

## Estimativas de índice de área foliar de uma pastagem por sensoriamento remoto no Pantanal Mato-grossense

### Estimates of leaf area index of a pasture by remote sensing in the Pantanal of Mato Grosso

Victor Hugo de Moraes Danelichen<sup>1</sup>, Maísa Caldas Souza Velasque<sup>2</sup>, Carlo Ralph de Musis<sup>3</sup>, Nadja Gomes Machado<sup>4</sup>, José de Souza Nogueira<sup>5</sup>, Marcelo Sacardi Biudes<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup>Doutorandos no Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Brasil

<sup>3</sup>Doutor, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade de Cuiabá (UNIC), Brasil

<sup>4</sup>Doutora, Laboratório de Biologia da Conservação, Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), Brasil

<sup>3,4,5,6</sup>Doutores, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Brasil

#### Resumo

O Pantanal é considerado a maior planície alagável do mundo, composto de 70% por Cerrado. Nas últimas décadas, devido ao avanço da agropecuária, grande parte deste bioma tem sido convertido em pastagens. O índice de área foliar (IAF) é uma importante medida da cobertura vegetal, pois, controla as trocas de massa e energia de uma superfície vegetada. Dessa forma o objetivo deste trabalho foi avaliar as estimativas de IAF de uma pastagem no norte do Pantanal Mato-Grossense pelo produto do MODIS (MOD15A2) e pelo modelo proposto por Allen et al. (2002) com medidas de IAF obtidas por meio da interceptação de luz e precipitação estimada pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). O estudo foi conduzido em uma pastagem de *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick localizada na Fazenda Experimental da Universidade Federal de Mato Grosso, no município de Santo Antônio de Leverger – MT. Os dados de radiação fotossinteticamente ativa incidente, refletida e interceptada na área de estudo foram coletados em um mastro micrometeorológico entre janeiro de 2006 e fevereiro de 2010. O IAF foi medido pelo método da interceptação de luz e estimado pelos modelos propostos por Allen et al. (2002) e pelo produto MODIS. O IAF medido nas pastagens variou interanualmente e sazonalmente com maiores valores durante a estação chuvosa, refletindo a variação da precipitação. O IAF medido e estimado por Allen et al. (2002) não apresentaram correlação com a precipitação, entretanto, o IAF obtido pelo MODIS apresentou uma correlação significativa com a precipitação. O IAF medido não correlacionou com o estimado pelo produto MODIS, mas correlacionou com o estimado pelo modelo de Allen et al. (2002). Por meio do teste não-paramétrico de Kruskal Wallis os valores de IAF medidos na pastagem e estimados pelo modelo de Allen et al. (2002) e pelo produto do MODIS apresentaram diferença significativa entre si quando avaliados durante o todo o ano e em cada estação chuvosa e seca. A baixa correlação entre o IAF medido e estimado neste estudo realçam que as estimativas de IAF em pastagens por sensoriamento remoto devem ser utilizadas com cautela.

**Palavras-chave:** microclima, atenuação da radiação, biomassa, mudança do uso do solo.

#### Abstract

The Pantanal is considered the largest floodplain in the world, composed of 70% for Savannah. In recent decades, due to the advancement of agriculture, much of this biome has been converted to pasture. The leaf area index (LAI) is an important measure of vegetation cover, therefore, controls the exchanges of mass and energy of a vegetated surface. Thus the objective of this study was to evaluate the estimates of LAI at a pasture in the northern Pantanal of Mato Grosso by the MODIS product (MOD15A2) and the model proposed by Allen et al. (2002) with LAI measurements obtained through the light interception and precipitation estimated by Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). The study was conducted in a *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick pasture at the Experimental Farm of the Federal University of Mato Grosso, in Santo Antônio de Leverger - MT. The data of incident, reflected and intercepted photosynthetically active radiation (PAR) in the study area were collected in a micrometeorological mast from January 2006 to February 2010. LAI was measured by the light interception method and estimated by the proposed model by Allen et al. (2002) and MODIS product. LAI measured in the pasture varied interannually and seasonally with higher values during the rainy season, reflecting the variation in rainfall. The IAF measured and estimated by Allen et al. (2002) showed no correlation with rainfall, however, the LAI estimated by MODIS product was significantly correlated with precipitation. The measured LAI did not correlate with the estimated by MODIS product, but correlated with the estimated by Allen et al. (2002). The LAI values measured in the pasture and estimated by Allen et al. (2002) and the product of MODIS were significant difference through the non-parametric Kruskal Wallis test when assessed during the whole year and in each wet and dry season. The low correlation between the measured and estimated LAI in this study highlight that the estimates of LAI in grassland by remote sensing should be used with caution.

**Keywords:** microclimate, radiation attenuation, biomass, land-use change.

## 1. Introdução

O Pantanal é a maior planície alagável do mundo com 140 mil km<sup>2</sup>, (Rodrigues et al., 2011), tendo como principal característica o seu regime de chuvas. Cerca de 70% do Pantanal é composto por Cerrado (Costa et al., 2000), por isso é considerado uma savana hipsazonal, o que significa que a região apresenta uma vegetação típica do Cerrado sujeita a dois estresses constantes, um devido à seca e outro devido a inundação prolongada (Costa et al., 2010).

Nas últimas décadas, devido ao avanço da agricultura e a agropecuária, grande parte do Pantanal tem sido modificada. Com o corte da floresta primária, queimadas, degradação do solo e o avanço das culturas, as áreas florestais no Pantanal estão sendo substituídas por pastagens e áreas de cultivo (Coutinho, 2010). Para tanto, é de grande importância conhecer a dinâmica das pastagens quanto a sua interação com a atmosfera e a compreensão das causas das mudanças microclimáticas, sendo que uma das causas destas mudanças é a variação da cobertura vegetal, a qual pode ser avaliada por medidas do índice de área foliar.

O índice de área foliar (IAF) é uma medida da cobertura vegetal, definida pela razão entre a área total de folhas e pela unidade de área do solo ocupada por esta vegetação. A medida do IAF é muito importante, pois através das folhas é ocorrem as trocas de massa e energia (Sanches et al., 2008) que regem todo o sistema, além de ser um parâmetro importante para a evapotranspiração é

um indicador da produtividade das plantas. Amiúde, por meio do IAF é possível avaliar a interceptação de água, a cobertura do terreno, realizar estudos biogeoquímicos e ecológicos de uma cultura e, além disso, determinar as trocas gasosas de água e carbono (Resende et al., 2010; Biudes et al., 2013).

