

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO ANUAL DA  
PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA EM FLORESTA DE  
TRANSIÇÃO AMAZÔNICA-CERRADO**

**MAÍSA CALDAS SOUZA VELASQUE**

**PROF. DR. MARCELO SACARDI BIUDES  
ORIENTADOR**

Cuiabá-MT, Fevereiro de 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO ANUAL DA  
PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA EM FLORESTA DE  
TRANSIÇÃO AMAZÔNICA-CERRADO**

**MAÍSA CALDAS SOUZA VELASQUE**

*Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Física Ambiental  
da Universidade Federal de Mato  
Grosso, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Física  
Ambiental.*

**PROF. DR. MARCELO SACARDI BIUDES  
ORIENTADOR**

Cuiabá-MT, Fevereiro de 2013.

### **Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.**

V434e Velasque, Maísa Caldas Souza.  
Estimativa da Variação Anual da Produção Primária Bruta em  
Floresta de Transição Amazônica-Cerrado / Maísa Caldas Souza  
Velasque. -- 2013  
xi, 42 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Marcelo Sacardi Biudes.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso,  
Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física  
Ambiental, Cuiabá, 2013.  
Inclui bibliografia.

1. índices de vegetação. 2. eficiência do uso da luz. 3. Modelo de  
Fotossíntese de Vegetação (VPM). I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA**  
**Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO ANUAL DA PRODUÇÃO  
PRIMÁRIA BRUTA EM FLORESTA DE TRANSIÇÃO  
AMAZÔNICA-CERRADO**

**AUTORA: MAÍSA CALDAS SOUZA VELASQUE**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27 de fevereiro de 2013, pela comissão julgadora:

  
**Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes - Orientador**  
Instituto de Física – UFMT

  
**Profa. Dra. Flávia Maria de Moura Santos – Examinadora Externa**  
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia – UFMT

  
**Profa. Dra. Ângela Santana de Oliveira - Examinadora Externa**  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFMT

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pois dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas.

E dedico também aos meus pais, José Carlos e Tânia, ao meu irmão João Paulo e ao meu marido Allan, pelo amor, incentivo e sacrifícios que fizeram para que eu concluísse esta nova etapa da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

- Ao Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes, pela orientação, apoio, dedicação e paciência em todo este tempo de pesquisa;
- Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira, pelo grande incentivo e também pelo trabalho feito para a realização deste curso de mestrado e doutorado em Física Ambiental;
- A todos os professores do Programa de Mestrado e Doutorado em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, os quais transmitiram seus conhecimentos, nos auxiliando sempre que necessário;
- A CAPES pelo auxílio financeiro;
- A todos os colegas de curso que ajudaram em muito, dos quais muitos se tornaram grandes amigos e em especial ao Victor Hugo, sempre tirando minhas duvidas.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS.....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 FLORESTA DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA CERRADO.....</b>	<b>4</b>
2.1.1 Amazônia.....	4
2.1.1 Cerrado.....	5
2.1.2 Floresta de Transição Amazônia Cerrado.....	5
<b>2.2 PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA.....</b>	<b>7</b>
<b>2.3 MODIS.....</b>	<b>8</b>
<b>2.4 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO ESTIMADOS POR SENSORES     ORBITAIS.....</b>	<b>9</b>
<b>2.5 RELAÇÃO ENTRE O GPP E OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – LOCALIZAÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 INSTRUMENTAÇÃO.....</b>	<b>13</b>
3.2.1 Medida de variáveis ambientais e método de Covariância.....	13
3.2.2 Medidas de variáveis orbitais.....	16
<b>3.3 MÉTODO.....</b>	<b>16</b>
3.3.1 Modelo VPM.....	16
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 VARIAÇÃO SAZONAL E INTERANUAL DO GPP E DOS DADOS     MICROMETEOROLÓGICOS.....</b>	<b>20</b>

