

## Estimativa da absorptância da radiação fotossinteticamente ativa de uma vegetação de transição floresta Amazônica-cerrado por três métodos

### Estimating the absorptance of the photosynthetically active radiation of an Amazon to "Cerrado" transitional vegetation by three methods

Maricéia Tatiana Vilani<sup>1</sup>, Luciana Sanches<sup>1</sup>, Marcos Heil Costa<sup>2</sup>, Denilton Carlos Gaio<sup>1</sup>, José de Souza Nogueira<sup>1</sup>

**Resumo:** Este trabalho avaliou a fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida ( $f_{APAR}$ ) por meio de observações de campo, modelagem e produto do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) em uma vegetação de transição Floresta Amazônica-Cerrado, no norte de Mato Grosso, Brasil, no período de 2001 a 2003. A  $f_{APAR}$  foi estimada por medições a partir de equipamentos micrometeorológicos instalados em uma torre, para observações de campo. Para modelagem utilizou-se o software *Integrated Biosphere Simulator* (IBIS) que simula os fluxos no sistema solo-vegetação-atmosfera, e por sensoriamento remoto o produto mensal da  $f_{APAR}$  do MODIS. Os valores médio trienais da  $f_{APAR}$  foram 0,92, 0,71 e 0,84, para observações de campo, modelagem e produto do MODIS, respectivamente. A análise de médias dos escores entre os três métodos aplicados para a estimativa da  $f_{APAR}$  detectou diferença altamente significativa entre eles. Os valores da  $f_{APAR}$  obtidos via modelagem pelo software (IBIS) foram inferiores aos demais métodos aplicados de estimativa. Concluiu-se que o melhor método foi o de estimativa por medições de campo.

**Palavras chaves:** radiação fotossinteticamente ativa, modelo, MODIS, IBIS

**Abstract:** In this study the absorptance of the photosynthetically active radiation ( $f_{APAR}$ ) was estimated based on field measurements, modeling and also from the product of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) in a Cerrado-Amazon Transitional Forest, Northern of Mato Grosso state, Brazil, for the period from 2001 to 2003. The  $f_{APAR}$  was estimated by micrometeorological instruments installed in a tower, over the vegetation. For modeling, the software Integrated Biosphere Simulator (IBIS) which simulates the fluxes in the soil-vegetation-atmosphere system, was used. For estimation by remote sensing, the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) was used in a monthly basis. The 3-year average values of  $f_{APAR}$  were 0.92, 0.71 and 0.84, for field measurements, modeling and remote sensing, respectively. The analysis of score averages among the methods, applied for the estimate of  $f_{APAR}$ , showed highly significant differences among them. Values obtained from modeling by the use of the software (IBIS) were smaller than the obtained by the other methods. Based on these results, we concluded that the best estimates were obtained by measurements in the field.

**Keywords:** photosynthetically active radiation, model, MODIS, IBIS software

### Introdução

A floresta Amazônica é uma região de grande diversidade de vegetação, incluindo ecossistemas de cerrado, pantanal, floresta tropical úmida e floresta de transição (Amazônia-Cerrado). As florestas de transição possuem importantes biomas a serem estudados principalmente no norte do Mato Grosso, região

que sofre constantemente ações antrópicas, que podem alterar sua composição e estrutura florestal e conseqüentemente alterar o clima regional.

Das variáveis micrometeorológicas, a radiação solar incidente é primordial, pois é um dos principais fatores que determina a distribuição espacial das espécies, dinâmica das florestas, produção de biomassa entre outros.

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente. Universidade Federal de Mato Grosso. Av. Fernando Corrêa da Costa, s/n, Bloco F, Sala 212. CEP 78960-900, Brasil. Telefone (+55) 65 3615 8739. E-mail: mariceia@cpd.ufmt.br

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal de Viçosa.

A quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel define a eficiência do uso da radiação por um ecossistema. As variáveis mais significativas na determinação da radiação fotossinteticamente ativa ( $f_{APAR}$ ) são a cobertura do solo, a área foliar, o ângulo de incidência da radiação solar, a proporção da radiação difusa no feixe de radiação e a refletância do solo (MYNENI & WILLIAMS, 1994; MARISCAL *et al.*, 2000; NOUVELLON *et al.*, 2000).