Existem diversas maneiras de se obter o IAF no campo, seja por meio de medidas diretas, que necessitam da retirada de folhas alterando o local de estudo; seja por medidas indiretas, que se baseiam na interceptação da luz e nas estimativas por meio de dados de sensores orbitais, que não modificam o local de estudo (Danelichen et al., 2011; Biudes et al., 2013).

Atualmente, o sensoriamento remoto tem ganhado espaço em diversos campos do conhecimento, pois possibilita o monitoramento de diversos fenômenos ambientais e meteorológicos, como a medida do IAF, além de ser uma ferramenta viável que combina a refletância da superfície vegetada medida por sensores sem alterar a área de estudo, como é o caso do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e o TM (Thematic Mapper), a bordo do satélite Landsat 5.

As estimativas de IAF por meio de dados de sensores orbitais não podem ser generalizadas e necessitam de validação de suas estimativas e produtos, levando em consideração especificidades do local e a dinâmica da vegetação (Breda et al., 2003; Danelichen et al., 2011; Biudes et al., 2013). Portanto, a utilização de dados de campo integrados a dados obtidos por sensores orbitais, por meio de índices de vegetação, como o caso do IAF,

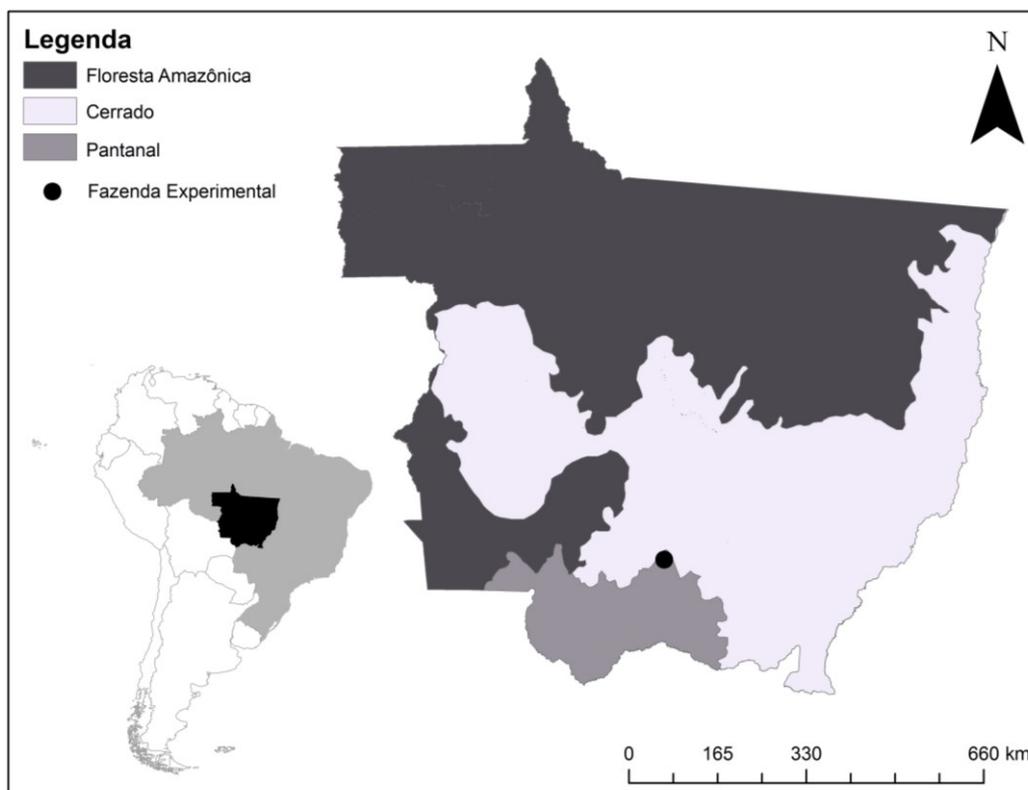


Figura 1. Localização da área de estudo na Fazenda Experimental da UFMT.

tem grande utilidade no âmbito científico, pois após as avaliações das estimativas, estes dados fornecem informações úteis a respeito da área de estudo.

Dessa forma o objetivo deste trabalho foi avaliar as estimativas de IAF de uma pastagem no norte do Pantanal Mato-Grossense pelo produto do MODIS (MOD15A2) e pelo modelo proposto por Allen *et. al.* (2002) com medidas de IAF obtidas por meio da interceptação de luz e precipitação estimada pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).

## 2. Metodologia

### 2.1 Localização da Área de Estudo

O estudo foi conduzido entre janeiro de 2006 e fevereiro de 2010 em uma pastagem de *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick com coordenadas geográficas 15°47'11''S de latitude e 56°04'47''O de longitude e altitude de 95,1 m acima do nível do mar, localizada na Fazenda Experimental da Universidade Federal de Mato Grosso, no município de Santo Antônio de Leverger - MT (Figura 1). O clima local é classificado como Aw segundo Köppen (Danelichen e Biudes, 2011). Nesta área de estudo, a temperatura média anual é de 25,6°C e as estações são bem definidas, com um período chuvoso de outubro a abril e um seco de maio a setembro (Danelichen e Biudes, 2011).

O solo local foi classificado como PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico gleissólico, com textura média/argilosa, A moderado, fase cerrado (com plantas xerófilas) e relevo plano. A composição granulométrica do horizonte A apresenta 56,6% de areia, 21,7% de silte e 21,7% de argila e do horizonte B apresenta 29,9% de areia, 23,4% de silte e 46,7% de argila.

### 2.2 Instrumentação Utilizada

Na área de estudo estava instalado um mastro micrometeorológico de 4 m de altura, onde foram fixados os equipamentos utilizados neste estudo. A radiação fotossinteticamente ativa (*photosynthetically active radiation* - PAR) incidente, refletida e interceptada foram medidas por três sensores quânticos (LI190SB, LI-COR, Lincoln, NE, USA). A PAR incidente e refletida foram medidas a 2,5 m acima do nível do solo, um com a face voltada para cima e outro com a face voltada, respectivamente. Enquanto que a PAR interceptada pela pastagem foi medida ao nível do solo. Os sinais produzidos pelos transdutores foram lidos, processados e armazenados por um datalogger modelo (CR 10X, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA), com médias de 15 minutos.

### 2.3 Precipitação Obtida pelo TRMM

A precipitação mensal cumulada na área de estudo

foi estimada pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), obtida no site [http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM\\_V6.3B42\\_daily.shtml](http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM_V6.3B42_daily.shtml). A sazonalidade da precipitação no local de estudo foi relacionada com as estimativas de IAF da pastagem.