<b>4.2 ANÁLISE TEMPORAL DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DO SENSOR MODIS .....</b>	<b>26</b>
<b>4.3 ANÁLISE DO MODELO VPM .....</b>	<b>28</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>31</b>
<b>5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>32</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>33</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Ecossistemas da Amazônia.....	6
<b>Figura 2</b> - Faixa de absorção dos principais pigmentos e sua relação com a taxa de atividade fotossintética no espectro visível.....	11
<b>Figura 3</b> – Localização da torre micrometeorológica na floresta de Transição Amazônia Cerrado a 60 km de Sinop.....	13
<b>Figura 4</b> – Ilustração da torre micrometeorológica de 42 m com informação da posição de equipamentos.....	15
<b>Figura 5</b> - (a) Média mensal da produtividade primária bruta (GPP), (b) total mensal de precipitação e (c) media mensal de evapotranspiração entre Julho de 2005 e Junho de 2008.....	21
<b>Figura 6</b> - (a) Média mensal da temperatura do ar e (b) Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) para 2005-2006, 2006-2007 e 2007-2008.....	22
<b>Figura 7</b> - Média mensal da eficiência do uso da luz $\epsilon_0$ de julho de 2005 a junho de 2008.....	26
<b>Figura 8</b> - Comparação da média mensal entre a produtividade primária bruta estimada (GPP) pelo método de Eddy Covariance e a produtividade primaria bruta estimada pelo modelo VPM ( $GPP_{VPM}$ ) de julho de 2005 a junho de 2008.....	27
<b>Figura 9</b> - Relação da média de 8 dias da produtividade primária bruta estimada pelo Eddy Covariance (GPP) e a produtividade primária bruta estimada pelo modelo VPM ( $GPP_{VPM}$ ).....	29

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b> - Precipitação Total e média anual das variáveis, para o período seco e o período chuvoso ( $\pm 95\%$ intervalo de confiança) .....	24
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

- GPP – Produtividade Primária Bruta
- $GPP_{VPM}$  – Produtividade Primária Bruta Estimada pelo modelo VPM
- $GPP_{max}$  – Produtividade Primária Bruta Máxima
- VPM - Vegetation Photosynthesis Model
- LUE - Light Use Efficiency
- MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- PAR – Radiação Fotossinteticamente Ativa
- FPAR – Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida
- ET - Evapotranspiração
- EVI - Enhanced Vegetation Index
- NDVI - Normalized Difference Vegetation Index
- LSWI - Land Surface Water Index
- $LSWI_{max}$  - Land Surface Water Index Máximo
- $\rho_{nir}$  – Reflectancia do infravermelho
- $\rho_{red}$  - Reflectancia do vermelho
- $\rho_{swir}$  – Reflectancia do infravermelho curto
- $\rho_{blue}$  – Reflectancia do azul
- $\epsilon_0$  - Eficiência Máxima do uso da luz
- $\epsilon_g$  – Eficiência do uso da luz
- $P_{est}$  - Reguladores Escalares para Efeito de fenologia foliar na fotossíntese das plantas
- $W_{est}$  – Reguladores Escalares para Efeito da água na fotossíntese das plantas
- $T_{est}$  – Reguladores Escalares para Efeito da temperatura na fotossíntese das plantas
- $T_{min}$  – Temperatura Mínima para a fotossíntese
- $T_{max}$  – Temperatura Máxima para a fotossíntese
- $T_{otm}$  - Temperatura Ótima para a fotossíntese
- NEE – Net Ecosystem Exchange
- NEP – Net Ecosystem Production
- NPP – Net Primary Production
- Re – Respiração do Ecossistema
- Rh – Respiração de Organismos Heterotróficos
- Ra – Respiração de Organismos Autotróficos
- r - Índice de correlação

d - Índice de concordância de Willmott

EQM - Erro Quadrado Médio

EMA - Erro Médio Absoluto

## RESUMO

SOUZA, M. C. *Estimativa da Variação Anual da Produção Primária Bruta em Floresta de Transição Amazônica-Cerrado*. Cuiabá, 2013, 54f. Dissertação (mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física. Universidade Federal de Mato Grosso.