Técnicas de modelagem são uma ferramenta importante para o entendimento do sistema climático, assim como de variáveis como  $f_{APAR}$ , complementando as técnicas observacionais. Modelos acoplados que estudam a interação atmosfera-biosfera estão se tornando cada vez mais sofisticados, incorporando a circulação da atmosfera e o funcionamento dos ecossistemas terrestres, incluindo seus processos biofísicos e biogeoquímicos (COSTA & FOLEY, 2000). Como desvantagem, estes modelos exigem grandes quantidades de dados de entrada e parâmetros para a sua operação, e esses dados são coletados por pesquisas de campo, ou via sensoriamento remoto. O modelo Integrado de Simulação da Biosfera – IBIS (FOLEY *et al.*, 1996), um modelo dinâmico da vegetação global, compreende diversos processos, incluindo as interações entre a superfície e a atmosfera, ciclos de carbono e nutrientes e dinâmica da vegetação (FOLEY *et al.*, 1996; KUCHARIK *et al.*, 2000). Os processos do IBIS estão organizados hierarquicamente e operam em diferentes intervalos de integração, variando de 60 minutos a 1 ano, permitindo um acoplamento de processos ecológicos, biofísicos e fisiológicos que ocorrem em escalas de tempo distintas (KUCHARIK *et al.*, 2000).

O MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um sensor a bordo do satélite Terra, lançado em dezembro de 1999. O MODIS fornece estimativas de cobertura do solo, o índice de área foliar LAI (*Leaf Area Index*), a  $f_{APAR}$ , a produtividade primária bruta GPP (*Gross Primary Productivity*) e a produtividade primária líquida NPP (*Net Primary Production*), o que o torna extremamente conveniente para ser usado em conjunto com modelos de simulação de ecossistemas.

A estimativa da  $f_{APAR}$  permite propor e projetar um índice da vegetação descritor do estado do sistema em estudo. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo estimar a  $f_{APAR}$  por meio de observações de campo, modelagem e produto do MODIS, em uma floresta de transição Amazônica-Cerrado, comparando as metodologias de estimativa, com dados dos anos de 2001, 2002 e 2003.

## Material e Métodos

### Área de Estudo

A área em estudo está situada na Fazenda Maracaí, localizada a aproximadamente 50 km NE de Sinop, Mato Grosso, Brasil (lat.: 11°24,75' S; long.: 55°19,50' O), a 423 m acima do nível do mar. Esta área é constituída por uma floresta tropical de transição, que ocupa o ecótono entre a floresta Amazônica e o Cerrado. A vegetação é constituída por espécies arbóreas cuja altura média varia de 28-30 m. As principais espécies identificadas no local são *Tovomita sp.*, *Brosimum sp.*, *Qualea sp.*, *Vochysia sp.*, *Ocotea spixiana*, *Dinizia Excelsa*, *Quina pteridophilla*, *Mezilaurus itauba* (VOURLITIS *et al.*, 2001; VOURLITIS *et al.*, 2002, PRIANTE FILHO *et al.*, 2004).

### Instrumentação

Na torre micrometeorológica (altura: 42 m) para as medidas da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), usou-se 3 sensores (LI-190SB, LI-COR) instalados com a face sensível apontada para cima, nas alturas de 42m (PAR<sub>42</sub>), 20m (PAR<sub>20</sub>) e 1m (PAR<sub>1</sub>), sendo este último correspondente a PAR da superfície, sendo que tais sensores registraram os valores parciais de PAR incidente filtrados pela ação do dossel.

Um quarto sensor a 42m (PAR<sub>r</sub>), estava disposto com sua face sensível apontada para baixo medindo a Radiação Fotossinteticamente Ativa Refletida (PAR<sub>r</sub>). As medidas de temperatura e umidade do ar foram realizadas por um conjunto sensor HMP-35 (Vaisala, Inc., Helsinki, Finland), a radiação solar global por um piranômetro LI-200SA (Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA), o saldo de radiação por um saldo-radiômetro (Q\*7.1, REBS, Inc, Seattle, WA, USA), a velocidade do vento por um anemômetro (R3, Gill-Solent, Hampshire, UK) e os dados de precipitação foram fornecidos pela

estação meteorológica da Fazenda Continental, localizada a aproximadamente 17 km do local do experimento, que utiliza um pluviômetro fixável (Modelo 260-2530, NovaLynx Corporation, USA), instalado em área de manejo florestal, com medições diárias. Os dados micrometeorológicos obtidos na torre foram armazenados por um sistema de aquisição de dados, em datalogger (CRX-10, Campbell Scientific, Inc, Logan, UT, USA), com leituras das medidas a cada 30 segundos e armazenadas as médias a cada 30 minutos.

Neste trabalho considerou-se três meses de estação seca (junho-agosto), três meses de estação úmida (dezembro-fevereiro) e três meses de transição seca-úmida (setembro-novembro)

e 3 meses de transição úmida-seca (março-maio), segundo classificação adotada por PRIANTE FILHO *et al.* (2004).