Este satélite é um projeto da Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (*National Aeronautics and Space Administration* - NASA) com o objetivo de monitorar a precipitação nos trópicos, com alta resolução temporal e espacial (Danelichen *et al.*, 2013). Possui uma órbita oblíqua não-heliossíncrona, com aproximadamente 403 km e um período de translação bem curto, sendo em torno de 91 minutos (COLLISCHONN *et al.*, 2007).

### 2.4 Dados Obtidos por meio de Sensores Orbitais

O produto IAF MODIS (MOD15A2) possui uma resolução espacial de um quilômetro e frequência de oito dias de dados. Este produto é baseado na teoria de transferência radioativa tridimensional e é desenvolvido por inversão utilizando uma abordagem de tabela de pesquisa (Heute *et al.*, 2008). Estes dados são publicados pelo Centro de Dados EROS do Active Archive Center (EDC DAAC, [http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GR\\_col5\\_1/mod\\_viz.html](http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GR_col5_1/mod_viz.html)), analisados de acordo com as coordenadas da área de estudo. O valor do IAF de cada célula foi analisado e avaliado quanto à qualidade (QA), que determinou o tipo de algoritmo utilizado ou a inexistência de dados.

Além dos produtos do MODIS, foram utilizadas 24 imagens da pastagem da Fazenda Experimental captadas pelo sensor TM - Landsat 5, adquiridas pela divisão de geração de imagens do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), correspondentes à órbita 226 e ponto 71.

### 2.5 Estimativa do IAF por Sensoriamento Remoto usando Imagens do Landsat-5

As imagens Landsat-5 foram utilizadas para estimar o IAF (equação 1) segundo o modelo de Allen *et. al.* (2002), utilizando-se como ferramenta de programação o Model Maker do software ERDAS.

$$IAF = - \frac{\ln \left( \frac{0,69 - SAVI}{0,59} \right)}{0,91} \quad (1)$$

em que SAVI é o Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) (equação 2; Huete, 1988). Este é um índice que busca amenizar os efeitos do "background" do solo e é um indicador da biomassa que pode ser obtido por equações empíricas com bons resultados (Allen *et al.*, 2004).

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{\lambda 4} - \rho_{\lambda 3})}{(L + \rho_{\lambda 4} + \rho_{\lambda 3})} \quad (2)$$

em que o fator L é função do tipo de solo da área de estudo e sua determinação requer um conhecimento a priori da resposta espectral do solo. O valor desse fator é crítico na minimização dos efeitos das propriedades ópticas do solo na refletância da vegetação e em muitas aplicações tem sido usado um valor de L = 0,1 para variações de primeira ordem na imagem, como sendo um valor otimizado dessa refletância (Huete, 1988).

Cada banda foi calibrada por meio da equação (3) (Markham e Baker, 1987), convertendo o número digital (ND), ou intensidade de cada pixel da imagem, em radiância espectral monocromática  $L_{\lambda i}$  das bandas refletivas do Landsat 5 – TM (canais 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7).

$$L_{\lambda i} = a_i + \left( \frac{b_i - a_i}{255} \right) ND \quad (3)$$

em que a e b são as radiâncias espectrais mínima e máxima respectivamente ( $Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) e i corresponde às bandas (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) do satélite Landsat 5 – TM (Tabela 1).

A refletância monocromática planetária de cada banda ( $\rho_{\lambda i}$ ), definida pela razão entre a integração hemisférica da radiância monocromática e a irradiância solar monocromática incidente em cada pixel foi obtida pela equação (4).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (4)$$

em que  $L_{\lambda i}$  é a radiância espectral de cada banda;  $k_{\lambda i}$  é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ , Tabela 1); Z é o ângulo zeni-

tal solar; e,  $d_r$  é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol ( $r_0$ ) e a distância Terra-Sol (r) em cada dia sequencial do ano (DSA), calculado pela equação 5 (Iqbal, 1983).

$$d_r = 1 + 0,033 \cos( DSA \cdot 2\pi/365 ) \quad (5)$$

### 2.6 Medidas do IAF por Interceptação De Luz

O IAF medido em campo por interceptação de luz foi calculado por meio da equação (6).

$$IAF = \frac{\ln(1 - f_c)}{-k} \quad (6)$$

em que IAF é o índice de área foliar ( $m^2 m^{-2}$ );  $f_c$  é a fração da PAR interceptada; e, k é o coeficiente de extinção do dossel ( $m^2 m^{-2}$ ), estimado a partir do ângulo de elevação do Sol, de acordo com o método proposto por Goudriaan (1988).

A fração da PAR (equação 6) foi calculada pelo método de Monsi e Saeki (1953), utilizando PAR integrada diariamente.

$$f_c = \frac{I_o}{(I - I_r)} \quad (7)$$

em que  $f_c$  é fração de radiação interceptada; I é a radiação fotossinteticamente ativa diária incidente no topo do dossel ( $\mu mol m^{-2} dia^{-1}$ );  $I_r$  é a radiação fotossinteticamente ativa diária refletida pelo dossel ( $\mu mol m^{-2} dia^{-1}$ ); e,  $I_o$  é a radiação fotossinteticamente ativa diária que atinge a superfície ( $\mu mol m^{-2} dia^{-1}$ ).

Tabela 1 - Descrição dos canais do TM - Landsat 5 (Chander et al., 2007), com os correspondentes intervalos de comprimento de onda ( $\lambda$ ), coeficientes de calibração para radiâncias mínima (a) e máxima (b) em  $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ , irradiâncias espectrais no topo da atmosfera ( $k_{\lambda i}$ ;  $W m^{-2} \mu m^{-1}$ )

Bandas	Comprimento de Onda ( $\mu m$ )	Coeficientes de calibração		$k_{\lambda i}$ ( $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ )
		a	b	
1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,52	193,0	1957
2 (verde)	0,52 – 0,60	-2,84	365,0	1826
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	-1,17	264,0	1554
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,79	-1,51	221,0	10,36
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,37	30,2	215,0
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	-
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	-0,15	16,5	80,67

### 2.7 Análise Estatística

A concordância entre os valores de IAF medidos em campo e estimados por imagens de satélite foi avaliada considerando o erro quadrático médio (EQM) e erro médio absoluto (EMA). O EQM foi calculado pela equação (8), e indica o quanto o modelo falha em estimar a variabilidade das medidas em torno da média e mede a variação dos valores estimados ao redor dos valores medidos. O menor limite em (EQM) é zero, significa que há plena adesão entre as estimativas do modelo e as medidas.

