.e. *Amazonian Research Micrometeorological Experiment* (ARME) (1983-1985) (SHUTTLEWORTH *et al.*, 1987), *Amazonian Boundary-Layer Experiment* (ABLE) (1985-1987) (GARSTANG *et al.*, 1990) e *Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observational Study* (ABRACOS) (1991-1995) (GASH & NOBRE, 1997)). Atualmente, o principal meio de obtenção de medidas de superfície na região refere-se ao *Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia* (LBA) (ARTAXO, 2012). O LBA possui sítios em diferentes superfícies nos estados de Rondônia (RO), Amazonas (AM), Pará (PA) e Tocantins (TO). Os dados gerados têm sido utilizados para definir o estado atual do sistema amazônico, e servem como parâmetros de entrada e validação para

modelos numéricos de previsão do clima (GONÇALVES *et al.*, 2013).

As principais variáveis coletadas por esses experimentos dizem respeito à radiação solar incidente ( $K\downarrow$ ), radiação solar refletida ( $K\uparrow$ ), albedo ( $a_s$ ) (CULF *et al.*, 1995; LEITÃO *et al.*, 2002), radiação infravermelha termal (IVT) incidente ( $L\downarrow$ ), radiação IVT emitida ( $L\uparrow$ ), balanço de radiação ( $R_n$ ) (ALVES *et al.*, 1999; ROCHA *et al.*, 2004), fluxo de calor no solo ( $G$ ), fluxo de calor sensível ( $H$ ), fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ), evapotranspiração (ET) (MALHI *et al.*, 2002; SAKAI *et al.*, 2004), e fluxo líquido de carbono (NEE) (VON RANDOW *et al.*, 2004; HUTYRA *et al.*, 2007). Um ponto de destaque é que a maior parte das pesquisas observacionais na Amazônia envolvendo tais variáveis, como pode se verificar pelos estudos citados, é realizada em áreas de floresta tropical e de pastagem. Nesse contexto, uma forma de estender a análise para os diversos ecossistemas componentes da Amazônia e, então, buscar resolver a questão em grande escala, diz respeito ao uso integrado de medidas de superfície (p.e. estudos biométricos em nível de parcela e torres de fluxo) e dados de SR (NEGRÓN-JUÁREZ *et al.*, 2008; GLOOR *et al.*, 2012).

## **3. MODELAGEM DOS FLUXOS DE ENERGIA E CO<sub>2</sub> POR SENSORIAMENTO REMOTO**

A frequência e rapidez com a qual são obtidos e processados os dados de satélite, em conjunto com a possibilidade da realização de estudos regionais e globais, tem proporcionado uma excelente relação custo-benefício. Denota-se nos últimos anos um gradativo avanço nas características técnicas dos sensores instalados em plataformas orbitais, apresentando melhores resoluções espaciais, temporais, radiométricas e espectrais. Dentro desse contexto, uma série de pesquisas têm utilizado dados orbitais para estimativa de parâmetros biofísicos e hidrológicos da superfície a partir de distintos algoritmos. Com foco na estimativa dos fluxos de energia e CO<sub>2</sub> por SR na Amazônia, neste item são analisados alguns dos principais modelos disponíveis na literatura científica e com possibilidade de aplicação na região.

### 3.1 Modelos para estimativa dos fluxos de energia

Os primeiros estudos envolvendo a estimativa dos fluxos de energia por SR datam da década de 1970 (RASCHKE & PREUSS, 1979) e surgiram pela limitada densidade espacial das medidas de superfície, que impediam análises mais robustas em trabalhos com amplas escalas (GOWDA *et al.*, 2008). Atualmente, o interesse concentra-se em descrever, de maneira detalhada, as transferências de energia no sistema solo-vegetação-atmosfera, com vistas ao entendimento das interações e mecanismos de retroalimentação entre a superfície e a camada limite. Isso tem ganhado importância no contexto de mudanças climáticas, pois a alteração do uso da terra pode induzir a modificações nos fluxos energéticos superficiais (YANG *et al.*, 2012).

Os modelos de fluxos de energia variam em relação às medidas in situ de entrada, suposições e acurácia dos resultados (LI *et al.*, 2009; FRENCH *et al.*, 2015). Um ponto em comum refere-se aos dados orbitais, pois todos os algoritmos exigem informações tanto da região do visível quanto do infravermelho próximo e termal. As principais estimativas dizem respeito ao Rn, G, H,  $\lambda E$  e, conseqüentemente, ET. A ET é considerada a variável chave desses modelos e, do mesmo modo, a mais complexa no que se refere ao seu correto cômputo. Simplificadamente, conforme Ruhoff (2011), tais algoritmos baseiam-se em: i) métodos empíricos e estatísticos, ii) métodos residuais do balanço de energia, e iii) outros modelos físicos (p.e. equação de Penmann-Monteith (MONTEITH, 1965)).

#### 3.1.1 Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL)

O SEBAL (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998a) é um modelo fundamentado em relações empíricas e parametrizações físicas. Ele foi desenvolvido para a estimativa da energia disponível à superfície a partir da utilização de dados orbitais diários e reduzidas informações de campo. Nesse sentido, as variáveis de entrada dizem respeito à temperatura do ar e velocidade do vento no instante de passagem do satélite. O modelo tem sido aprimorado desde sua concepção, com a inserção de novas parametrizações, por exemplo, para cômputo do as (LIANG, 2001), e G (BASTIAANSSEN, 2000).

O algoritmo compreende diversas etapas, sendo o Rn o primeiro componente do balanço de energia a ser obtido (OKE, 1987). Em seguida, é possível determinar o G (função de Rn, índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), as e temperatura da superfície (TS)), e o H, que exige a escolha de pixels representando as condições extremas de temperatura e umidade da área de estudo, denominados pixel quente e frio. Esse é um ponto problemático, pois a intervenção do operador pode incorrer em erros, como a seleção de queimadas como pixel quente, ou nuvens como pixel frio (ALLEN *et al.*, 2011). Alguns estudos propõem métodos estatísticos para seleção automática desses pixels (KJAERGAARD *et al.*, 2011). Uma das últimas etapas do SEBAL é o cálculo do  $\lambda E$ , a partir do qual se estima a ET real diária ( $ET_{r_{24h}}$ ), conforme a Equação 1.

$$ET_{r_{24h}} = 86400 \frac{\Delta Rn_{24h}}{\lambda} \quad (1)$$

em que  $Rn_{24h}$  corresponde ao balanço de radiação médio diário, e  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água ( $\lambda=2,45 \times 10^6 \text{ J Kg}^{-1}$ ).

O SEBAL tem sido utilizado e validado em distintas regiões do planeta (PAIVA *et al.*, 2011; BHATTARAI *et al.*, 2012; TANG *et al.*, 2013; YANG *et al.*, 2015). O modelo se mostra sensível ao uso da terra, propiciando avaliações em áreas agrícolas, desertos, pradarias, e florestas (SENAY *et al.*, 2007; SCHUURMANS *et al.*, 2011). Com relação à acurácia das estimativas, estudos indicam erros relativos variando entre  $\approx 5\text{-}17\%$  (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998b; HEMAKUMARA *et al.*, 2003; KIMURA *et al.*, 2007; BHATTARAI *et al.*, 2012). Cumpre salientar que as maiores fontes de incerteza do SEBAL estão associadas ao cômputo do H (discutido anteriormente), assim como sua baixa sensibilidade à umidade do solo e ao estresse hídrico (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998a).

No que se refere à Amazônia, são encontradas algumas pesquisas empregando o modelo SEBAL (LIBERATO *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2011; FERREIRA *et al.*, 2013; OLIVEIRA & MORAES, 2013). Os estudos foram desenvolvidos nas partes sudoeste e leste da região, utilizando medidas do LBA dos sítios da Fazenda Nossa Senhora Aparecida (FNSA)

(RO), Reserva Biológica do Jarú (RBJ) (RO) e Floresta Nacional de Caxiuanã (CAX) (PA). Os dados orbitais corresponderam aos sensores MODIS/Terra e Aqua e TM/LANDSAT 5. Em síntese, os resultados foram satisfatórios, com erros relativos de  $\approx 1-16\%$  para  $R_n$ , e de  $\approx 25\%$  para ET. Vale destacar que tais pesquisas trabalharam com áreas relativamente pequenas ( $\approx 100.000$  hectares), algumas delas englobando apenas os pixels de torres de fluxo, fato que se deu pela dificuldade da obtenção de cenas livres de nebulosidade.

Uma forma de operacionalizar o SEBAL para análises mais abrangentes da região amazônica seria através de dados de composições de oito, dezesseis dias, ou mensais do sensor MODIS (JUSTICE *et al.*, 2002), em que os efeitos da cobertura de nuvens são atenuados. Nesse sentido, pelo fato do algoritmo ter sido desenvolvido para imagens diárias, surgem dificuldades relacionadas ao cômputo dos dados in situ de entrada (que necessitam ser concomitante ao instante da passagem do satélite). Du *et al.* (2013) utilizaram composições MODIS e o SEBAL para estimativas de ET, obtendo resultados razoáveis ( $R^2=0,87$ ), no entanto, não fica claro nos procedimentos metodológicos como foi realizado onexo entre os dados de superfície e orbitais.

### **3.1.2 Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI)**

O S-SEBI (ROERINK *et al.*, 2000) é um modelo semi-empírico proposto logo após a formulação do SEBAL, sendo ambos muito similares. Algumas das diferenças entre as duas metodologias referem-se à estimativa da radiação IVT emitida pela superfície, H e  $\lambda E$  (discutido a seguir) (OUAIDRARI *et al.*, 2002). O S-SEBI necessita de dados orbitais em radiância espectral, sob condições de céu claro, nas regiões do visível e infravermelho (próximo e termal), para determinar seus parâmetros base, que são a reflectância, TS, e índices de vegetação. A partir desses parâmetros são computados os termos do balanço de energia, necessitando, como informação de campo, apenas medidas de temperatura do ar (SOBRINO *et al.*, 2007; BHATTARAI *et al.*, 2016).