A média de precipitação para a bacia Amazônica é de 5,9 mm dia<sup>-1</sup> (MARENGO, 2004), ou cerca de 2154 mm ano<sup>-1</sup>. A precipitação anual apresenta uma sazonalidade característica com maiores precipitações nos meses de dezembro a fevereiro (Tabela 1). Considerando os dados da Fazenda Continental, tem-se que a média de precipitação anual de 2001 a 2003 foi de 2171 mm. A precipitação na estação úmida, nos anos 2001-2003, representou aproximadamente 50% da precipitação total anual (VILANI *et al.*, 2006). Na estação seca praticamente não houve precipitação (Tabela 2).

**Tabela 1.** Precipitação mensal nos anos de 2001 a 2003, média dos anos 2001 a 2003 (dados observados na Fazenda Continental, a 17 Km do sítio experimental) e dados de precipitação de 2002 do sítio experimental segundo Priante Filho *et al.* (2004).

Mês	2001*	2002*	2003*	Média 2001-2003*	2002 <sup>#</sup>
Jan	366	388	600	451	360
Fev	165	334	271	257	407
Mar	255	326	382	321	255
Abr	0	23	276	100	116
Mai	0	0	70	23	5
Jun	0	0	0	0	0
Jul	0	0	0	0	18
Ago	5	0	0	2	0
Set	177	62	25	88	13
Out	189	172	273	211	54
Nov	365	218	383	322	183
Dez	484	338	365	396	235
Total	2006	1861	2645	2171	1646

\* Dados da Fazenda Continental, <sup>#</sup> Dados obtidos e/ou estimados por Priante Filho *et al.* (2004)

**Tabela 2.** Média estacional da precipitação acumulada nos anos de 2001 a 2003 (dados observados na Fazenda Continental, a 17 km do sítio experimental) (VILANI *et al.*, 2006)

Estação	Precipitação (mm)
Úmida	1103,7
Úmida-seca	444,0
Seca	1,7
Seca-úmida	621,3
Total	2170,7

O clima das regiões de floresta tropical úmida exibe claramente uma variação considerável nos padrões de precipitação concordante com o mencionado por MALHI *et al.* (2004), em que a média de precipitação da floresta tropical tem um valor anual de 2180 mm, uma estação seca de 3 a 4 meses, correspondendo a uma temperatura média anual de 25,2°C com uma variação sazonal de 3,2°C.

#### Estimativa da Transmitância, Refletância e $f_{APAR}$

Estimou-se a transmitância ( $t$ ) com dados de medições de campo, entre as alturas de 42m e 1m ( $t_{topo-1}$ ) e a transmitância entre as alturas 42m e 20 m ( $t_{topo-20}$ ). A transmitância  $t_{topo-1}$  foi estimada pela equação,  $t_{topo-1} = \frac{PAR_1}{PAR_{42}}$  e a  $t_{topo-20}$  foi estimada por

$$t_{topo-20} = \frac{PAR_{20}}{PAR_{42}}. \text{ A refletância (r) foi estimada com}$$

dados de observação de campo, por  $r = \frac{PAR_r}{PAR_{42}}$ . Para

estimar a  $f_{APAR}$  por medições de campo, utilizou-se  $f_{APAR} = 1-r-t$  (GOWER *et al.*, 1999).

Para a estimativa da  $f_{APAR}$  por meio de modelagem utilizou-se o software *Integrated Biosphere Simulator* (IBIS), com seis variáveis de entrada: velocidade do vento, temperatura do ar, precipitação, saldo de radiação, radiação infravermelha incidente e umidade relativa do ar.

Para a estimativa da  $f_{APAR}$  por meio do MODIS, foi utilizado o produto mensal do MODIS\_BU - coleção 4 (C 4.1), produzido e distribuído pela Universidade de Boston, disponível no endereço: <http://cybele.bu.edu/modisnisc/index.html>.

O período estudado foi de janeiro de 2001 a dezembro de 2003. A média mensal da  $f_{APAR}$  foi obtida através da média aritmética de 20 pontos da grade, com 1 km<sup>2</sup> cada célula, região que inclui a torre micrometeorológica, com monitoramento local do satélite MODIS às 10h30min. Dos mesmos pontos da grade também foram obtidos os valores de controle de qualidade (QA) que informa o tipo de algoritmo utilizado ou a inexistência de dados. Quanto mais próxima de (1) for o QA melhor é a qualidade da  $f_{APAR}$  estimada.

## Resultados e Discussões

### Resultados obtidos por medições de campo

A Tabela 3 apresenta a média mensal da transmitância entre as alturas de 42 e 1m ( $t_{topo-1}$ ), transmitância entre as alturas de 42 e 20m ( $t_{topo-20}$ ) e transmitância entre as alturas de 20 e 1m ( $t_{20-1}$ ) nos anos de 2001, 2002 e 2003.

Para o ano de 2001, o período de simulação foi de janeiro a junho, para 2002, agosto a outubro e 2003, janeiro a setembro.