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}} \tag{8}$$

O EMA foi calculado pela equação (9) e indica o afastamento (desvio) médio absoluto dos valores estimados em relação aos valores medidos. O ideal seria que os valores do erro médio absoluto e do erro quadrado médio fossem o mais próximo de zero.

$$EMA = \sum \frac{|P_i - O_i|}{n} \tag{9}$$

Verificou-se pelos testes de Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling se a distribuição dos valores de IAF obtido por todos os métodos era normal, a um nível de significância de 5%. Como não foi possível afirmar que tinham distribuição normal, optou-se pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para verificar se houve diferença entre as medidas e estimativas de IAF e

o teste de Mann-Whitney para verificar a existência de sazonalidade de todos os anos estudados (Wilks, 2011). Optou-se também a utilizar o coeficiente de correlação de Spearman para avaliar a relação entre os métodos.

## 3. Resultados e Discussões

### 3.1 Variação da Precipitação Mensal Estimada pelo TRMM

A precipitação acumulada sobre a pastagem durante o período de estudo (entre janeiro de 2006 e fevereiro de 2010) foi de 7934,6 mm, sendo o ano de 2009 o que apresentou maior acúmulo de precipitação num total 1844,8 mm, provavelmente pela ocorrência de precipitação em todos os meses (Figura 2). Pelo teste de Kruskal-Wallis constatou-se que não houve diferença significativa da precipitação entre os anos estudados no que refere-se ao acúmulo de chuva (p-valor = 0,821), de modo que em relação a todos os anos, 2009 apresentou o maior valor Z pelo teste, de 0,74.

Em relação à sazonalidade de todos os anos (estação seca e chuvosa) o teste de Mann-Whitney demonstrou diferença significativa (p-valor < 0,05), com maiores valores durante a estação chuvosa. Quando aplicado o teste de Kruskal-Wallis para verificar a interanualidade da estação seca e da chuvosa, verificou-se que houve diferença da estação seca entre os anos (p-valor < 0,05), no entanto não houve diferença da estação chuvosa entre os anos (p-valor = 0,872).

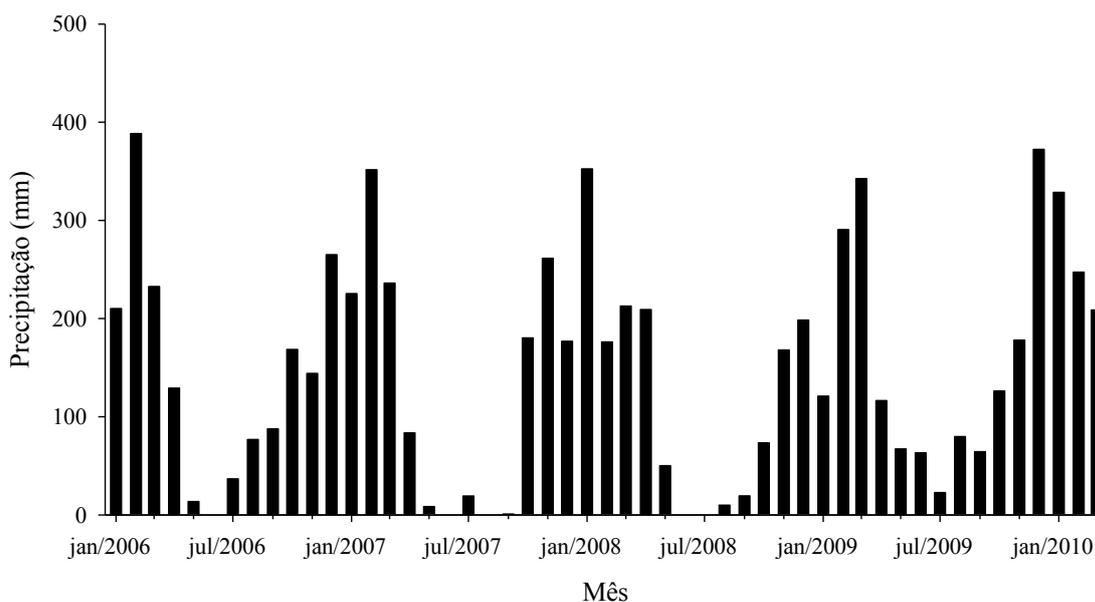


Figura 2. Distribuição da precipitação estimada pelo TRMM entre 2006 a 2010 na Fazenda Experimental da UFMT.

Tabela 2 - Média mensal de IAF  $\pm$  desvio padrão estimada pela transmitância da radiação e equação de Monsi e Saeki (1953) para os anos de 2006 a 2010 da pastagem.

Mês	2006	2007	2008	2009	2010
Jan	-	4,42 $\pm$ 0,15	4,71 $\pm$ 0,02	4,28 $\pm$ 0,37	5,80 $\pm$ 0,28
Fev	1,65 $\pm$ 0,25	4,90 $\pm$ 0,04	4,72 $\pm$ 0,06	5,33 $\pm$ 0,21	5,50 $\pm$ 0,22
Mar	3,56 $\pm$ 0,67	4,77 $\pm$ 0,26	4,38 $\pm$ 0,17	4,84 $\pm$ 0,20	-
Abr	5,30 $\pm$ 0,34	4,02 $\pm$ 0,14	3,79 $\pm$ 0,11	4,37 $\pm$ 0,10	-
Mai	4,13 $\pm$ 0,56	3,71 $\pm$ 0,13	3,47 $\pm$ 0,07	4,82 $\pm$ 0,13	-
Jun	2,16 $\pm$ 0,51	3,45 $\pm$ 0,08	3,32 $\pm$ 0,12	5,82 $\pm$ 0,28	-
Jul	1,62 $\pm$ 0,12	3,66 $\pm$ 0,13	2,51 $\pm$ 0,49	5,17 $\pm$ 0,36	-
Ago	3,36 $\pm$ 0,57	4,05 $\pm$ 0,10	1,86 $\pm$ 0,13	5,00 $\pm$ 0,10	-
Set	4,76 $\pm$ 0,36	4,44 $\pm$ 0,13	2,90 $\pm$ 0,56	5,60 $\pm$ 0,25	-
Out	4,91 $\pm$ 0,25	4,76 $\pm$ 0,03	3,99 $\pm$ 0,14	6,18 $\pm$ 0,23	-
Nov	4,30 $\pm$ 0,06	4,59 $\pm$ 0,06	4,09 $\pm$ 0,08	5,71 $\pm$ 0,10	-
Dez	4,08 $\pm$ 0,06	4,62 $\pm$ 0,02	3,64 $\pm$ 0,20	5,37 $\pm$ 0,36	-
Média anual	3,62	4,28	3,58	5,21	5,65

### 3.2 Variação do IAF Mensal Medido

Pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis verificou-se diferença significativa entre o IAF medido em todos os anos ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). Em média, o IAF em 2009 foi maior (5,21  $m^2 m^{-2}$ ) que os outros anos, e os medidos em janeiro e fevereiro de 2010 foram maiores que os mensais em anos anteriores. Provavelmente, o maior acúmulo anual de precipitação seja a causa do maior IAF durante este período.