O  $R_n$  é calculado como termo resíduo das trocas de radiação solar e IVT (OKE, 1987), e

o G é derivado a partir de uma relação empírica das características da superfície e da vegetação (SOBRINO *et al.*, 2005). É válido destacar que G é um dos componentes do balanço de energia que apresenta maior dificuldade do ponto de vista de precisão, quando estimado por SR. Sendo assim, deve-se tentar, independente da parametrização proposta pelo modelo utilizado, ajustar localmente a equação para obtenção dessa variável de forma a alcançar melhores resultados (VAN DER TOL, 2012). Ao considerar a aplicação para a Amazônia, salienta-se que em florestas essa variável não possui contribuição relevante no balanço de energia, mas em áreas de solo exposto ou com vegetação esparsa ela se torna uma componente importante.

O cálculo de H e  $\lambda E$  ocorre por meio da fração evaporativa (ROERINK *et al.*, 2000), e é na estimativa desses fluxos que se encontra a maior diferença entre os modelos SEBAL e S-SEBI (LI *et al.*, 2009). No S-SEBI, as densidades de calor sensível e latente são obtidas de maneira conjunta, por meio dessa fração, ao contrário do SEBAL, em que tais variáveis são derivadas independentemente. Dessa forma, não se faz necessária a seleção de pixels representando as condições de nulidade desses fluxos. Segundo Roerink *et al.* (2000), há uma correlação entre a reflectância e a TS em áreas com forçantes atmosféricas constantes. Assim, os autores assumem que a fração evaporativa ( $\Lambda$ ) varia linearmente com a TS para um dado albedo. Utilizando regressões é possível identificar o limite superior de TS (+ seco, máximo H), e o limite inferior (+ úmido, máximo  $\lambda E$ ). De porte dos valores referentes à H e  $\lambda E$ , é possível calcular a ET para toda imagem.

As pesquisas realizadas com o S-SEBI utilizam geralmente dados TM/LANDSAT 5 e concentram-se na avaliação de áreas agrícolas na Europa e Ásia (FAN *et al.*, 2007; BRUNNER *et al.*, 2008; GALLEGUILLOS *et al.*, 2011). No Brasil, verificam-se aplicações no semi-árido (SANTOS & SILVA, 2010) e na região sudeste (LAZARIM, 2013). Os erros observados por tais estudos variam de  $\approx 10-30\%$ . Salienta-se que o S-SEBI apresenta, em geral, erros superiores aos obtidos pelo SEBAL que, de acordo com Sobrino *et al.* (2005), ocorrem pelo fato da estimativa de H ser mais robusta no algoritmo de Bastiaanssen *et al.* (1998a). Entretanto, existem algumas relações

custo-benefício, pois, por exemplo, o S-SEBI necessita de apenas uma variável de superfície de entrada. Nesse caso, a escolha do algoritmo vai depender tanto da disponibilidade de uma rede de estações meteorológicas (dados in situ) quanto da finalidade da aplicação (relacionada à precisão mínima ou ideal das estimativas). Para a Amazônia, uma região com carência de dados observacionais, o modelo S-SEBI pode ser uma alternativa. Ainda, do mesmo modo como salientado para o SEBAL, o ideal para aplicação do S-SEBI na região seria através de composições do sensor MODIS.

### 3.1.3 Surface Energy Balance System (SEBS)

O SEBS (SU, 2002) é um modelo single-source desenvolvido para estimar os fluxos turbulentos atmosféricos a partir de dados de SR. Modelos single-source, onde também se encaixam o SEBAL (item 3.1.1) e o S-SEBI (item 3.1.2), não fazem distinção entre o balanço de energia e os regimes de vapor de água e temperatura da vegetação e do solo (TIMMERMANS *et al.*, 2007). Como visto, a premissa principal desses modelos é baseada no contraste entre os limites seco e úmido para derivar a ET pixel a pixel. Tais limites seguem geralmente as seguintes características: i) máxima (mínima) TS, e ii) baixa ou nenhuma (alta ou máxima) ET (GOWDA *et al.*, 2008).

Para geração das estimativas, o SEBS exige três conjuntos de informações de entrada. O primeiro conjunto consiste no as, TS, fração da cobertura vegetal, e índice de área foliar (LAI). Esses dados são derivados de imagens de SR em conjunção com informações específicas sobre a área de interesse (SU *et al.*, 1999; LI *et al.*, 2000). O segundo conjunto inclui a pressão, temperatura, umidade do ar, e velocidade do vento. Nesse sentido, salienta-se que podem ser utilizadas tanto medidas obtidas através de estações em superfície, quanto geradas por modelos de grande escala (dados de reanálise). O terceiro conjunto está relacionado aos fluxos de radiação solar e IVT incidentes que, assim como os dados do segundo conjunto, podem ser medidos diretamente ou derivados de reanálise.

As estimativas de Rn e G seguem as premissas do SEBAL e S-SEBI, enquanto que na determinação de H e  $\lambda E$  denotam-se algumas

peculiaridades. No SEBS, para o limite seco,  $\lambda E$  é assumido como zero ( $\lambda E_{\text{seco}}$ ), devido à restrição de umidade no solo, o que significa que H atinge seu valor máximo ( $H_{\text{seco}}$ ). No limite úmido, a ET ocorre em sua taxa potencial ( $\lambda E_{\text{úmido}}$ ), e H atinge seu valor mínimo ( $H_{\text{úmido}}$ ). Após o cálculo de  $H_{\text{seco}}$ ,  $H_{\text{úmido}}$ , e H, utilizando a teoria da similaridade de Monin-Obukhov (MONIN & OBUKHOV, 1954), obtêm-se a fração evaporativa relativa ( $\Lambda_r$ ), e a fração evaporativa de referência ( $\Lambda_{\text{ref}}$ ), que são dadas, respectivamente, pelas Equações 2 e 3.

$$\Lambda_r = 1 - \frac{H - H_{\text{úmido}}}{H_{\text{seco}} - H_{\text{úmido}}} \quad (2)$$

$$\Lambda_{\text{ref}} = \frac{\Lambda_r \lambda_{\text{úmido}}}{Rn - G} \quad (3)$$

Pela inversão da Equação 3 é possível determinar o  $\lambda E$  para todos os pixels. Destaca-se que na parametrização de processos turbulentos na camada imediatamente acima da vegetação é necessário conhecer o comprimento de rugosidade da superfície (TAKAGI *et al.*, 2003). A maioria dos algoritmos considera esses valores fixos, enquanto o SEBS propõe uma nova formulação para o cômputo desse coeficiente, o que é considerado por alguns autores (LI *et al.*, 2009) uma das maiores vantagens desse modelo, pois permite uma estimativa mais precisa de H.

Diversos estudos têm destacado o potencial do SEBS na estimativa diária, mensal e anual da ET em escalas locais e regionais (JIA *et al.*, 2009; ELHAG *et al.*, 2011; MA *et al.*, 2013; SHOKO *et al.*, 2015). Nesse contexto, destaca-se a pesquisa desenvolvida por Jia *et al.* (2009) para determinar a ET no delta do rio Amarelo (China). Esses autores acima citados utilizaram dados MODIS (composições) referentes à reflectância, TS, e LAI, obtendo valores de ET para 14 tipos de uso da terra, com erro médio quadrático de  $\approx 0,9-1,3$  mm. Ainda, estudos sugerem que os erros do SEBS em comparação com medidas in situ variam de  $\approx 8-15\%$  (SU *et al.*, 2005; MA *et al.*, 2013). Em suma, o SEBS possui vantagens em relação a outros algoritmos, como formulações para o coeficiente de rugosidade e por possibilitar o uso de composições MODIS,

porém, necessita de um elevado número de parâmetros de superfície, o que, em uma região como a Amazônia, pode ser um impeditivo.

### **3.1.4 Evapotranspiration Assessment from Space (EVASPA)**

O EVASPA (GALLEGO-ELVIRA *et al.*, 2013) é um modelo desenvolvido para a determinação da ET, a partir de dados de SR, em escalas espaciais e temporais relevantes para estudos hidrológicos. Algumas características importantes desse algoritmo dizem respeito à: i) possibilidade de integrar dados de distintos sensores orbitais, ii) proporcionar uma estimativa das incertezas, e iii) produção de mapas de ET mesmo para dias sem imagens de SR disponíveis. O EVASPA é baseado no S-SEBI (ROERINK *et al.*, 2000) (item 3.1.2) e no triangle method (MORAN *et al.*, 1994), que são, de modo geral, bastante semelhantes. Em Carlson (2007) é possível encontrar os fundamentos do triangle method para estimativa da ET.

O foco do EVASPA é a geração de estimativas de ET em escala quilométrica utilizando o sensor MODIS/Terra e Aqua. No entanto, o algoritmo também permite a realização de estimativas através de sensores com resolução espacial mais alta, como o TM/LANDSAT 5 e ASTER/Terra. Nesse sentido, destaca-se que, por ser um modelo recente, as equações para imagens de maior resolução ainda estão sendo implementadas. Assim, no que se refere às estimativas baseadas em dados MODIS, são usados produtos diários e composições de oito e dezesseis dias relacionados ao albedo, TS, emissividade, LAI, e índices de vegetação. Ainda, para essas estimativas, o modelo exige a entrada de informações numéricas do terreno, que são derivadas do modelo digital de elevação global GTOPO30 (<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.asp>). Os dados de superfície necessários para o EVASPA são a radiação solar e IVT incidentes.

O modelo possui diversas equações para cada parâmetro necessário no cálculo da ET, como o  $R_n$  (SOBRINO *et al.*, 2007),  $G$  (TANGUY *et al.*, 2012), e  $\Lambda$  (TANG *et al.*, 2010). Dessa forma, diferentes estimativas de ET são fornecidas dependendo do tipo de dado de entrada, o que proporciona a avaliação do nível de incerteza na determinação dessa

variável. Ainda, o modelo contém algoritmos de interpolação para estimativa da ET em dias sem dados orbitais ou com presença de nuvem (DELOGU *et al.*, 2012). É válido salientar que a geração de informações em dias com indisponibilidade de dados orbitais é interessante para aplicações na Amazônia, pois como se sabe, existe grande dificuldade de obtenção de dados livres de nebulosidade na região. Um último ponto que merece destaque diz respeito à possibilidade de comparação das estimativas do EVASPA com o produto MODIS de ET global (MOD16) (MU *et al.*, 2011) (discutido a seguir). O EVASPA gera gráficos da ET mensal e anual acumulada para cada estimativa, mapas de diferença, e diagramas de dispersão.