**Tabela 3.** Média mensal da transmitância (%) entre as alturas de 42 e 1m ( $t_{topo-1}$ ), transmitância entre as alturas de 42 e 20 m ( $t_{topo-20}$ ) e transmitância entre as alturas de 20 e 1m ( $t_{20-1}$ ) nos anos de 2001, 2002 e 2003.

Meses	2001			2002			2003			
	$t_{topo-1}$ (%)	$t_{topo-1}$ (%)	$t_{topo-20}$ (%)	$t_{20-1}$ (%)	$t_{topo-1}$ (%)	$t_{topo-20}$ (%)	$t_{20-1}$ (%)	$t_{topo-1}$ (%)	$t_{topo-20}$ (%)	$t_{20-1}$ (%)
Janeiro	3,7	4,0	-	-	1,8	13,9	11,9			
Fevereiro	3,4	-	-	-	2,1	18,4	9,5			
Março	4,2	5,3	-	-	1,6	15,1	10,6			
Abril	2,6	-	-	-	4,4	12,8	14,7			
Maio	2,4	-	-	-	2,3	14,4	12,7			
Junho	4,1	3,1	-	-	1,4	22,1	4,4			
Julho	3,0	2,3	-	-	1,6	20,7	3,5			
Agosto	2,1	-	-	-	1,5	16,9	6,2			
Setembro	4,7	2,0	13,7	12,3	1,2	12,2	9,6			
Outubro	3,5	1,9	15,8	11,8	-	-	-			
Novembro	3,5	1,6	13,7	10,9	0,7	11,0	6,4			
Dezembro	3,9	1,7	11,3	11,2	0,7	5,2	10,5			
Total	3,4	2,7	14,4	11,6	1,7	14,8	9,1			

Para o ano de 2001, a  $t_{\text{topo-1}}$  atingiu o menor valor médio na estação seca, aumentando ao atingir a estação úmida. Para  $t_{\text{topo-20}}$  foi observado um valor máximo (22%) em junho de 2003 e valor mínimo (11%) em dezembro de 2002. A floresta de transição tem uma fisionomia florestal composta de árvores mais espaçadas, com estrato arbustivo pouco denso e caracterizado pelas fanerófitas rosuladas, e pelas lianas lenhosas, com árvores perenes, de pálio alto (28-30m, aproximadamente) e dossel fechado (VOURLITIS *et al.*, 2001), que apresenta uma sazonalidade característica na sua produção de serrapilheira, com maiores produções nas estações seca e transição da estação seca-úmida (SANCHES *et al.*, 2008). No mês de junho, com a maior presença de clareiras no dossel, houve uma maior passagem de radiação incidente em determinadas horas do dia. Para 2002 e 2003, a  $t_{\text{topo-1}}$  apresentou menores valores nos meses de outubro a dezembro, considerados como meses da estação seca-úmida e úmida. Um dos fatores que contribuem para o menor valor da transmitância é o ângulo de declinação solar, que na estação seca se apresenta com valores mais elevados (SPOLADOR *et al.*, 2006). Os menores valores da transmitância ocorrem geralmente nos maiores valores do ângulo solar zenital, porque quanto maior o ângulo zenital maior será o caminho percorrido pela radiação dentro do dossel, aumentando a chance de ocorrer uma absorção por folhas e galhos (SENNA *et al.*, 2005).

A  $t_{\text{topo-1}}$  apresentou oscilação nos valores médios com o ângulo zenital. Isto ocorreu devido à radiação, que ao penetrar no dossel, sofreu influência da arquitetura do mesmo, onde as falhas puderam contribuir para uma incidência direta da radiação sobre o sensor. À medida que ocorreu um aumento do ângulo zenital, a transmitância tendeu a diminuir. Em sua pesquisa realizada na floresta Nacional de Tapajós, SENNA *et al.* (2005) concluíram que para ângulos zenitais menores que  $5^\circ$  os valores da transmitância foram maiores que para os demais, pois permitem que maiores profundidades sejam atingidas pela luz no interior do dossel de uma floresta.

A média anual da refletância foi de  $4,1\% \pm 0,26\%$  no ano 2001,  $4,7\% \pm 0,3\%$  para 2002 e  $4,9\% \pm 0,24\%$  no ano de 2003. Os valores de

refletância são frequentemente pequenos na PAR e não variam significativamente entre dosséis florestais (GOWER *et al.*, 1999).

A refletância apresentou valores máximos de 4,6% e 5,4% em junho de 2001 e 2003, respectivamente, mês da estação seca e valor máximo de 5,2% em dezembro de 2002, mês da estação úmida. Possivelmente a diferença entre os valores da refletância de um ano para o outro seja consequência da perda de calibração dos sensores, assim como a alteração de precipitação anual. Senna *et al.* (2005) verificaram valores de refletância variando entre 2,7 a 3,3%. Os maiores valores de refletância obtidos na floresta de transição se deve ao fato de a floresta de transição ser mesmo densa que a investigada pelos autores.