Medidas de fluxo de CO<sub>2</sub> fornecem informações sobre a dinâmica sazonal da produtividade primária bruta (GPP), entretanto interações entre as condições climáticas em florestas tropicais ainda são incertas. Portanto, neste estudo estimou-se a dinâmica anual e sazonal da GPP a partir de estimativas pelo método de Eddy Covariance em uma Floresta de Transição Amazônia-Cerrado, localizada próxima a Sinop-MT. Os índices de vegetação EVI (Enhanced Vegetation Index) e LSWI (Land Surface Water Index), derivados do MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), também foram utilizados para a estimativa do modelo de fotossíntese de vegetação (VPM), o qual integra dados orbitais a dados micrometeorológicos. A eficiência do uso da luz foi estimada mensalmente, levando em consideração a dinâmica da produtividade, diferente do que é proposto pelo modelo VPM original. Os valores de eficiência do uso da luz apresentaram forte correlação com a GPP. A estimativa da GPP por meio do modelo VPM concordou com a dinâmica da GPP medida na torre, pelo método de Eddy Covariance, subestimando em média 10% o valor absoluto da torre, com  $R^2 = 0,90$ , erro médio absoluto de  $1,66 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e erro quadrado médio de  $1,69 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Os resultados encontrados neste estudo também destacaram o desempenho do EVI em relação ao GPP e demonstrou o potencial do modelo VPM para estimar GPP em florestas de transição.

Palavras Chave: fluxo de CO<sub>2</sub>, índices de vegetação, eficiência do uso da luz, Modelo de Fotossíntese da Vegetação (VPM).

## ABSTRACT

SOUZA, M. C. *Annual gross primary production estimates of Amazon-Cerrado transitional forest*. Cuiabá, 2013, 54f Thesis (Masters in Environmental Physics) – Institute of Physics. Federal University of Mato Grosso.

Measurements of CO<sub>2</sub> flux provide information about the seasonal dynamics of gross primary productivity (GPP), however interactions between the climatic conditions in tropical forests are still uncertain. Therefore, this study estimated the annual and seasonal dynamics of GPP estimates by Eddy Covariance method by in a Amazon-Cerrado Transitional Forest, located near Sinop-MT. The vegetation indices EVI (Enhanced Vegetation Index) and LSWI (Land Surface Water Index), derived from the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), were also used to estimate vegetation photosynthesis model (VPM), which integrates satellite data micrometeorological data. The light use efficiency was estimated monthly, according the GPP dynamics, which is different from the original VPM model proposed. The values of light use efficiency had strong correlation with GPP. The estimation of GPP through the VPM model agreed with the GPP measured in the tower, on average 10% underestimating, with  $R^2 = 0,90$ , mean absolute error of  $1.66 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  and root mean square error of  $1.69 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ . The results of this study also highlighted the performance of EVI over the GPP and demonstrated the potential of the VPM model for estimating GPP in transitional forests.

Key words: CO<sub>2</sub> flux, vegetation indices, light use efficiency, Vegetation Photosynthesis Model (VPM).

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMÁTICA

As florestas tropicais tem recebido atenção especial nos últimos anos, pois estão entre os biomas mais importantes da Terra. Possuem em média 50% de todas as espécies de plantas encontradas no planeta (LOSOS e LEIGH, 2004) e apesar de ocuparem apenas 12% da superfície terrestre, ela representa 40% da produtividade primária líquida (NPP) e 30% de todo o carbono estocado na biomassa (SAATCHI et al., 2011).

No Brasil, encontra-se uma das maiores extensões da Floresta Amazônica presente no mundo, sendo que só ela é responsável por estocar de 20 a 25% de todo o carbono global (BERNOUX et al., 2002). Com a conversão de florestas em pastagens, esta quantidade de carbono estocado vem diminuindo e acredita-se que em 2030, a Floresta Amazônica seja reduzida a metade do seu tamanho original (NEPSTAD et al., 2008). Mudanças como esta, podem modificar o clima da região além de impactar o funcionamento dos ecossistemas (VOURLITIS et al., 2011; NEPSTAD et al., 2008).