A validação inicial do EVASPA se deu a partir da comparação das estimativas com dados medidos em um sítio no sul da França entre 2009-2011 (GALLEGO-ELVIRA *et al.*, 2013). O erro médio quadrático correspondeu a 0,78 mm, enquanto o  $R^2$  foi de 0,76. Destaca-se que, tanto por algumas de suas características (p.e. necessidade reduzida de dados de superfície, e possibilidade de estimativas em dias sem aquisição de imagens) quanto pelos resultados iniciais de validação (que se mostram promissores) o EVASPA se configura como um modelo de grande potencial de aplicação na região amazônica.

### **3.2 Modelos para estimativa dos fluxos de $CO_2$**

Nos últimos anos tornou-se possível avaliar de maneira mais precisa o balanço de carbono nos ecossistemas terrestres pelo desenvolvimento do sistema de correlações turbulentas (BALDOCCHI *et al.*, 2001). No entanto, as estimativas por esse sistema representam somente os fluxos na escala da torre, que varia de centenas de metros a alguns quilômetros. Dessa forma, diversos estudos têm sido realizados no sentido de entender os processos que envolvem o carbono ganho pelos ecossistemas através da fotossíntese e o carbono perdido pela respiração utilizando dados de SR por intermédio de modelagem (TANG *et al.*, 2013).

A maioria dos modelos é baseada na eficiência de uso da radiação (RUE), embora existam abordagens empíricas. O conceito de RUE foi proposto por Monteith (1972) e,

posteriormente, formou a base para o uso do SR na quantificação da produtividade primária da vegetação. Nesse sentido, as estimativas se fundamentam na relação entre a RUE, radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR), fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fAPAR), e, ainda, em fatores ambientais que limitam a fotossíntese (MCCALLUM *et al.*, 2009). As maiores dificuldades referem-se à obtenção da RUE para grandes áreas (dependência de fatores ambientais e da própria vegetação), assim como da APAR (dependência da dinâmica da atmosfera) (TAN *et al.*, 2012). As principais saídas desses modelos dizem respeito à produtividade primária bruta (GPP) e líquida (NPP), respiração do ecossistema ( $R_{\text{eco}}$ ), e fluxo líquido de carbono (NEE).

### 3.2.1 Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)

O CASA (POTTER *et al.*, 1993) é um modelo fundamentado nos processos de assimilação de carbono e respiração para estimativa, em especial, da NPP a partir de observações de satélite. O modelo incorpora as premissas da maioria dos algoritmos biogeoquímicos, ou seja, de que os fluxos de CO<sub>2</sub> são controlados por propriedades do ecossistema e conduzidos pela variabilidade do clima. Em termos gerais, a formulação do CASA baseia-se no conceito de verdor da vegetação (POTTER *et al.*, 1999; ZHANG *et al.*, 2015). O nível de verdor pode ser obtido a partir de índices de vegetação derivados de SR, sendo proposto inicialmente medi-lo por meio do NDVI, dado sua boa correlação com distintos parâmetros da vegetação (p.e. fAPAR, LAI) (DEFRIES *et al.*, 1995).

A NPP é calculada no CASA com base na RUE (MONTEITH, 1972). Assim, a produção de biomassa pelas plantas é estimada como o produto da radiação solar incidente ( $K\downarrow$ ), fAPAR, e um termo de eficiência de uso da radiação ( $\epsilon$ ) ( $\epsilon=0,389 \text{ g C m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ ), que é multiplicado por fatores escalares (f) de temperatura do ar ( $T_{\text{ar}}$ ) e umidade do solo (w), conforme a Equação 4.

$$NPP = K\downarrow fAPAR \epsilon f(T_{\text{ar}}) f(w) \quad (4)$$

Como se observa, a NPP é estimada

diretamente, sem estimativas separadas da GPP e  $R_{\text{eco}}$ . Ainda, a temperatura do ar e umidade do solo são usadas para redução de escala da máxima RUE. Em relação aos dados de entrada, o modelo necessita de medições em superfície de radiação solar, temperatura do ar e precipitação. De modo geral, os resultados do modelo são bem correlacionados com a NPP obtida de observações de campo em escala regional, mas quando comparados com ecossistemas específicos (p.e. cultivos agrícolas, florestas, e pastagens) verificam-se baixas concordâncias (NAYAK *et al.*, 2009). Segundo Yu *et al.* (2009), isso se deve sobretudo porque a máxima RUE do CASA ( $\epsilon=0,389 \text{ g C m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ ) não é comparável com a RUE de diversos biomas.

### 3.2.2 Parametric Production Efficiency Model (C-Fix)

O C-Fix (VEROUSTRAETE *et al.*, 2002) é um modelo baseado na formulação de Monteith (1972), desenvolvido para quantificar os fluxos de carbono nas escalas local, regional e global (CHHABRA & DHADWALL, 2004; VERSTRAETEN *et al.*, 2006). Do mesmo modo como no modelo CASA (item 3.2.1), o elemento chave da abordagem é que o estado biofísico da vegetação pode ser inferido a partir de dados de SR. Nesse sentido, as saídas do C-Fix são derivadas, em síntese, de três etapas: i) mapeamento da evolução da vegetação pelo NDVI obtido por sensores orbitais, ii) estimativa da fAPAR pela relação de Myneni & Williams (1994), e iii) incorporação de medidas de temperatura do ar e radiação solar incidente.

Ao contrário da maioria dos modelos, que estimam somente a GPP e/ou NPP, o C-Fix proporciona a determinação da NPP, pela subtração da GPP com a respiração autotrófica ( $R_a$ ), e da produtividade líquida do ecossistema (NEP), pela subtração da NPP com a respiração heterotrófica ( $R_h$ ) (VERSTRAETEN *et al.*, 2006). Assim, são utilizadas, de modo geral, as seguintes equações para estimativa dos três tipos de fluxo:

$$GPP = f(T_{\text{ar}}) f(\text{CO}_{2,\text{fert}}) \epsilon fAPAR cK\downarrow \quad (5)$$

$$NPP = GPP(1 - R_a) \quad (6)$$

$$NEP = NPP - R_h \quad (7)$$



Nas Equações 5, 6 e 7,  $f(T_{ar})$  é um fator normalizado de temperatura do ar,  $f(CO_2, f_{crit})$  é um fator normalizado de fertilização por  $CO_2$ ,  $\varepsilon$  é o termo de eficiência de uso da radiação ( $\varepsilon=1,10 \text{ g C m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ ), e  $c$  é a eficiência climática ( $c=0,48$ ) (MCCRE, 1972). As variáveis  $R_a$  e  $R_h$  são obtidas de algoritmos propostos por Veroustraete *et al.* (1996).

Ao observar as equações, percebe-se, por exemplo, que o C-Fix possui uma parametrização mais robusta que a sugerida pelo CASA para o cálculo da NPP, principalmente pela inserção de informações relativas à  $R_{eco}$ . Ainda, a máxima RUE no C-Fix é constante ( $\varepsilon=1,10 \text{ g C m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ ), sendo reduzida pelos fatores normalizados de dependência da temperatura do ar e fertilização por  $CO_2$ . Os dados meteorológicos de entrada para o modelo dizem respeito à radiação solar incidente e temperatura do ar.

Com relação à validação do C-Fix, estudos indicam boa correlação entre os fluxos estimados pelo modelo e medidos em sistemas de correlações turbulentas ( $R^2 \approx 0,75$ ) (VEROUSTRAETE *et al.*, 2002). Modificações recentes no C-Fix, como a inserção de funções de limitação hídrica, proporcionaram uma melhora do desempenho do algoritmo na comparação com medidas de campo (VERSTRAETEN *et al.*, 2010). Denota-se, contudo, a falta de estudos com o objetivo de avaliar precisamente quais são as principais fontes de incerteza do modelo.

Alguns estudos realizados na Europa, utilizando dados orbitais AVHRR/NOAA e VEGETATION/SPOT 4 (VEROUSTRAETE *et al.*, 2002; 2004), mostram que o modelo fornece base sólida para estimativa da evolução e distribuição geográfica dos principais constituintes do balanço de carbono em ecossistemas florestais na escala regional. Tais resultados, aliados ao desempenho na validação e a baixa necessidade de informações *in situ*, elucidam o potencial de aplicação do C-Fix na Amazônia.

### 3.2.3 Vegetation Photosynthesis Model (VPM)

O VPM (XIAO *et al.*, 2004) foi desenvolvido para estimar a GPP em florestas utilizando índices de vegetação obtidos de sensores ópticos avançados. Nas duas últimas décadas, séries de NDVI, geralmente do sensor AVHRR/NOAA, foram utilizadas para

modelagem da GPP e NPP (FIELD *et al.*, 1995). Entretanto, o NDVI possui limitações, como a sensibilidade a aerossóis atmosféricos (HUETE *et al.*, 2002). A inclusão de bandas nas regiões do azul e infravermelho de ondas curtas em sensores como o VEGETATION/SPOT 4 e MODIS/Terra e Aqua possibilitou a geração de conjuntos de dados de distintos índices de vegetação, que levam em conta tais limitações. Nesse sentido, o VPM utiliza em suas estimativas o EVI (HUETE *et al.*, 1997) e o índice de umidade da vegetação (LSWI) (BOLES *et al.*, 2004).