A variação da refletância em função de intervalo do ângulo solar zenital foi o inverso da transmitância, ou seja, a refletância aumentou com o aumento do ângulo zenital.

A média trienal mensal da  $f_{\text{APAR}}$  apresentou pouca variação e com menor valor no mês de março  $92\% \pm 1,8\%$ , (estação úmida-seca), e maior valor no mês de agosto  $94\% \pm 0,1\%$ , (estação seca).

Em uma floresta Amazônica em Santarém, com vegetação tipicamente de uma floresta tropical úmida com altura média do dossel de 40m e com espécies emergentes alcançando 55m, SENNA *et al.* (2005) obtiveram valores médios mensais de  $f_{\text{APAR}}$  variando de 88,6% (agosto) a 93,5% (dezembro), com uma média de 91,4% para o período de julho de 2000 a julho de 2001. Observou-se que a  $f_{\text{APAR}}$  apresentou pequenas variações entre seus valores médios mensais obtidos na floresta de transição em estudo, com relação a variação dos valores médios mensais apresentados por SENNA *et al.* (2005). Ao analisar a correlação entre a  $f_{\text{APAR}}$  com a  $t_{\text{topo-1}}$  e a correlação entre a  $f_{\text{APAR}}$  e a refletância, observou-se uma forte correlação linear com a transmitância ( $r = 89\%$ ), e com a refletância uma correlação extremamente fraca ( $r = 17\%$ ), mostrando com isto que a  $f_{\text{APAR}}$  é mais dependente da transmitância.

A estimativa da  $f_{\text{APAR}}$  por observações de campo considera a PAR absorvida por folhas e galhos. Pode-se corrigir as medidas de campo com um fator que considera a  $f_{\text{APAR}}$  das folhas, dado por  $FC = 0,951 \left( \left( e^{(-0,5)(LAI + SAI)} \right) / e^{(-0,5)(LAI)} \right)$ , em que LAI (*Leaf Area Index*) é o Índice de Área Foliar e SAI (*Stem Area Index*) é o Índice de Área de Galhos. Foi desconsiderado a variação sazonal dos mesmos, e assumiu-se  $LAI = 4 \text{ m}^2$  e  $SAI = 0,1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ .

A Tabela 4 apresenta os valores das médias estacionais dos anos de 2001 a 2003 da  $f_{APAR}$ , sem fator de correção (SFC) e com fator de correção (CFC). Verifica-se que os maiores valores foram na estação seca e seca-úmida, possivelmente devido a menor nebulosidade que ocorre nestas estações com relação às estações úmida e úmida-seca. NOUVELLON *et al.* (2000) estudaram o efeito da nebulosidade na absorção da PAR para uma cobertura gramada no México, e concluíram que para ângulos zenitais pequenos a  $f_{APAR}$  difusa foi maior que a direta e para ângulos zenitais grandes ocorreu o inverso. Entretanto, para altos valores da LAI a  $f_{APAR}$  de dias nublados pode ser levemente menor que para os dias claros.

#### $f_{APAR}$ obtida por Modelagem

A média mensal da  $f_{APAR}$  simulada foi de 71,4%  $\pm$  1,8%, para 2001, 70,9%  $\pm$  1,1%, 70,7%  $\pm$  1,0%, para 2002 e 2003, respectivamente, valores próximos da simulação realizada para uma floresta Amazônica em Santarém simulada pelo IBIS, no ano de 2001, que variou ligeiramente entre 75,5% e 76,3% (SENNA *et al.*, 2005) e distintos com a simulação da  $f_{APAR}$  sobre a Amazônia usando o *Common Land Model* (CLM) a qual variou entre 80% e 85% no ano de 2001, considerando apenas o valor médio das 10h30min (TIAN *et al.*, 2004).

#### $f_{APAR}$ obtida pelo Produto MODIS

Os valores de  $f_{APAR}$  mensal estimada pelo produto do MODIS para os anos de 2001, 2002 e 2003 estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 4.** Médias estacionais, com os respectivos desvios-padrão, de 2001 a 2003 da fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa ( $f_{APAR}$ ), sem fator de correção (SFC) e com fator de correção (CFC).

Estação	$f_{APAR}$ (SFC) (%)	$f_{APAR}$ (CFC) (%)
Úmida	92,8 $\pm$ 0,7	89,9 $\pm$ 3,9
Úmida-seca	91,9 $\pm$ 3,2	89,8 $\pm$ 4,8
Seca	92,9 $\pm$ 0,5	90,4 $\pm$ 3,3
Seca-úmida	93,0 $\pm$ 0,9	90,2 $\pm$ 3,6

**Tabela 5.** Médias mensais da  $f_{APAR}$  e Controle de Qualidade (QA), estimada pelo produto MODIS, de 2001, 2002 e 2003.