Pelo teste de Mann-Whitney, houve sazonalidade do IAF em todos os anos analisados, com maiores valores durante a estação chuvosa (Tabela 2). Não houve um mês

predominante de valor máximo de IAF, no entanto, os menores desvios padrão foram em novembro e dezembro de 2006 (0,06  $m^2 m^{-2}$ ), ano com menor precipitação em novembro (144 mm) durante todos os 5 anos analisados (Figura 2; Tabela 2).

### 3.3 Estimativa do IAF pelo MODIS

Verificou-se pelos testes de Kruskal-Wallis que o IAF estimado pelo produto MODIS (MOD15A2) apresentou diferença significativa entre os anos em estudo ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). O IAF em 2009 apresentou a maior média anual (1,76  $m^2 m^{-2}$ ) e em 2006 a menor média anual (1,66  $m^2 m^{-2}$ ) (Tabela 3).

Tabela 3 - Média mensal de IAF ( $\pm$  desvio padrão) estimada pelo MODIS para os anos de 2006 a 2010 da pastagem.

Mês	2006	2007	2008	2009	2010
Jan	2,03 $\pm$ 0,05	1,90 $\pm$ 0,12	2,01 $\pm$ 0,06	1,87 $\pm$ 0,23	1,95 $\pm$ 0,29
Fev	1,86 $\pm$ 0,22	1,90 $\pm$ 0,07	1,98 $\pm$ 0,33	2,36 $\pm$ 0,18	2,10 $\pm$ 0,13
Mar	2,21 $\pm$ 0,30	2,21 $\pm$ 0,20	2,39 $\pm$ 0,08	2,12 $\pm$ 0,21	2,49 $\pm$ 0,05
Abr	1,91 $\pm$ 0,22	2,24 $\pm$ 0,10	2,15 $\pm$ 0,22	1,73 $\pm$ 0,11	-
Mai	1,62 $\pm$ 0,12	1,70 $\pm$ 0,17	1,78 $\pm$ 0,05	1,57 $\pm$ 0,11	-
Jun	1,30 $\pm$ 0,07	1,53 $\pm$ 0,13	1,38 $\pm$ 0,36	1,51 $\pm$ 0,02	-
Jul	1,11 $\pm$ 0,14	1,19 $\pm$ 0,05	1,11 $\pm$ 0,08	1,28 $\pm$ 0,09	-
Ago	1,05 $\pm$ 0,15	1,10 $\pm$ 0,07	0,94 $\pm$ 0,10	1,28 $\pm$ 0,13	-
Set	1,35 $\pm$ 0,14	1,11 $\pm$ 0,13	1,23 $\pm$ 0,26	1,56 $\pm$ 0,09	-
Out	1,81 $\pm$ 0,39	1,36 $\pm$ 0,27	1,87 $\pm$ 0,41	1,75 $\pm$ 0,16	-
Nov	1,94 $\pm$ 0,14	1,98 $\pm$ 0,09	1,96 $\pm$ 0,09	2,09 $\pm$ 0,23	-
Dez	1,91 $\pm$ 0,16	1,95 $\pm$ 0,24	2,20 $\pm$ 0,17	2,19 $\pm$ 0,19	-
Média anual	1,66	1,68	1,73	1,76	2,12