O VPM é baseado na RUE, como os demais modelos vistos até aqui, e possui um diferencial importante, que é assumir que os dosséis florestais são compostos de vegetação fotossinteticamente ativa (PAV) (p.e. cloroplastos) e vegetação não fotossinteticamente ativa (NPV) (p.e. folhas senescentes e galhos) (ZHANG *et al.*, 2015). Assim, no VPM, a GPP é obtida conforme com a seguinte equação:

$$GPP = \varepsilon fAPAR_{PAV} IPAR \quad (8)$$

Na Equação 8,  $fAPAR_{PAV}$  é a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela PAV, e  $IPAR$  é a radiação fotossinteticamente ativa incidente. A  $fAPAR_{PAV}$  é estimada como uma função linear do EVI (XIAO *et al.*, 2004). A partição da  $fAPAR$  em  $fAPAR_{PAV}$  e  $fAPAR_{NPV}$  é importante, pois a presença de NPV tem um efeito significativo na  $fAPAR$  em nível de dossel. Por exemplo, em florestas com  $LAI < 3,0$ , a NPV aumentou a  $fAPAR$  em  $\approx 10-40\%$  (ASNER *et al.*, 1998). Nesse sentido, salienta-se que somente a  $fAPAR_{PAV}$  é utilizada para a fotossíntese. Fica evidente que essa partição é uma questão crítica na modelagem da GPP ou NPP em florestas. Ou seja, levar em consideração a  $fAPAR_{PAV}$  pode incorrer em uma melhoria substancial das estimativas, no entanto, a maioria dos algoritmos de fluxos de  $CO_2$  não incorpora esse fundamento.

Outro ponto de destaque do VPM é que o termo  $\varepsilon$  não é constante, ao contrário do CASA e C-Fix, variando conforme a vegetação. A parametrização de  $\varepsilon$  em distintas florestas é dada por medidas de NEE e  $IPAR$  obtidas por torres de fluxo em sítios específicos. Pesquisas já foram realizadas para a definição dessa variável em floresta boreal ( $\varepsilon=2,21 \text{ g C m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ ) (XIAO

et al., 2004), e floresta tropical úmida ( $\epsilon=2,48 \text{ g C m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ ) (XIAO et al., 2005). Funções de temperatura, fenologia, e condições hídricas das folhas (pelo LSWI) são utilizadas para redução de escala de  $\epsilon$ . As informações de superfície requeridas pelo modelo referem-se à temperatura do ar, NEE e IPAR.

No que se diz respeito à validação do VPM, Liu et al. (2011) obtiveram  $R^2 \approx 0,88$  na comparação das saídas do modelo com medidas de superfície, enquanto Jiang et al. (2013) encontraram erro relativo de  $\approx 59\%$ . Segundo Xiao et al. (2004), as principais fontes de erro do modelo estão associadas com a sensibilidade à PAR e temperatura do ar, assim como a não correção dos efeitos bidirecionais sobre os índices de vegetação. O VPM já foi aplicado em distintos ecossistemas florestais, dentre os quais, a floresta amazônica (XIAO et al., 2005). Foram utilizados dados VEGETATION/SPOT 4 e MODIS/Terra e Aqua (dados diários e composições) e geradas estimativas da GPP para o sítio da FNT/K67. O modelo estimou uma alta GPP no fim das estações secas, o que esteve consistente com a alta ET e GPP estimadas a partir da torre micrometeorológica.

Como se percebe, o VPM possui elevado potencial para estimativa sazonal da produtividade em florestas tropicais. No entanto, a maioria dos estudos com o modelo realiza estimativas apenas para o pixel da torre, ou seu entorno (p.e.  $3 \times 3$  pixels) (XIAO et al., 2005; LIU et al., 2011). Assim, apesar do VPM possibilitar o aumento de escala das estimativas de GPP (XIAO et al., 2004), para operacionalização em base regional algumas modificações na estrutura do algoritmo devem ser realizadas, principalmente com relação à obtenção de  $\epsilon$  para distintas fisionomias florestais e/ou grandes áreas.

### 3.2.4 Temperature and Greenness Rectangle Model (TGR)

O TGR (YANG et al., 2013a) foi desenvolvido para estimativa da produtividade em ecossistemas terrestres por intermédio de dados MODIS/Terra e Aqua. O modelo se fundamenta nos estudos de Rahman et al. (2005), que verificaram forte relação linear entre o EVI e a GPP em distintas florestas, e de Sims et al. (2006), que mostraram que informações sobre a TS podem ser usadas para inferir a

influência, por exemplo, do estresse hídrico na GPP. Assim, o TGR utiliza a combinação de produtos MODIS de EVI e TS, e dados in situ de IPAR para estimar a GPP em intervalos de 16 dias. É possível destacar três pontos principais do TGR: i) o algoritmo segue estritamente a lógica da RUE, ii) possui pouca dependência de medidas meteorológicas de superfície, e iii) a sobreposição de informações em variáveis explicativas correlacionadas é evitada.

Partindo da proposição de Monteith (1972), o cômputo da GPP no TGR é dado conforme a Equação 9.

$$GPP = \epsilon^* f(\text{EVI}, \text{TS}) \text{IPAR} \quad (9)$$

O termo  $\epsilon^*$  é a quantidade de carbono fixado por unidade de IPAR. Salienta-se que esse significado é diferente da definição clássica de RUE, que é a quantidade de carbono fixado por unidade de APAR. No TGR, assim como na maior parte dos modelos de produtividade, o termo de eficiência de uso da radiação é multiplicado por um fator de escala para reduzir seus valores sob condições desfavoráveis (p.e. alta ou baixa temperatura e alto déficit de pressão de vapor). Para tanto, são utilizadas as variáveis EVI (WU et al., 2011) e TS (XIAO et al., 2004). De acordo com Yang et al. (2013a), é inapropriado simplesmente multiplicar o efeito dessas duas variáveis, dado que ambas são fisicamente interdependentes. Assim, para o cômputo de  $f$  a partir do EVI e TS, o algoritmo propõe uma metodologia baseada no método dos mínimos médios quadrados (YANG et al., 2013a). Pesquisas indicam que a IPAR pode variar de  $\approx 40\text{-}50\%$  da radiação solar incidente (LEIGH, 1999). Assim, Yang et al. (2013a) sugerem a utilização de medidas in situ desse parâmetro para redução das incertezas.

No TGR, a exemplo do VPM (item 3.2.3), o termo de eficiência de uso da radiação não é constante, podendo ser calibrado para distintas fisionomias vegetais. No estudo de Yang et al. (2013a), foram obtidos valores desse termo para oito tipologias vegetais, incluindo pastagem, savana, e floresta mista. Nessa mesma pesquisa foi realizada a validação do modelo, que se deu com medidas obtidas em 13 sítios experimentais

nos Estados Unidos (EUA). Os resultados mostraram que as estimativas do TGR foram concordantes com os dados das torres de fluxo para praticamente todos os tipos de vegetação, com  $R^2 \approx 0,67-0,91$ . O TGR permite capturar os processos físicos da GPP em nível de ecossistema, tornando plausível sua implementação na Amazônia. Nesse contexto, o uso de dados de IPAR obtidos diretamente do sensor MODIS (RYU *et al.*, 2011) eliminaria a necessidade de medidas in situ no modelo, tornando-o com maior potencial de aplicação na região. Ainda, segundo Yang *et al.* (2013a), o foco dos próximos estudos com o TGR será a validação para as condições de floresta tropical.

### 3.3 Produtos globais de sensoriamento remoto

O SR é a principal ferramenta de observação do estado e de processos da superfície terrestre e atmosfera (YANG *et al.*, 2013b). As plataformas LANDSAT, SPOT, NOAA, Terra e Aqua proporcionaram/proporcionam séries temporais de dados em variadas resoluções espaciais e temporais, utilizadas para diversos propósitos (MARTÍNEZ & GILABERT, 2009). Uma das aplicações refere-se ao estudo de mudanças globais, ou seja, os dados gerados têm sido utilizados em modelos climáticos para simular a dinâmica do clima e suas projeções futuras (GHENT *et al.*, 2011). Nesse sentido, verifica-se um esforço da comunidade científica na geração de produtos globais padronizados de SR, sobretudo relacionados ao domínio biofísico.

Atualmente, alguns dos mais importantes produtos globais derivados de satélite dizem respeito ao sensor MODIS/Terra e Aqua. O sensor MODIS foi desenvolvido pela Goddard Space Flight Center (GSFC/NASA) e possui um sistema de imageamento com trinta e seis bandas espectrais, as quais abrangem as faixas do visível ao infravermelho termal. O período de revisita é diário para as latitudes acima de 30° e de dois dias para as latitudes inferiores a 30° (ZHAN *et al.*, 2002). Os produtos de superfície desse sensor correspondem, entre outros, ao as (SCHAAF *et al.*, 2002), TS (WAN *et al.*, 2004), índices de vegetação (GAO *et al.*, 2000), e uso da terra (FRIEDL *et al.*, 2002). Mais especificamente, em relação ao balanço de energia e carbono, destacam-se os produtos de ET (MOD16) (MU

*et al.*, 2011), e GPP e NPP (MOD17) (ZHAO *et al.*, 2005).

#### 3.3.1 MOD16

O MOD16 (MU *et al.*, 2011) foi desenvolvido com objetivo de determinar a ET global da superfície a partir de dados MODIS/Terra e Aqua e informações meteorológicas do Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). O algoritmo é baseado na equação de Penmann-Monteith (MONTEITH, 1965), adaptada para uso com dados de SR:

$$ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (10)$$

Na Equação 10,  $\Delta$  é a taxa de variação da pressão de saturação do vapor de água,  $\rho_a$  é a massa específica do ar,  $c_p$  é o calor específico do ar,  $e_s$  e  $e_a$  correspondem, respectivamente, a pressão de saturação do vapor de água e a pressão real do vapor de água,  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\gamma = 0,066 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), e  $r_s$  e  $r_a$  correspondem, respectivamente, a resistência superficial e aerodinâmica da vegetação. Os produtos MODIS de entrada no algoritmo incluem o  $\alpha_s$ , LAI, e uso da terra. Com relação aos parâmetros meteorológicos, são utilizados dados de reanálise do GMAO correspondentes a radiação solar, temperatura do ar, e pressão do vapor de água. Em suma, os dados MOD16 apresentam 1 km de resolução espacial e abrangem uma superfície de  $\approx 109$  milhões de km<sup>2</sup>. Além da ET potencial e real, são disponibilizados os fluxos de calor latente potencial e real em intervalos de oito dias, mensal e anual.