Meses	2001		2002		2003	
	$f_{APAR}$ (%)	QA	$f_{APAR}$ (%)	QA	$f_{APAR}$ (%)	QA
Janeiro	77	4	82	4	83	5
Fevereiro	82	4	83	3	80	5
Março	82	4	85	5	84	5
Abril	82	2	80	3	78	3
Mai	82	4	82	3	74	4
Junho	80	4	83	5	86	4
Julho	86	3	86	5	86	3
Agosto	88	2	84	5	85	4
Setembro	85	5	84	4	82	5
Outubro	84	5	79	5	82	4
Novembro	82	5	84	6	84	5
Dezembro	75	3	84	4	81	5
Média anual	82	-	83	-	82	-

Pela codificação do controle de qualidade (QA), pode-se observar que 67 % dos dados foram de nível de qualidade baixa. Os meses com menor confiabilidade para os anos de 2001, 2002 e 2003 (Tabela 3), foram os que possuem as maiores taxas de precipitação na área de estudo, em que a estimativa está mais contaminada pela presença de nebulosidade.

TIAN *et al.* (2004) estudaram a variação sazonal da  $f_{APAR}$  estimada pelo produto do MODIS sobre a Amazônia para o ano de 2001, obtendo um valor médio aproximado de 85%, com uma forte contaminação dos dados.

#### Comparação entre Estimativas da $f_{APAR}$ Baseadas em Medições de Campo, Modelagem e Produto do MODIS

A Tabela 6 apresenta a média anual da  $f_{APAR}$  diária e a média anual no horário de 10h30min. Os maiores valores foram os estimados por medições de campo, seguidos pelas estimativas do produto do MODIS. Os valores de  $f_{APAR}$  simulados por modelagem foram inferiores aos demais métodos aplicados.

A diferença das estimativas de  $f_{APAR}$  pode estar relacionada à vários fatores, tais como mudanças nas condições atmosféricas por aerossóis e presença de nuvens (SENNA *et al.*, 2005).

Nas medições de campo da  $f_{APAR}$  (CFC), tanto as médias anuais diárias como para o horário das 10h30min para os três anos, foram menores que as estimativas (SFC), onde os valores de  $f_{APAR}$  podem ser considerados mais perto dos valores do MODIS. No entanto, não se deve ignorar o fato de que as estimativas do MODIS são afetadas por condições atmosféricas.

Concordante com o presente trabalho, SENNA *et al.* (2005) e TIAN *et al.* (2004) encontraram valores menores da  $f_{APAR}$  para o método aplicado de modelagem. Para a média anual diária de 2001, SENNA *et al.* (2005) encontraram 91% para medições de campo e 76% para a modelagem (IBIS), na média anual das 10h30min, obteve 93%, 77% e 85%, para medições de campo, modelagem e MODIS, respectivamente. TIAN *et al.* (2004), também para o ano de 2001, na média anual das 10h30min encontraram 83% para a modelagem (CLM) e 85% para o produto do MODIS. Os valores médios anuais da  $f_{APAR}$  encontrados as 10h30min, em ambos os estudos, por SENNA *et al.* (2005) e TIAN *et al.* (2004) foram maiores do que as médias diárias.

A Tabela 7 apresenta as médias estacionais da  $f_{APAR}$  para cada método aplicado. Para as medições de campo (SFC e CFC), houve diferença da  $f_{APAR}$  nas estações. Na modelagem, os valores menores foram nas estações seca e seca-úmida, enquanto que para o MODIS, as médias foram menores nas estações úmida, úmida-seca.