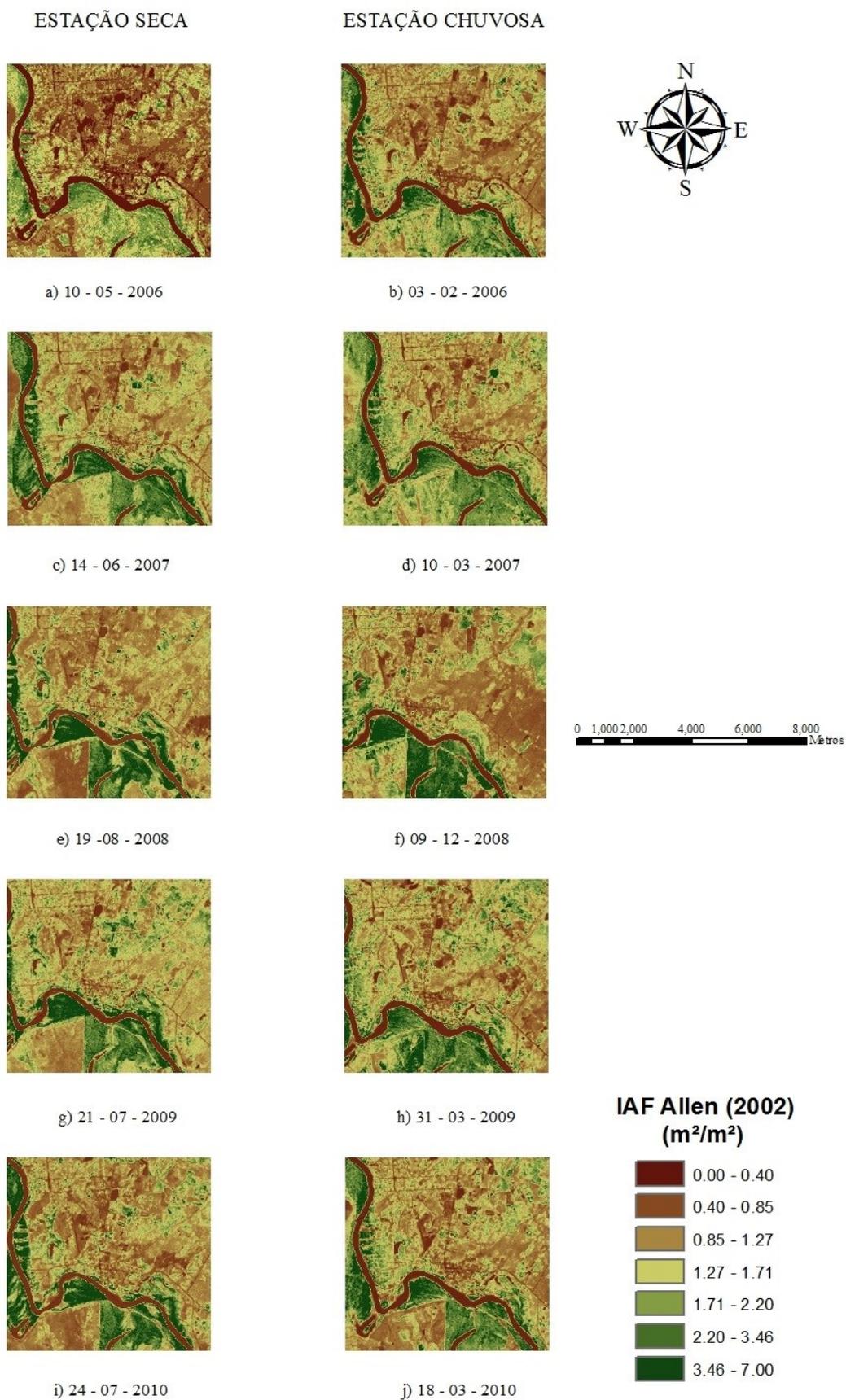


Figura 3. IAF estimado pelo modelo de Allen et al. (2002) durante os meses mais secos e mais chuvosos entre 2006 e 2010.

Pelo teste de Mann-Whitney houve diferença significativa do IAF estimado pelo produto MODIS entre as estações seca e chuvosa durante todos os anos ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), com mínimos na estação seca e máximos na estação chuvosa, variando entre 1,0 e 2,5  $m^2 m^{-2}$  (Tabela 3). Os menores valores de IAF estimados pelo produto MODIS ocorreram entre julho e agosto. Os valores máximos de IAF obtidos pelo produto MODIS ocorreram em, com média de 2,21  $m^2 m^{-2}$ , exceto em 2009 que ocorreu em fevereiro, porém ambos considerados período chuvoso e ambos são influenciados pelo acúmulo de chuvas dos meses anteriores.

Os valores de IAF estimados pelo produto MODIS estão de acordo com os resultados obtidos por Zanchi et al. (2009) em uma pastagem no estado de Rondônia – BR utilizando o método direto que se caracteriza pela destruição da vegetação a ser analisada, Zanchi et al. (2009) obteve valores médios de 2,0  $m^2 m^{-2}$  com desvio padrão médio de  $\pm 0,79$ .

### 3.4 Estimativa do IAF pelo modelo de Allen et al. (2002)

O teste de Kruskal-Wallis demonstrou que não houve diferença significativa entre os anos em estudo do IAF estimado pelo modelo de Allen et al. (2002) com ( $p = 0,304$ ). Já o teste de Mann-Whitney demonstrou que houve diferença significativa entre as estações durante todos os anos ( $p$ -valor = 0,046), próximo do limite do intervalo de confiança. Este resultado possivelmente deve estar ligado ao fato do satélite Landsat-5 dispor de poucas imagens ao longo dos anos analisados e a influência de nuvens na estação chuvosa, o que muitas vezes dificulta a precisão da medida (Souza et al., 2010).

A variabilidade espacial e temporal do IAF para as estações (seca e chuvosa) na área de estudo demonstra a dinâmica sazonal apresentando uma variação de um valor mínimo de 0,01 a um valor máximo de 7,0  $m^2 m^{-2}$  pelo modelo de Allen et al. (2002) (Figura 3). As imagens estão divididas em período seco e chuvoso, sendo que a margem do rio Cuiabá os valores de IAF estão entre 1,27 a 7,00  $m^2 m^{-2}$  para ambos os períodos, devido à presença de área de pastagem e o vigor da vegetação (Figura 3).

Durante todo período de estudo, o valor máximo de IAF estimado pelo modelo de Allen (2002) no pixel da estação foi de 1,385 em outubro de 2009 e um valor

mínimo de 0,187  $m^2 m^{-2}$  em setembro de 2007. Estes resultados estão de acordo com estudo feitos por Danelichen et al. (2011) e Pinto Junior et. al. (2010) que estimaram valores elevados na estação chuvosa e valores mínimos na estação seca em uma região de transição Cerrado -Amazônia por meio de estimativa usando também sensores orbitais e o método de Monsi e Saeki (1953). O IAF tende a ser maior durante as estações chuvosas e intermediárias seca-chuvosa devido ao aumento no crescimento da vegetação em consequência da maior disponibilidade de água. O IAF varia de acordo com o ecossistema e das condições do local, como fertilidade e suprimento de água do solo, além disso estrutura do dossel é um importante fator que influencia a sua estimativa (Jupp et al., 2008).

### 3.5 Relação entre os Valores de IAF e a Precipitação

O IAF estimado pelo produto MODIS demonstrou a maior correlação com a precipitação obtida pelo TRMM (Tabela 4) apresentando correlação positiva ( $r = 0,8662$ ;  $p$ -valor  $< 0,05$ ). Provavelmente, esse resultado é devido ao das duas estimativas serem oriundas de sensores orbitais, tanto o produto MODIS e a precipitação do TRMM. A avaliação dos produtos do MODIS e TRMM apresentam condições parecidas no que diz respeito a precisão dos mesmos, incluindo a contaminação por aerossóis (Yang et al., 2006b), entrada da refletância da superfície (Tan et al., 2005; Wang et al., 2001; Yi et al., 2008), sensor de ângulo de visão zenital e classificação da cobertura da terra (Cohen et al., 2003; Heinsch et al., 2006; Myneni et al., 2002).

### 3.6 Relação entre os IAF Medido e Estimado por Sensores Orbitais

Por meio do teste não paramétrico de Kruskal Wallis verificou-se que os valores de IAF medidos e estimados pelo modelo de Allen et al., 2002 e pelo produto MODIS são significativamente diferentes entre si ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). Além disso, todos os três métodos também apresentaram diferença significativa em cada uma das estações (seca e chuvosa) ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) (Tabela 5).

Tabela 4 – Matriz de correlação de Spearman entre o IAF (medido e estimados pelo modelo de Allen et al. (2002) e o produto MODIS) e a precipitação (TRMM), o símbolo (\*) na frente do coeficiente de correlação indica  $p$ -valor  $< 0,05$ .