O MOD16 foi inicialmente validado com medidas de 46 torres de fluxo nos EUA, obtendo-se um  $R^2 \approx 0,65$  (MU *et al.*, 2011). Nesse sentido, é possível indicar duas importantes fontes de incerteza do MOD16. A primeira está relacionada aos dados do GMAO, sobretudo por sua baixa resolução ( $\approx 100$  km) em relação às saídas do MOD16 ( $\approx 1$  km). A segunda diz respeito aos produtos de LAI e uso da terra, que podem apresentar razoáveis imprecisões dependendo do bioma, implicando na determinação incorreta de parâmetros para o cálculo de transpiração das plantas (MU *et al.*, 2011). A maioria das

pesquisas com o MOD16 concentra-se na Ásia e Oriente Médio, sendo voltadas tanto para avaliação de bacias hidrográficas (COMAIR *et al.*, 2012; TANG *et al.*, 2015) quanto para tipos de uso da terra, em especial áreas agrícolas (SUN *et al.*, 2007). Os resultados de validação de tais pesquisas concordam com os obtidos por MU *et al.* (2011).

Estudos recentes validaram o MOD16 para o Cerrado e Amazônia (RUHOFF, 2011; RUHOFF *et al.*, 2013). Em áreas de Cerrado, o algoritmo apresentou coeficientes de correlação relativamente altos, de  $\approx 0,78-0,81$  (RUHOFF *et al.*, 2013). Para a Amazônia, os resultados foram, em geral, insatisfatórios. Na comparação com torres de fluxo em floresta e pastagem foram verificados valores de  $R^2$  entre  $-0,54$  e  $0,69$  (RUHOFF, 2011). Salienta-se que generalizações feitas pelo MOD16 em relação a alguns parâmetros (p.e. condutância do dossel) definidos como constantes para um dado bioma (mesmo heterogêneo, como a Amazônia), podem ser uma das causas da baixa correlação entre os dados estimados e medidos na região. É válido destacar que esse é um dos principais desafios de algoritmos globais, que precisam ser complexos, de modo a representar com acurácia os processos físicos em superfície, mas também simples, para serem implementados em escala planetária (RUHOFF, 2011). Apesar disso, o MOD16 se mostrou adequado para compreensão da variabilidade espacial da ET na bacia amazônica. Esse é um resultado relevante e, assim, sugere-se a intercomparação dos resultados do MOD16 na Amazônia com estimativas de modelos regionais, como os apresentados nos itens 3.1.1 a 3.1.4.

### 3.3.2 MOD17

O produto MOD17 (ZHAO *et al.*, 2005) proporciona estimativas contínuas de GPP e NPP para as superfícies vegetadas do planeta. Assim como os modelos apresentados nos itens 3.2.1 a 3.2.4, o algoritmo do MOD17 baseia-se na lógica da RUE Monteith (1972). Segundo essa lógica, a produtividade de uma vegetação sob boas condições hídricas e de fertilidade é linearmente relacionada com a quantidade de APAR. Dessa forma, o MOD17 utiliza três relações básicas (Equações 11, 12, e 13) para

calcular a GPP e a fotossíntese líquida ( $PS_{Net}$ ), em intervalos de oito dias, e a NPP, em intervalo anual.

$$GPP = \varepsilon f(T_{ar,min})f(VPD)APAR \quad (11)$$

$$PS_{Net} = GPP - R_r \quad (12)$$

$$NPP = \sum (PS_{Net}) - R_g - R_m \quad (13)$$

Nas equações anteriores,  $f(T_{ar,min})$  e  $f(VPD)$  são fatores de escala relacionados, respectivamente, a temperatura mínima do ar e déficit de pressão de vapor,  $R_r$  é a respiração de manutenção de folhas e raízes finas,  $R_g$  é a respiração de crescimento, e  $R_m$  é a respiração de manutenção de células vivas do tecido lenhoso. Salienta-se que o algoritmo define valores distintos para o termo  $\varepsilon$ , dependendo da vegetação. Nesse sentido, são considerados distintos tipos de florestas, cerrados, savanas, pastagens, e áreas agrícolas. Os valores de  $T_{ar,min}$ ,  $VPD$ , assim como os relacionados à respiração, são derivados de uma lookup table com parâmetros fisiológicos específicos para determinado tipo de bioma (RUNNING *et al.*, 2004). O MOD17 utiliza, além de produtos padrões MODIS (p.e. fAPAR e LAI), dados de reanálise (p.e. temperatura do ar e radiação solar) do National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). As saídas do MOD17 (GPP, PSNet (oito dias), e NPP (anual)), como as do MOD16, possuem 1 km de resolução espacial.

Estudos de comparação das estimativas do MOD17 com medidas de torres de fluxo mostram erros relativos de  $\approx 24-70\%$ , e coeficientes de correlação variando entre  $\approx 0,26-0,88$  (HEINSCH *et al.*, 2006; COOPS *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2013). De modo geral, a GPP e NPP derivadas do MOD17 seguem as tendências sazonais esperadas conforme o uso da terra e clima, no entanto, os valores tendem a ser superestimados em sítios de baixa produtividade, e subestimados em locais com altas taxas de produtividade. Nesse sentido, destaca-se que as principais fontes de erro do MOD17 estão associadas ao produto de fAPAR, e aos dados de reanálise (ZHAO *et al.*, 2006).

Os produtos MOD17 já foram aplicados e validados em distintas regiões do planeta (TURNER *et al.*, 2006; WANG *et al.*, 2013; GILBERT *et al.*, 2015). No entanto, para Amazônia, reconhecidamente importante no ciclo de carbono global, não são encontradas pesquisas com o MOD17. Assim, faz-se necessário um esforço de validação desse produto, de modo a avaliar seu grau de acurácia e, conseqüentemente, de funcionalidade para o entendimento da variabilidade espacial e temporal da produtividade primária na região.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos micrometeorológicos no ambiente amazônico apresentam limitações espaciais e temporais, destarte, o SR surge como ferramenta para aumentar a compreensão dos processos de superfície na região. Os modelos para estimativa dos componentes do balanço de energia e carbono a partir de dados orbitais variam amplamente em relação às informações de entrada, parametrizações, e acurácia dos resultados. Em suma, os algoritmos de fluxos de energia utilizam imagens nas regiões do visível e infravermelho (próximo e termal) e são baseados em métodos empíricos e físicos. As variáveis *in situ* necessárias correspondem, de modo geral, à temperatura do ar e velocidade do vento, e as maiores incertezas estão na determinação de G e H. Já os modelos de fluxos de CO<sub>2</sub> baseiam-se nos espectros do visível e infravermelho próximo, sendo alicerçados no conceito de RUE. O maior desafio está justamente na definição do termo de RUE para distintos ecossistemas, e a informação básica de campo refere-se à radiação solar.

No que diz respeito à implementação desses modelos na região amazônica, salientam-se duas dificuldades: i) obtenção de dados orbitais livres de nebulosidade, e ii) disponibilidade de medidas de campo. Assim, a escolha do algoritmo deve levar em consideração, essencialmente, a possibilidade de utilização de dados de composições diárias, e a baixa necessidade de informações *in situ*. Ainda, outras questões como complexidade e operacionalidade dos modelos também precisam ser ponderadas. Nesse sentido, é possível indicar os algoritmos que possuem maior potencialidade de aplicação na região e/

ou onde os esforços de implementação devem ser concentrados. Em relação aos modelos de balanço de energia, destacam-se o SEBAL (BASTIAANSEN *et al.*, 1998a), pela baixa necessidade de dados de campo e por ter sido validado com bons resultados na região, e o EVASPA (GALLEGO-ELVIRA *et al.*, 2013), pela operacionalidade e possibilidade de geração de estimativas mesmo em dias sem dados orbitais disponíveis. No que se refere aos algoritmos de balanço de carbono, sugerem-se o VPM (XIAO *et al.*, 2004), por ter sido utilizado em distintos ecossistemas florestais (inclusive na Amazônia) com bons resultados, e o TGR (YANG *et al.*, 2013a), por ser baseado em composições MODIS e possuir pouca dependência de dados de campo.

Com relação à utilização de produtos globais de SR na Amazônia, é importante frisar que esses possibilitam, em geral, análises dos padrões espaciais de parâmetros da superfície, porém, são imprecisos no que se refere à magnitude das estimativas, o que impede, por exemplo, avaliações acuradas da dinâmica sazonal e interanual das interações entre a biosfera e atmosfera na região. Um aspecto a ser destacado é que alguns estudos em regiões tropicais, entre as quais a Amazônia, têm proposto metodologias integrando imagens de satélite e dados climáticos de reanálise em modelos hidrológicos e ecossistêmicos que são fundamentados em medidas pontuais (ARAGÃO, 2004; WU *et al.*, 2006; RUHOFF *et al.*, 2013; SILVA, 2013). Embora existam dificuldades, por exemplo, relacionadas à representação de processos ecofisiológicos para a mudança de escala do nível foliar para o do dossel, tais abordagens se mostram promissoras e constituem relevantes linhas de pesquisa futuras.

Em síntese, o uso de algoritmos baseados em imagens de satélite possui um importante papel no entendimento espacial e temporal de parâmetros biofísicos da superfície em uma região onde a maioria das informações são geradas pontualmente. Os dados gerados podem ser utilizados para alimentar modelos de superfície acoplados aos modelos de circulação geral da atmosfera, permitindo, entre outros, avaliar o impacto, em âmbito regional e global, causado por mudanças de uso/cobertura da terra.