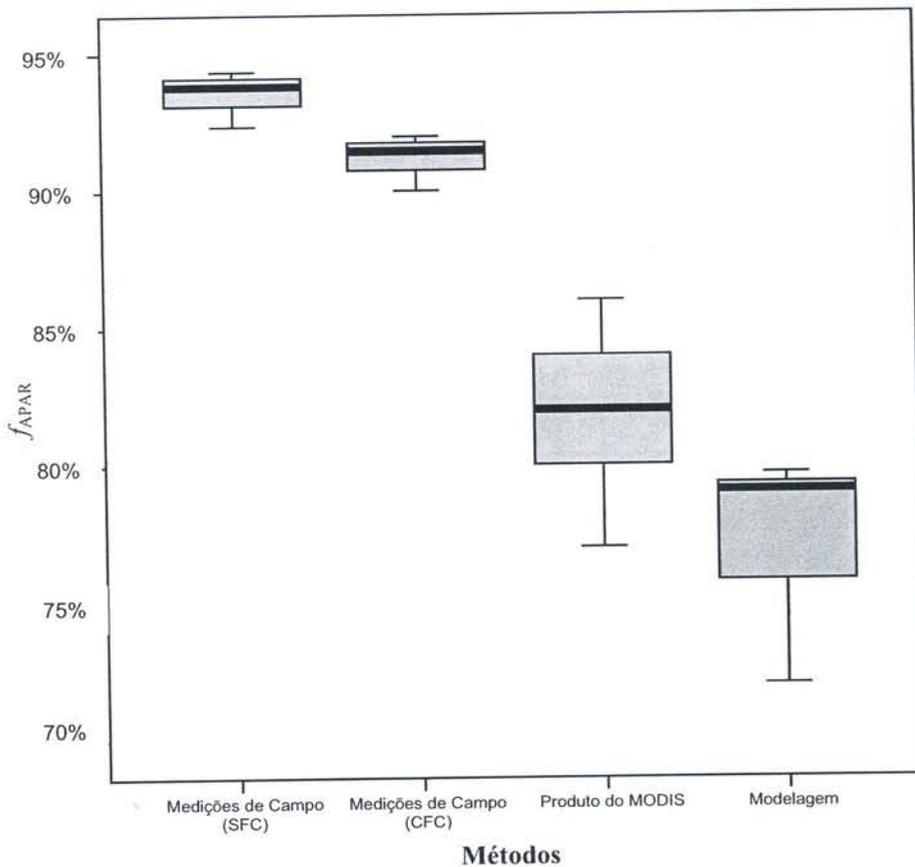
As estimativas da  $f_{APAR}$  por observações de campo apresentaram menor oscilação que nos demais métodos aplicados (Tabela 7 e Figura 1). Ao analisar os três métodos de estimativa da  $f_{APAR}$ , observou-se que os conjuntos de valores foram não-paramétricos, e ao aplicar o teste de Kruskal-Wallis observou-se que a modelagem apresentou uma média de escores menor (14,10), seguida pelo produto do MODIS (36,50), observações de campo CFC (73,45) e por SFC (101,00), sendo detectada diferença altamente significativa entre as médias dos escores ( $\alpha < 0,01$ ).

**Tabela 6.** Médias anuais da  $f_{APAR}$  estimados com valores mensais diurnos e com valores mensais das 10h30min.

Ano	Método aplicado	$f_{APAR}$	
		Média Diária (%)	Média das 10h30min (%)
2001	Medições de Campo (SFC)	92,4 ± 0,7	93,2 ± 1,0
	Medições de Campo (CFC)	90,1 ± 3,7	90,9 ± 5,3
	Modelagem	71,4 ± 1,8	79,2 ± 0,2
	Produto do MODIS	-	82,1 ± 3,4
2002	Medições de Campo (SFC)	92,5 ± 4,9	92,2 ± 4,2
	Medições de Campo (CFC)	89,3 ± 5,7	90,5 ± 3,6
	Modelagem	71,2 ± 1,3	78,0 ± 2,5
	Produto do MODIS	-	83,0 ± 2,1
2003	Medições de Campo (SFC)	93,4 ± 0,9	93,6 ± 1,0
	Medições de Campo (CFC)	90,8 ± 2,3	91,2 ± 3,1
	Modelagem	70,7 ± 1,0	76,4 ± 3,0
	Produto do MODIS	-	82,1 ± 3,7

**Tabela 7.** Médias estacionais da  $f_{APAR}$  estimadas com valores mensais, diurnos para medições de Campo e Modelagem e das 10h30min para o Produto do MODIS.

Ano	Estação	$f_{APAR}$			
		Medições de Campo (SFC) (%)	Medições de Campo (CFC) (%)	Modelagem (%)	Produto do MODIS (%)
2001	Úmida	92,3	90,1	69,6	78,0
	Úmida-Seca	92,8	90,4	72,3	82,0
	Seca	92,5	89,9	72,5	85,0
	Seca-Úmida	92,2	90,2	-	84,0
2002	Úmida	92,4	89,1	71,2	83,0
	Úmida-Seca	90,3	88,7	-	82,3
	Seca	92,6	90,5	72,0	84,3
	Seca-Úmida	93,3	88,8	70,4	82,3
2003	Úmida	93,5	90,8	70,6	81,3
	Úmida-Seca	92,6	90,2	71,4	78,7
	Seca	93,4	90,8	70,0	85,7
	Seca-Úmida	94,2	91,5	70,3	82,7
Média total		92,3	90,1	71,1	82,4



**Figura 1.** Box-Plots de  $f_{APAR}$  estimada por medições de campo, produto do MODIS e modelagem as 10h30min. O gráfico apresenta para os três métodos uma distribuição assimétrica à esquerda, representado com 75% da estimativa da  $f_{APAR}$  entre o primeiro quartil e o limite inferior.