	Precipitação	Medido	MODIS	Allen
Precipitação	1.0000			
Medido	0.3477	1.0000		
MODIS	0.8664*	0.4451	1.0000	
Allen	0.2679	0.5285*	0.4127	1.0000

Tabela 5 - Resultado do teste de Kruskal-Wallis (valor real  $H$ , graus de liberdade  $DF$ , probabilidade  $P$  e número total de amostra  $N$ ) do efeitos dos métodos de estimativa de IAF na área de estudo e nas estações seca e chuvosa (IAF medido - 1, IAF MODIS - 2 e IAF modelo de Allen et al. (2002) - 3).

Tratamento	H	DF	P	N (total)
Local (1-2-3)	285.04	2	0.000	403
Estação seca (1-2-3)	131.15	2	0.000	168
Estação chuvosa (1-2-3)	176.43	2	0.000	235

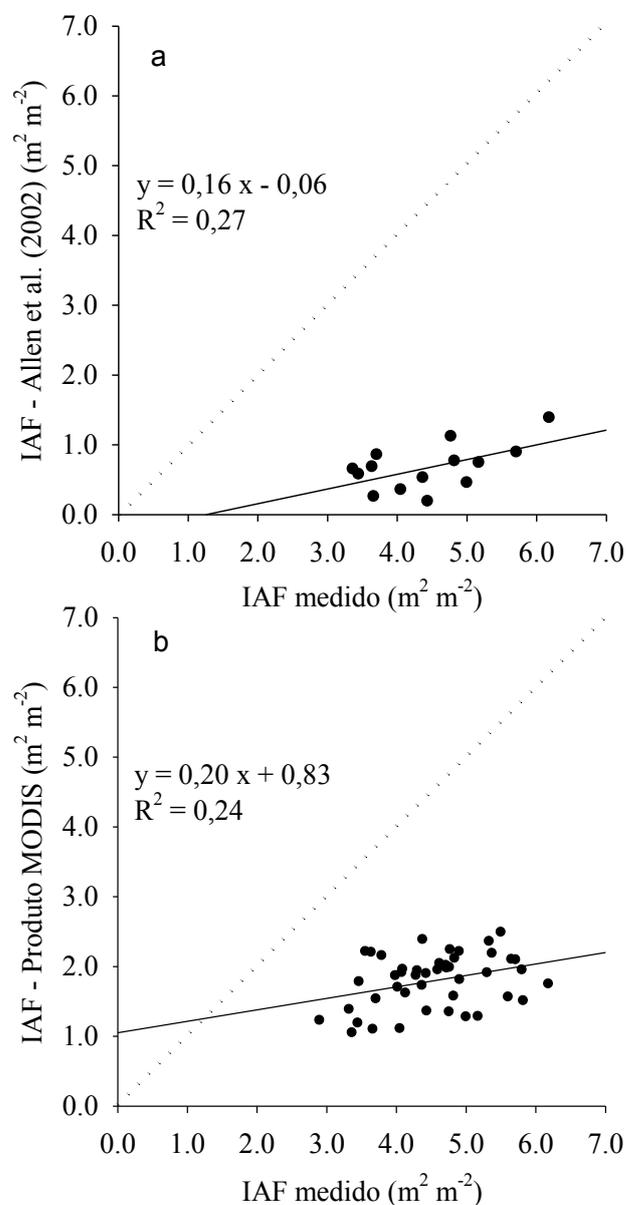


Figura 4. Relação entre o IAF medido e estimados pelo produto MODIS (a) e pelo modelo de Allen et al. (2002). Nota: a linha contínua é a da regressão e a linha pontilhada é a linha 1:1.

Houve correlação significativa entre o IAF medido e o estimado pelo modelo de Allen et al. (2002) (Tabela 4), com EMA de 3,65 e EMQ de 3,75. No entanto, apesar de menores valores de EMA (2,44) e EMQ (2,69) os valores de IAF medido e estimado pelo produto MODIS não apresentaram correlação significativa. Mesmo não havendo correlação entre o IAF medido e estimado pelo produto MODIS, é importante ressaltar que o p-valor foi igual a 0,07, o que é próximo ao limite de erro de 0,05.

Em períodos chuvosos, não há restrição hídrica, o que permite que as forrageiras mantenham sua atividade fotossintética, enquanto que em déficit pluviométrico as forrageiras entram em senescência, alterando suas características produtivas e estruturais, e conseqüentemente, seu aspecto visual. Dessa forma, essa alteração na estrutura da forrageira pode ser perceptível pelas imagens de satélite, o que possibilitou a relação significativa com o IAF medido e estimado pelo modelo de Allen et al. (2002).

Aduan (1998) e Baruch e Fernández (1993) observaram que na estação seca, as plantas reduzem abruptamente sua área verde em função da forte sensibilidade estomática ao gradiente de pressão de vapor de água entre a superfície transpirante. Desta maneira o material morto da vegetação responde a variação sazonal, o que influencia diretamente no aumento da biomassa total (Figura 3). Por outro lado o material vivo possuiu um ciclo sazonal bem definido, pois ele sugere uma variação direta com as mudanças do clima e variação da quantidade de água no solo. Essa mistura de material vegetal vivo e morto pode contribuir para a falta de correlação entre as medidas de IAF no campo com as estimativas por sensores orbitais.

#### 4. Conclusões

O IAF medido na pastagem deste estudo variou interanualmente e sazonalmente em função da variação pluviométrica da região.

Os valores de IAF medidos por interceptação de luz e estimados pelo modelo de Allen et al. (2002) e pelo produto MODIS na pastagem deste estudo foram significativamente diferente quando levado em consideração os dados anuais e em cada uma das estações seca e chuvosa.

A baixa a correlação entre os valores medidos e estimados de IAF realçam o desafio em estimar o IAF de pastagens por sensoriamento remoto e indica que a utilização dessas estimativas devem ser usadas com cuidado, pois podem ter implicações em modelos que as usam como parâmetro de entrada.

#### Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada pela FAPEMAT e CNPq. V.H.M.D. e M.C.S. agradece uma bolsa da CAPES. J.S.N. agradece uma bolsa CNPq.