## AGRADECIMENTOS

Gabriel de Oliveira agradece ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e ao Ministério da Educação (MEC) pela concessão de bolsas de pesquisa através das agências CNPq (Processo: 52521/2012-7) e CAPES (Processo: 8210/2014-4), respectivamente. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão agradece as agências FAPESP (Processo: 50533-5) e CNPq (Processo: 304425/2013-3) pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 26, p. 4011-4027, 2011.
- ALVES, F. S. M.; FISCH, G.; VENDRAME, I. F. Modificações do microclima e regime hidrológico devido ao desmatamento na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 29, p. 395-409, 1999.
- ARAGÃO, L. E. O. C. **Modelagem dos padrões temporal e espacial da produtividade primária bruta na região do tapajós: uma análise multi-escala**. 2004. 283 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.
- ARTAXO, P. E. Break down boundaries in climate research. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 239-239, 2012.
- ASNER, G. P.; WESSMAN, C. A.; ARCHER, S. Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems. **Ecological Applications**, v. 8, p. 1003-1021, 1998.
- BALDOCCHI, D.; FALGE, E.; GU, L.; OLSON, R.; HOLLINGER, D.; RUNNING, S.; ANTHONI, P.; BERNHOFER, C.; DAVIS, K.; EVANS, R.; FUENTES, R.; GOLDSTEIN, A.; KATUL, G.; LAW, B.; LEE, X.; MALHI, Y.; MEYERS, T.; MUNGER, W.; OECHEL, W.; PAW, K. T. U.; PILEGAARD, K.; SCHMID, H. P.; VALENTINI, R.; VERMA, S.; VESALA, T.; WILSON, K.; WOFSY, S. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 11, p. 2415-2434, 2001.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, n. 1-4, p. 198-212, 1998a.
- BASTIAANSEN, W. G. W.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): validation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, n. 1-4, p. 213-229, 1998b.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000.
- BHATTARAI, N.; DOUGHERTY, M.; MARZEN, L. J.; KALIN, L. Validation of evaporation estimates from a modified Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) model in the south-eastern United States. **Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 6, p. 511-519, 2012.
- BHATTARAI, N.; SHAW, S. B.; QUACKENBUSH, L. J.; IM, J.; NIRLAULA, R. Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 49, p. 75-86, 2016.
- BOLES, S.; XIAO, X.; ZHANG, Q.; MUNKHUTYA, S.; LIU, J.; OJIMA, D. S. Land cover characterization of Temperate East Asia: using multi-temporal image data of VEGETATION sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 477-489, 2004.
- BRUNNER, P.; LI, H. T.; KINZELBACH, W.; LI, W. P.; DONG, X. G. Extracting phreatic evaporation from remotely sensed maps of evapotranspiration. **Water Resources Research**, v. 44, p. 1-12, 2008.
- CARLSON, T. N. An overview of the “triangle method” for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. **Sensors**, v. 7, p. 1612-1629, 2007.

- CHHABRA, A.; DHADWALL, V. K. Estimating terrestrial net primary productivity over India using satellite data. **Current Science**, v. 86, n. 2, p. 269-271, 2004.
- COMAIR, G. F.; MCKINNEY, D. C.; SIEGEL, D. Hydrology of the Jordan River Basin: watershed delineation, precipitation and evapotranspiration. **Water Resources Management**, v. 26, n. 14, p. 4281-4291, 2012.
- COOPS, N. C.; BLACK, T. A.; JASSAL, R. P. S.; TROFYMOW, J. A. T.; MORGENSTERN, K. Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modeled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, n. 3, p. 385-401, 2007.
- CULF, A. D.; FISCH, G.; HODNETT, M. G. The albedo of Amazonian forest and ranchland. **Journal of Climate**, v. 8, n. 6, p. 1544-1554, 1995.
- DAVIDSON, E. A.; ARAÚJO, A. C.; ARTAXO NETTO, P. E.; BALCH, J. K.; BROWN, I. F.; BUSTAMANTE, M. M.; COE, M. T.; DEFRIES, R. S.; KELLER, M.; LONGO, M.; MUNGER, J. W.; SCHROEDER, W.; SOARES-FILHO, B. S.; SOUZA, C. M.; WOFSY, S. C. **The Amazon basin in transition**. *Nature*, v. 481, n. 7381, p. 321-328, 2012.
- DEFRIES, R. S.; FIELD, C. B.; FUNG, I.; JUSTICE, C. O.; LOS, S.; MATSON, P. A.; MATTHEWS, E.; MOONEY, H. A.; POTTER, C. S.; PRENTICE, K.; SELLERS, P. J.; TOWNSHEND, J. R. G.; TUCKER, C. J.; USTIN, S. L.; VITOUSEK, V. M. Mapping the land surface for global atmosphere-biosphere models: toward continuous distributions of vegetation's functional properties. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 20867-20882, 1995.
- DELOGU, E.; BOULET, G.; OLIOSO, A.; COUDERT, B.; CHIROUZE, J.; CESCHIA, E.; LEDANTEC, V.; MARLOIE, O.; CHEHBOUNI, G.; LAGOUARDE, J. P. Reconstruction of temporal variations of evapotranspiration using instantaneous estimates at the time of satellite overpass. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, p. 2995-3010, 2012.
- DU, J.; SONG, K.; WANG, Z.; ZHANG, B.; LIU, D. Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. **Chinese Geographical Science**, v. 23, n. 1, p. 73-91, 2013.
- ELHAG, M.; PSILOVIKOS, A.; MANAKOS, I.; PERAKIS, K. Application of the SEBS water balance model in estimating daily evapotranspiration and evaporative fraction from remote sensing data over the Nile delta. **Water Resources Management**, v. 25, p. 2731-2742, 2011.
- EL-MASRI, B.; JAIN, A. K.; BARMAN, R.; MEIYAPPAN, P.; SONG, Y.; LIANG, M. Carbon dynamics in the Amazonian basin: integration of eddy covariance and ecophysiological data with a land surface model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182-183, n. 15, p. 156-167, 2013.
- FAN, L.; LIU, S.; BERNHOFER, C.; LIU, H.; BERGER, F. H. Regional land surface energy fluxes by satellite remote sensing in the Upper Xilin River Watershed (Inner Mongolia, China). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 88, p. 231-245, 2007.
- FERREIRA, P.; SOUSA, A. M.; VITORINO, M. I.; SOUZA, E. B.; SOUZA, P. J. O. P. Estimate of evapotranspiration in the eastern Amazon using SEBAL. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 1, p. 33-39, 2013.
- FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTROM, C. M. Global net primary production combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 74-88, 1995.
- FRENCH, A. N.; HUNSAKER, D. J.; THORP, K. R. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. **Remote Sensing of Environment**, v. 158, p. 281-294, 2015.
- FRIEDL, M.A.; MCIVER, D.K.; HODGES, J.C.; ZHANG, X.Y.; MUCHONEY, D.; STRAHLER, A.H.; WOODCOCK, C.E.; GOPAL, S.; SCHNEIDER, A.; COOPER, A.; BACCINI, A. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1, p. 287-

302, 2002.

GALLEGO-ELVIRA, B.; OLIOSO, A.; MIRA, M.; REYES-CASTILLO, S.; BOULET, G.; MARLOIE, O.; GARRIGUES, S.; COURAULT, D.; WEISS, M.; CHAUVELON, P.; BOUTRON, O. EVASPA (EVapotranspiration Assessment from SPace) tool: an overview. *Procedia Environmental Sciences*, v. 19, p. 303-310, 2013.

GALLEGUILLLOS, M.; JACOB, F.; PRÉVOT, L.; LAGACHERIE, P.; LIANG, S. Spatializing vineyard hydric status within heterogeneous Mediterranean watershed from high spatial resolution optical remote sensing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 8, p. 168-172, 2011.

GAO, X.; HUETE, A. R.; NI, W.; MIURA, T. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment*, v. 74, n. 3, p. 609-620, 2000.

GARSTANG, M.; ULANSKI, S.; GRECO, S.; SCALA, J.; SWAP, R.; FITZJARRALD, D.; BROWELL E.; SHIPMAN, M.; CONNORS, V.; HARRIS, R.; TALBOT, R. The Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE 2B): a meteorological perspective. *Bulletin of American Meteorological Society*, v. 71, n. 1, p. 19-32, 1990.

GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A. Climatic effects of Amazonian deforestation: some results from ABRACOS. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 5, p. 823-830, 1997.

GHENT, D.; KADUK, J.; REMEDIOS, J.; BALZTER, H. Data assimilation into land surface models: the implications for climate feedbacks. *International Journal of Remote Sensing*, v. 32, p. 617-632, 2011.

GILABERT, M. A.; MORENO, A.; MASELLI, F.; MARTÍNEZ, B.; CHIESI, M.; SÁNCHEZ-RUIZ, S.; SERRANO-ORTIZ, P.; CARRARA, A. Daily GPP estimates in Mediterranean ecosystems by combining remote sensing and meteorological data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 102, p. 184-197, 2015.

GLOOR, M.; GATTI, L.; BRIENEN, R. J. W.;

FELDPAUSCH, T.; PHILLIPS, O.; MILLER, J.; OMETTO, J. P.; ROCHA, H. R.; BAKER, T.; HOUGHTON, R.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L.; GUYOT, J. L.; ZHAO, K.; JACKSON, R.; PEYLIN, P.; SITCH, S.; POULTER, B.; LOMAS, M.; ZAEHLE, S.; HUNTINGFORD, C.; LLOYD, J. The carbon balance of South America: status, decadal trends and main determinants, *Biogeosciences*, v. 9, p. 5407-5430, 2012.

GONÇALVES, L. G. G.; BORAK, J. S.; COSTA, M. N.; SALESKA, S. R.; BAKER, I.; RESTREPO-COUBE, N.; MUZA, M. N. Overview of the large-scale biosphere atmosphere experiment in Amazônia Data Model Intercomparison Project (LBA DMIP). *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 182-183, n. 15, p. 111-127, 2013.

GOWDA, P. H.; CHAVEZ, J. L.; COLAIZZI, P. D.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; TOLK, J. A. ET mapping for agricultural water management: Present status and challenges. *Irrigation Science*, v. 26, n. 3, p. 223-237, 2008.

HEINSCH, F.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W.; KIMBALL, J. S.; NEMANI, R. R.; DAVIS, K. J.; BOLSTAD, P. V.; COOK, B. D.; DESAI, A. R.; RICCIUTO, D. M.; LAW, B. E.; OECHEL, W. C.; KWON, H.; LUO, H.; WOFSY, S. C.; DUNN, A. L.; MUNGER, J. W.; BALDOCCHI, D. D.; XU, L.; HOLLINGER, D. Y.; RICHARDSON, A. D.; STOY, P. C.; SIQUEIRA, M. B. S.; MONSON, R. K.; BURNS, S. P.; FLANAGAN, L. B. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 44, p. 1908-1925, 2006.

HEMAKUMARA, H. M.; CHANDRAPALA, L.; MOENE, A. F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. *Agricultural water management*, v. 58, n. 2, p. 109-122, 2003.