## Conclusões

Das análises dos resultados obtidos das estimativas da  $f_{APAR}$  em uma Floresta de Transição Cerrado-Amazônica com base nos três métodos, conclui-se que:

(a) Os valores médios trienais diurna da  $f_{APAR}$  foram de 92% (SFC), 90% (CFC) para medições de campo e 71% para modelagem, enquanto a média trienal das estimativas das 10h30min foram 93% (SFC), 91% (CFC) para medições de campo, 78% e 84%, para modelagem e sensoriamento remoto, respectivamente.

(b) Os valores da  $f_{APAR}$  obtidos via modelagem pelo software (IBIS) foram inferiores aos demais métodos aplicados de estimativa.

(c) Quanto aos métodos utilizados para a estimativa da  $f_{APAR}$ , pode-se afirmar que o melhor método foi a estimativa por medições de campo.

## Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e à Fazenda Maracaí. Luciana Sanches foi suportada pela CAPES (processo 0107/03-4).

## Referências Bibliográficas

ANHUF, D.; ROLLENBECK, R. Canopy structure of the Rio Surumoni rain forest (Venezuela) and its influence on microclimate. **Ecotropica**, Bonn, German, v. 7, p. 21-32, 2001.

COSTA, M.H.; FOLEY, J.A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on the climate of Amazonia. **Journal of Climate**, Boston, USA, v. 13, p. 18-34, 2000.

FOLEY, J.A. et al., A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, St. Louis, USA, v. 10, p. 603-628, 1996.

GOWER, S.T.; KUCHARIK, C.J.; NORMAN, J.M.; Direct and Indirect Stimulation of Leaf Area Index, *Fapar*, and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, St. Paul, USA, v. 70, p. 29-51, 1999.

HERNANDEZ, J.L.; PEDRO JUNIOR, M.J.; BARDIN, L. Variação estacional da radiação solar em ambiente externo e no interior de floresta semidecídua. **Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, Brasil, v. 28, n. 2, p. 167-172, 2004.

KUCHARIK, C.J. et al. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, St. Louis, USA, v. 14, p.795-825, 2000.

MALHI, Y.; WRIGHT, J. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **The Royal Society**, Londres, Inglaterra, v. 359, p. 311-329, 2004.

MARENGO, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**, Hamburg, Germany, v. 78, p. 79-96, 2004.

MARISCAL, M.J.; ORGAZA, F.; VILLALOBOS, F.J. Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, Netherlands, v. 100, p. 183-197, 2000.

MYNENI, R.B.; WILLIAMS, D.L. On the relationship between  $f_{APAR}$  and NDVI. **Remote Sensing of Environment**, St. Paul, USA, v. 49, p. 200-211, 1994.

NOUVELLON, Y.; BEGUE, A.; MORAN, M.S., et al. – PAR extinction in shortgrass ecosystems: effects of clumping, sky conditions and soil albedo. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, Netherlands, v. 105, p. 21-41, 2000.

PEREIRA, A.R. Radiation regime of tropical rain forest. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, Brasil, v. 5, n. 2, p. 1-8, 1997.

PRIANTE FILHO, N. et al. Comparison of the mass and energy exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon Basin during a seasonal transition. **Global Change Biology**, Illinois, USA, v. 10, p. 863-876, 2004.

SANCHES, L. et al. Seasonal and interannual litter dynamics of a tropical semi-deciduous forest of the southern Amazon Basin, Brazil. **Journal of Geophysical Research**, St. Louis, USA, (*no prelo*).

SENNA, M.C.A.; COSTA, M.H.; SHIMABUKURO, Y.E.; Fraction of photosynthetically active radiation absorbed by Amazon tropical forest: A comparison of field measurements, modeling, and remote sensing. **Journal of Geophysical Research**, St. Louis, USA, v. 110, G01008, doi: 10.1029/2004JG000005, 2005.

TIAN, Y. et al. Comparison of seasonal and spatial variations of LAI/FPAR from MODIS and common land model. **Journal of Geophysical**, St. Louis, USA, v. 109, n. D1, D0110310.1029/2003JD003777, 2004.

VILANI, M.T. et al. Sazonalidade da Radiação, Temperatura e Umidade em uma Floresta de Transição Amazônia Cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, Brasil, v.21, n. 3b, p. 331-343, 2006.

VOURLITIS, G.L. et al. Seasonal variations in the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a mature Amazonian transitional tropical forest (cerradão). **Functional Ecology**, Boston, USA, v. 15, p. 388-395, 2001.

VOURLITIS, G.L. et al. Seasonal variations in evapotranspiration of a transitional tropical Forest of Mato Grosso, Brasil. **Water Resources Research**, St. Louis, USA, v. 38, n. 6, p. 1-30, 2002.