#### Referências

- ADUAN, R. E. 1998. Relações hídricas de duas gramíneas nativas e uma introduzida no cerrado e sua conexão com as conseqüências da substituição do estrato herbáceo. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ecologia. Universidade de Brasília. 58p.
- ALLEN, R.; BASTIAANSEN, W.; WARTES, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Surface energy balance algorithms for land (SEBAL), Idaho implementation - Advanced training and user's manual, version 1.0, 2002. 97p.
- BARUCH, Z.; FERNANDÉZ, D. S. 1993. Water relations of native and introduced C4 grasses in a neotropical savanna. *Oecologia* 96:179-185.
- BIUDES, M.S.; MACHADO, N.G.; DANELICHEN, V.H.M.; SOUZA, M.C.; VOURLITIS, G.L.; NOGUEIRA, J.S., 2013. Ground and Remote Sensing-Based Measurements of Leaf Area Index in a Transitional Forest and Seasonal Flooded Forest in Brazil. *International Journal of Biometeorology*. doi:10.1007/s00484-013-0713-4.
- BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*. v.54, n.393, p.2403-2417, 2003.
- CHANDER, G.; MEMBER; IEEE, MARKHAM, B. L.; BARSÍ, J. A. Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, v.4, n.3, p.490-494, 2007.
- COHEN, W. B.; MAIERSPERGER, T. K.; YANG, Z.; GOWER, S. T.; TURNER, D. P.; RITTS, W. D.; BERTERRETICHE, M.; RUNNING, S. W. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: A quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products. *Remote Sensing of Environment*, v.88, p.233-255, 2003.
- COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Desempenho do satélite trmm na estimativa de precipitação sobre a bacia do paraguai superior. *Revista Brasileira de*

- Cartografia, v.59, n.1, p.93-99, 2007.
- COSTA, C. P.; CUNHA, C. N.; COSTA, S. C. Characterization of the flora and structure of the shrub-tree layer in a cerrado area in Pantanal do Poconé, MT. *Biota Neotropica*, v.10 n.3, p.61-73, 2010.
- COUTINHO, A. C. Precisão posicional dos focos de queimadas no Estado de Mato Grosso. Comunicado Técnico 105, Embrapa. 2010. Campinas, SP.
- DANELICHEN, V. H. M.; BIUDES, M. S. Avaliação da difusividade térmica de um solo no norte do Pantanal. *Ciência e Natura*, v.33, n.2, p.227-240, 2011.
- DANELICHEN, V. H. M.; BIUDES, M. S.; SEIXAS, G. B. Estimativa do Índice de Área Foliar de Uma Floresta de Transição Amazônia-Cerrado Utilizando Dados de Interceptação de Luz e Sensores Orbitais. *Coletânea Física Ambiental I*. v. 1. 265-276. São Paulo: Baraúna, 2011.
- GOUDRIANN, J. The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.43, p.155-169, 1988.
- HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S.; KIMBALL, J. S.; NEMANI, R.; DAVIS, A. B.; 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.; LAWRENCE, B. F. 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.
- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v.25, p.295-309, 1988.
- HUETE, A.; DIDAN, K.; VAN LEEUWEN, W.; MIURA, T.; GLENN, E. MODIS vegetation indices. In *Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS 2008*, in press.
- IQBAL, M. *An Introduction to Solar Radiation*. New York: Academic Press. 1983. 212p.
- JÚNIOR O. B. P.; SANCHES L.; LOBO. F. A.; BRANDÃO. A. A.; NOGUEIRA. J. S. Leaf area index of a tropical semi-deciduous forest of the southern Amazon Basin. *International Journal of Biometeorology*, v.55, p.109-118, 2010.
- JUPP, D. L. B.; CULVENOR, D. S.; LOVELL, J. L.; NEWNHAM, G. J.; STRAHLER, A. H.; WOODCOCK, C. E. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called 'Echidna. *Tree Physiology*, v.29, p.171-181, 2008.
- MARKHAM, B. L. & BARKER, J. L. Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, v.8, n.3, p.517-523, 1987.
- MONSI, M.; SAEKI, T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften, seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, v.14, p.22-52, 1953.
- MYNENI, R. B.; HOFFMAN, S.; KNYAZIKHIN, Y.; PRIVETTE, J. L.; GLASSY, J.; TIAN, Y.; WANG, Y.; SONG, X.; ZHANG, Y.; SMITH, G. R.; LOTSCH, A.; FRIEDL, M.; MORISETTE, J. T.; VOTAVA, P.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, v.83, p.214-231, 2002.
- RESENDE, D. P. R.; LOBO, F. A.; DALMAGRO, H. J.; BIUDES, M. S.; PINTO JUNIOR, O. B.; NOGUEIRA, J. S.; VOURLITIS, G. L. Avaliação de dois métodos para estimativa do índice de área foliar em Floresta de Transição Amazônia-Cerrado. *Ciência e Natura*, v.32, n.2, 2010.
- RODRIGUES, D. B. B.; SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; PANACHUKI, E. Nova abordagem sobre o modelo Brasileiro de serviços ambientais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, n.3, p.1037-1045, 2011.
- SANCHES, L.; ANDRADE, N. L. R.; NOGUEIRA, J. S.; BIUDES, M. S.; VOURLITIS, G. L. Índice de área foliar em floresta de transição Amazônia cerrado em diferentes métodos de estimativa. *Ciência e Natura*, v.30, n.1, p.57-69, 2008.
- SOUZA, C. M. P.; MOREAU, M. S.; MOREAU, A. M. S.; FONTES, E. O. Níveis de Degradação de Pastagens da Bacia do Rio Colônia-BA com Uso de Imagens LANDSAT 5TM. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.3, p.228-243, 2010.
- TAN, B.; HU, J.; HUANG, D.; YANG, W.; ZHANG,

- P.; SHABANOV, N. V.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Assessment of the broadleaf crops leaf area index product from the Terra MODIS instrument. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.135, p.124–134, 2005.
- WANG, Y.; TIAN, Y.; ZHANG, Y.; EL-SALEOUS, N.; KNYAZIKHIN, Y.; VERMOTE, E.; MYNENI, R. B. Investigation of product accuracy as a function of input and model uncertainties: Case study with SeaWiFS and MODIS LAI/FPAR algorithm. *Remote Sensing of Environment*, v.78, p.299–313, 2001.
- WILKS, D. S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press, 2011. 676p.
- YANG, W.; SHABANOV, N. V.; HUANG, D.; WANG, W.; DICKINSON, R. E.; NEMANI, R. R.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R. B. Analysis of leaf area index products from combination of MODIS Terra and Aqua data. *Remote Sensing of Environment*, v.104, p.297–312, 2006.
- YI, Y.; YANG, D.; HUANG, J.; CHEN, D. Evaluation of MODIS surface reflectance products for wheat leaf area index (LAI) retrieval. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v.63, p.661–677, 2008.
- ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M. J.; AGUIAR, L. J. G.; RANDOW, C. V.; KRUIJT, B.; CARDOSO, F. L.; MANZI, A. O. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. *Acta Amazônica*, v.39, n.2, p.335–348, 2009.