HOUBORG, R.; SOEGAARD, H.; EMMERICH, W.; MORAN, S. Inferences of all sky solar irradiance using Terra and Aqua MODIS satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 28, n. 20, p. 4509-4535, 2007.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.;



- VANLEEUEWEN, W. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440-451, 1997.
- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.
- HUTYRA, L. R.; MUNGER, J. W.; SALESKA, S. R.; GOTTLIEB, E.; DAUBE, B. C.; DUNN, A. L.; AMARAL, D. F.; CAMARGO, P.; WODSY, S. C. Seasonal controls on the exchange of carbon and water in an Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, p. 1-16, 2007.
- JIA, L.; XI, G.; LIU, S.; HUANG, C.; YAN, Y.; LIU, G. Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, p. 1775-1787, 2009.
- JIANG, X.; RAUSCHER, S.; RINGLER, T.; LAWRENCE, D.; WILLIAMS, A.; ALLEN, C.; STEINER, A.; CAI, D.; MCDOWELL, N. Projected future changes in vegetation in western North America in the twenty-first century. **Journal of Climate**, v. 26, p. 3672-3687, 2013.
- JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 3-15, 2002.
- KIMURA, R. L. B.; FAN, J.; TAKAYAMA, N.; HINOKIDANI, O. Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. **Journal of Arid Environments**, v. 68, n. 1, p. 53-65, 2007.
- KJAERGAARD J.; ALLEN, R. G.; IRMAK A. Improved methods for estimating monthly and growing season ET using METRIC applied to moderate resolution satellite imagery. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 26, p. 4028-4036, 2011.
- LAZARIM, C. G. **Estimativa da evapotranspiração e temperatura da superfície através de imagens do satélite AVHRR/NOAA**, destinada ao monitoramento agrometeorológico. 2013. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- LEIGH E. G. Tropical forest ecology: a review from Barro Colorado Island. New York, **Oxford University Press**, 1999. 264p.
- LEITÃO, M. M. V. B. R.; SANTOS, J. M.; OLIVEIRA, G. M. Estimativa de albedo em três ecossistemas da Floresta Amazônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 256-261, 2002.
- LI, Z. L.; STOLL, M. P.; ZHANG, R.; JIA, L.; SU, Z. On the separate retrieval of soil and vegetation temperatures from ATSR data. **Science in China Series E**, v. 30, p. 27-38, 2000.
- LI, Z. L.; TANG, R.; WAN, Z.; BI, Y.; ZHOU, C.; TANG, B.; YAN, G.; ZHANG, X. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. **Sensors**, v. 9, n. 5, p. 3801-3853, 2009.
- LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p. 213-238, 2001.
- LIBERATO, A. M.; SILVA, B. B.; CARDOSO, F. L. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na estimativa do saldo de radiação em Rondônia. **Pesquisa e Criação**, v. 10, n. 2, p. 153-164, 2011.
- LIU, J.; SUN, O. J.; JIN, H.; ZHOU, Z.; HAN X. Application of two remote sensing GPP algorithms at a semiarid grassland site of North China. **Journal of Plant Ecology**, v. 4, n. 4, p. 302-312, 2011.
- MA, W.; HAFEEZ, M.; ISHIKAWA, H.; MA, Y. Evaluation of SEBS for estimation of actual evapotranspiration using ASTER satellite data for irrigation areas of Australia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 112, n. 3-4, p. 609-616, 2013.
- MALHI, Y.; PEGORARO, E.; NOBRE, A. D.; PEREIRA, M. G. P.; GRACE, J.; CULF, A. D.; CLEMENT, R. Energy and water dynamics of

- a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 1-17, 2002.
- MARTÍNEZ, B.; GILABERT, M. A. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 1823-1842, 2009.
- MCCALLUM, I.; WAGNER, W.; SCHMULLIUS, C. Satellite-based terrestrial production efficiency modelling. **Carbon and Management**, v. 4, p. 1-14, 2009.
- MCCREE, K. J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. **Agricultural Meteorology**, v. 10, p. 442-453, 1972.
- MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground. Trudy Geofizicheskogo Instituta, **Akademiya Nauk SSSR**, v. 24, p. 163-187, 1954.
- MONTEITH, J. L. **Evaporation and environment. Symposium of the Society of Experimental Biology**, v. 19, p. 205-224, 1965.
- MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, p. 747-766, 1972.
- MORAN, M.; CLARKE, T.; INOUE, Y.; VIDAL, A.; Estimating crop water deficit using relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, p. 246-263, 1994.
- 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.
- MYNENI R. B.; WILLIAMS D. L. On the relationship between fAPAR and NDVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, p. 200-211, 1994.
- NAYAK, R. K.; PATEL, N. R.; DADHWAL, V. K. Estimation and analysis of terrestrial net primary productivity over India by remote sensing driven terrestrial biosphere model. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 170, p. 195-213, 2009.
- NEGRÓN-JUÁREZ, R. I.; GOULDEN, M. L.; MYNENI, R. B.; FU, R.; BERNARDES, S.; GAO, H. An empirical approach to retrieve monthly evapotranspiration over Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, p. 7045-7063, 2008.
- OKE, T. R. Boundary layer climates. New York, Methuen & Co. Ltd, 1987. 435 p.
- OLIVEIRA, G.; MORAES, E. C. Validação do balanço de radiação obtido a partir de dados MODIS/TERRA na Amazônia com medidas de superfície do LBA. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 3, p. 353-364, 2013.
- OUAIDRARI, H.; GOWART, S. N.; CZAJKOWSKI, K. P.; SOBRINO, J. A.; VERMOTE, E. **Land surface temperature estimation from AVHRR thermal infrared measurements: an Assessment for the AVHRR Land Pathfinder II Data Set. Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 114-128, 2002.
- PAIVA, C. M.; FRANÇA, G. B.; LIU, W. T. H.; ROTUNNO FILHO, O. C. A comparison of experimental energy balance components data and SEBAL model results in Dourados, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 6, p. 1731-1745, 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.
- POTTER, C. S.; RANDERSON, J. T.; FIELD, C. B.; MATSON, P. A.; VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H. A. Terrestrial ecosystem production: a process model-based on global satellite and surface data. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 7, p. 811-841, 1993.
- POTTER, C. S.; KLOOSTER, S. A.; BROOKS, V. Interannual variability in terrestrial net primary production: exploration of trends and controls on regional to global scales. **Ecosystems**, v. 2, p. 36-48, 1999.
- POTTER, C. S.; KLOOSTER, S.; HUETE, A.; GENOVESE, V.; BUSTAMANTE, M.; FERREIRA, L. G.; OLIVEIRA, R.; ZEPP, R. Terrestrial carbon sinks in the Brazilian Amazon and Cerrado region predicted from MODIS satellite data and ecosystem modeling.

- Biogeosciences Discussions**, v. 6, p. 947-969, 2009.
- QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; MARIANO, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 42-49, 2006.
- RAHMAN, A. F.; SIMS, D. A.; CORDOVA, V. D.; EL-MASRI, B. Z. Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 19, p. 1-4, 2005.
- RASCHKE, E.; PREUSS, H. J. The determination of the solar radiation budget at the earth's surface from satellite measurements. **Meteorologic Rundschau**, v. 32, n. 1, p. 18-28, 1979.
- ROCHA, H. R.; GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D.; MENTON, M. C.; PINTO, L. D. V. O.; FREITAS, H. C.; SILVA FIGUEIRA, A. M. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. 522-532, 2004.
- ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance. **Physics and Chemistry of the Earth Part B**, v. 25, p. 147-157, 2000.
- 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.; PAZ, A. R.; ARAGAO, L. E. O. C.; COLLISCHONN, W.; MU, Q.; MALHI, Y. S.; ROCHA, H. R. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 8, p. 1-19, 2013.
- RUNNING S. W.; NEMANI, R. R.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M. S.; REEVES, M.; HASHIMOTO, H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. **Bioscience**, v. 54, p. 547-560, 2004.
- RYU, Y.; BALDOCCHI, D. D.; KOBAYASHI, H.; VAN INGEN, C.; LI, J.; BLACK, T. A.; BERINGER, J.; VAN GORSEL, E.; KNOHL, A.; LAW, B. E.; ROUPSARD, O. Integration of MODIS land and atmosphere products with a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 25, n. 4, p. 1-24, 2011.
- SAKAI, R. K.; FITZJARRALD, D. R.; MORAES, O. L. L.; STAEBLER, R. M.; ACEVEDO, O. C.; CZIKOWSKY, M. J.; SILVA, R.; BRAIT, E.; MIRANDA, V. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. **Global Change Biology**, v. 10, p. 895-907, 2004.
- SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. B. Obtenção dos fluxos de energia à superfície utilizando o algoritmo S-SEBI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 365-374, 2010.
- SANTOS, C. A. C.; NASCIMENTO, R. L.; RAO, T. V. R.; MANZI, A. O. Net radiation estimation under pasture and forest in Rondônia, Brazil, with TM Landsat 5 images. **Atmosfera**, v. 24, n. 4, p. 435-446, 2011.
- SCHAAF, C.; GAO, F.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; LI, X.; TSUNG, T.; STRUGNELL, N.; ZHANG, X.; JIN, Y.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNSLEY, M.; HOBSON, P.; DISNEY, M.; ROBERTS, G.; DUNDERDALE, M.; DOLL, C.; D'ENTREMONT, R.; HU, B.; LIANG, S.; PREVITTE, J.; ROY, D. First operational BRDF, albedo and nadir reflectance products from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 135-148, 2002.
- SCHUURMANS, J. M.; VAN GEER, F. C.; BIERKENS, M. F. P. Remotely sensed latent heat fluxes for model error diagnosis: a case study. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 759-769, 2011.
- SENAY, G. B.; BUDDE, M.; VERDIN, J. P.; MELESSE, A. M. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors**, v. 7, n. 2, p. 979-1000, 2007.
- SHOKO, C.; DUBE, T.; SIBANDA, M.; ADELABU, S. Applying the Surface Energy Balance System (SEBS) remote sensing model to estimate spatial variations in evapotranspiration

- in Southern Zimbabwe. **Transactions of the Royal Society of South Africa**, v. 70, n. 1, p. 47-55, 2015.
- SHUTTLEWORTH, W. J.; GASH, J. H. B.; LLOYD, C. R.; MOORE, C. J.; ROBERTS, J.; MOLION, L. C. B.; NOBRE, C. A.; SÁ, L. D. A.; MARQUES FILHO, A. D.; FISH, G.; FATTORI, A. P.; RIBEIRO, M. N. G.; CABRAL, O. M. R. Amazonian evaporation. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, n. 1, p. 179-191, 1987.
- SILVA, F. B. Modelagem da produtividade primária bruta na Amazônia. 2013. 151 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.
- SIMS, D. A.; LUO, H.; HASTINGS, S.; OECHEL, W. C.; RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A. Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 3, p. 289-303, 2006.
- SOBRINO, J. A.; GOMEZ, M.; JIMENEZ-MUNOZ, J. C.; OLIOSO, A.; CHEHBOUNI, G. A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: application to the DAISEX Campaigns. **Journal of Hydrology**, v. 315, p. 117-125, 2005.
- SOBRINO, J. A.; GOMEZ, M.; JIMENEZ-MUNOZ, J. C.; OLIOSO, A. Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula. **Remote Sensing of Environment**, v. 110, p. 139-148, 2007.
- STARK, S. C., BRESHEARS, D. D., GARCIA, E. S., LAW, D. J., MINOR, D. M., SALESKA, S. R., SWANN, A. L. S.; VILLEGAS, J. C.; ARAGAO, L. E. O. C.; BELLA, E. M.; BORMA, L. S.; COBB, N.; LITVAK, M. E.; MAGNUSSON, W. E.; MORTON, J.; REDMOND, M. D. Toward accounting for ecoclimate teleconnections: intra-and inter-continental consequences of altered energy balance after vegetation change. **Landscape Ecology**, v. 31, n. 1, p. 181-194, 2016.
- SU, Z.; PELGRUM, H.; MENENTI, M. Aggregation effects of surface heterogeneity in land surface processes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 3, p. 549-563, 1999.
- SU, Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, p. 85-99, 2002.
- SU, H.; MCCABE, M. F.; WOOD, E. F.; SU, Z.; PRUEGER, J. H. Modelling evapotranspiration during SMACEX: comparing two approaches for local- and regional-scale prediction. **Journal of Hydrometeorology**, v. 6, p. 910-922, 2005.
- SUN, Z.; WANG, Q.; OUYANG, Z.; WATANABE, M.; MATSUSHITA, B.; FUKUSHIMA, T. Evaluation of MOD16 algorithm using MODIS and ground observational data in winter wheat field in North China Plain. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 9, p. 1196-1206, 2007.
- SWANN, A. L.; FUNG, I. Y.; CHIANG, J. C. Mid-latitude afforestation shifts general circulation and tropical precipitation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 3, p. 712-716, 2012.
- TAKAGI, K.; MIYATA, A.; HARAZONO, Y.; OTA, N.; KOMINE, M.; YOSHIMOTO, M. An alternative approach to determining zero-plane displacement, and its application to a lotus paddy field. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, n. 3-4, p. 173-181, 2003.
- TAN, K. P.; KANNIAH, K. D.; CRACKNELL, A. P. A review of remote sensing based productivity models and their suitability for studying oil palm productivity in tropical regions. **Progress in Physical Geography**, v. 36, n. 5, p. 655-679, 2012.
- TANG, R. L.; LI, Z. L.; TANG, B. H. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: implementation and validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 540-551, 2010.
- TANG, R.; LI, Z. L.; CHEN, K. S.; JIA, Y.; LI, C.; SUN, X. Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 174-175, p. 28-42, 2013.
- TANG, R.; SHAO, K.; LI, Z. L.; WU, H.; TANG, B. H.; ZHOU, G.; ZHANG, L.

- Multiscale validation of the 8-day MOD16 evapotranspiration product using flux data collected in China. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 4, p. 1478-1486, 2015.
- TANGUY, M.; BAILLE, A.; GONZALEZ-REAL, M. M.; LLOYD, C.; CAPPELAERE, B.; KERGOAT, L.; COHARD, J. M. A new parameterisation scheme of ground heat flux for land surface flux retrieval from remote sensing information. **Journal of Hydrology**, v. 454-455, p. 113-122, 2012.
- TIMMERMANS, W.; KUSTAS, W. P.; ANDERSON, M. C.; FRENCH, A. N. An intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modeling schemes. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, p. 369-384, 2007.
- TURNER, D. P.; RITTS, W. D.; COHEN, W. B.; GOWER, S. T.; RUNNING, S. W.; ZHAO, M. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 102, p. 282-292, 2006.
- VAN DER TOL, C. Validation of remote sensing of bare soil ground heat flux. **Remote sensing of Environment**, v. 121, p. 275-286, 2012.
- VEROUSTRAETE, F.; PATYN, J.; MYNENI, R. B. Estimating net ecosystem exchange of carbon using the Normalised Difference Vegetation Index and an ecosystem model. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 115-130, 1996.
- VEROUSTRAETE, F.; SABBE, H.; HERMAN, E. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 376-399, 2002.
- VEROUSTRAETE, F.; SABBE, H.; RASSE, D. P.; BERTELS, L. Carbon mass fluxes of forests in Belgium determined with low resolution optical sensors. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, p. 769-792, 2004.
- VERSTRAETEN, W. W.; VEROUSTRAETE, F.; FEYEN, J. On temperature and water limitation on net ecosystem productivity: implementation in the C-Fix model. **Ecological Modeling**, v. 199, p. 4-22, 2006.
- VERSTRAETEN, W. W.; VEROUSTRAETE, F.; WAGNER, W.; VAN ROEY, T.; HEYNS, W.; VERBEIREN, S.; FEYEN, J. Remotely sensed soil moisture integration in an ecosystem carbon flux model. The spatial implication. **Climatic Change**, v. 103, n. 1-2, p. 117-136, 2010.
- VON RANDOW, C.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M. G.; GASH, J. H. C.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. J.; CARDOSO, F. L.; KABAT, P. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 5-26, 2004.
- WAN, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, Q.; LI, Z. L. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 1, 261-274, 2004.
- WANG, X.; MA, M.; LI, X.; SONG, Y.; TAN, J.; HUANG, G.; ZHANG, Z.; ZHAO, T.; FENG, J.; MA, Z.; WEI, W.; BAI, Y. Validation of MODIS-GPP product at 10 flux sites in northern China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 2, p. 587-599, 2013.
- WANG, S., PAN, M., MU, Q., SHI, X., MAO, J., BRÜMMER, C.; JASSAL, R. R.; KRISHNAN, P.; LI, J.; BLACK, A. T. Comparing Evapotranspiration from Eddy Covariance Measurements, Water Budgets, Remote Sensing, and Land Surface Models over Canada. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 4, p. 1540-1560, 2015.
- WU, W.; HALL, C. A. S.; SCATENA, F. N.; QUACKENBUSH, L. J. Spatial modelling of evapotranspiration in the Luquillo experimental forest of Puerto Rico using remotely-sensed data. **Journal of Hydrology**, v. 328, p. 733-752, 2006.
- WU, C. Y.; CHEN, J. M.; HUANG, N. Predicting gross primary production from the enhanced vegetation index and photosynthetically active radiation: Evaluation and calibration. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 3424-3435, 2011.
- XIAO, X. M.; HOLLINGER, D.; ABER, J.; GOLTZ, M.; DAVIDSON, E. A.; ZHANG, Q. Y. Satellite-based modeling of gross primary

- production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, v. 89, p. 519-534, 2004.
- XIAO, X. M.; ZHANG, Q. Y.; SALESKA, S.; HUTYRA, L.; CAMARGO, P.; WOFSY, S. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, v. 94, p. 105-122, 2005.
- YANG, Y.; SHANG, S.; JIANG, L. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 164, p. 112-122, 2012.
- YANG, Y.; SHANG, S.; GUAN, H.; JIANG, L. A novel algorithm to assess gross primary production for terrestrial ecosystems from MODIS imagery. *Journal of Geophysical Research*, v. 118, n. 2, p. 1-16, 2013a.
- YANG, J.; GONG, P.; FU, R.; ZHANG, M.; CHEN, J.; LIANG, S.; XU, B.; SHI, J.; DICKINSON, R. The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature Climate Change*, v. 3, p. 875-883, 2013b.
- YANG, J. Y.; MEI, X. R.; HUO, Z. G.; YAN, C. R.; HUI, J. U.; ZHAO, F. H.; QIN, L. I. U. Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 14, n. 10, p. 2065-2076, 2015.
- YU, D.; SHI, P.; SHAO, H. Modelling net primary productivity of terrestrial ecosystems in East Asia based on an improved CASA ecosystem model. *International Journal of Remote Sensing*, v. 30, p. 4851-4866, 2009.
- ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M. J.; TAPIA, A. P.; ALVARADO BARRIENTOS, M. S.; BOLSON, M. A.; LUIZÃO, F. J.; MANZI, A. O.; DOLMAN, A. J. Water balance, nutrient and carbon export from a heath forest catchment in central Amazonia, Brazil. *Hydrological Processes*, v. 29, n. 17, p. 3633-3648, 2015.
- ZERI, M.; SÁ, L.D.; MANZI, A.O.; ARAÚJO, A.C.; AGUIAR, R.G.; VON RANDOW, C.; SAMPAIO, G.; CARDOSO, F.L.; NOBRE, C.A. Variability of carbon and water fluxes following climate extremes over a tropical forest in southwestern Amazonia. *PloS one*, v. 9, n. 2, p. 88130, 2014.
- ZHAN, X.; SOHLBERG, R. A.; TOWNSHEND, J. R. G.; DIMICELI, C.; CARROLL, M. L.; EASTMAN, J. C.; HANSEN, M. C.; DEFRIES, R. S. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n. 1-2, p. 336-350, 2002.
- ZHANG, L. X.; ZHOU, D. C.; FAN, J. W.; HU, Z. M. Comparison of four light use efficiency models for estimating terrestrial gross primary production. *Ecological Modelling*, v. 300, p. 30-39, 2015.
- ZHAO, M.; HEINSCH, F.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, v. 95, p. 164-176, 2005.
- ZHAO, M.; RUNNING, S.; NEMANI, R. R. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, p. 1-13, 2006.