No estado de Mato Grosso, as plantações de soja e a prática da pecuária tem se alastrado em direção ao norte e localizada a 50 km da cidade de Sinop, ao noroeste

de Mato Grosso, tem-se uma Floresta de Transição entre a Amazônia e o Cerrado, que fica situada em uma região conhecida como “arco do desmatamento”.

Esta Floresta de Transição ou Ecótonos, como também é conhecida, é definida como duas vegetações diferentes que se misturam, entretanto ambas conservam suas próprias características (ACKERLY 1989). Esta é uma Floresta, que devido a sua natureza de transição, é mais sensível a mudanças climáticas (MALHI e WRIGHT 2006).

Acredita-se também que as Florestas de Transição tenham um balanço de CO<sub>2</sub> nulo, pois exibem absorção de carbono durante a estação úmida e liberação durante a estação seca (VOURLITIS et al., 2002; 2004), contudo devido estas mudanças climáticas, este equilíbrio pode ser alterado (DAMALGRO et al., 2011; MARIANO, 2008).

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Variações de condições climáticas podem alterar a resposta fisiológica das plantas ao ambiente, sendo que ainda existe pouco conhecimento destes fatores sobre a Floresta de Transição (DALMAGRO et al., 2011). O estudo sobre o balanço de carbono no ecossistema fornece informações importantes sobre o ambiente, tendo como o regulador do fluxo de carbono entre a biosfera e a atmosfera: a fotossíntese (STAGAKIS et al., 2007).

A taxa de dióxido de carbono convertido em carboidrato pela atividade fotossintética é conhecida como Produtividade Primária Bruta (GPP) (XIAO et al., 2004b). Considerada peça chave para o estudo de carbono, a GPP é a origem do carbono em todos os fluxos do ecossistema (VETRITA et al., 2011).

Um desafio para o mundo científico tem sido o monitoramento e a previsão dos ecossistemas (STAGAKIS et al., 2007), pois por meio de estudos de variação do fluxo de carbono ao longo de uma série temporal, compreendemos possíveis fatores que influenciam este fluxo e até mesmo fazer estimativas futuras.

Dos diversos métodos destinados a este estudo, a técnica de covariância de vórtices turbulentos (Eddy Covariance) tem sido muito utilizada para quantificar o estoque de carbono em ecossistemas florestais (BALDOCCHI, 2003). Esta é uma técnica de grande prestígio, porém inviável em alguns casos devido seu alto custo de aquisição, manutenção e sua pouca representatividade para locais pouco homogêneos, o que torna a utilização de dados de sensores orbitais em conjunto com dados de campo, uma realidade a ser avaliada (OLIVEIRA et al., 2012).

Dados de campo integrados ao sensoriamento remoto (WU et al., 2008; XIAO et al., 2004b; SIMS et al., 2008) tornam possível a criação de modelos representativos para pontos ou locais em que não é possível se obter dados com maior representatividade e baixo custo. O modelo VPM (Vegetation Photosynthesis Model), proposto por XIAO et al (2004c), é um exemplo, que leva em consideração dados micrometeorológicos como temperatura do ar, eficiência do uso da luz ( $\epsilon_0$ ) e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) além de índices de vegetação como EVI (Enhanced Vegetation Index) e LSWI (Land Surface Water Index) obtidos pelo sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a estimativa da GPP de uma floresta de Transição Amazônia Cerrado, por meio do modelo VPM, integrando dados de superfície e dados de sensores orbitais. Os objetivos específicos foram: avaliar a distribuição anual de dados de GPP medido pelo método de correlação de vórtices turbulentos, avaliar a distribuição temporal dos índices de vegetação (EVI e LSWI) e validar o modelo VPM para Florestas de Transição entre a Amazônia e o Cerrado.

Embora o modelo VPM seja validado para florestas tropicais, existe a necessidade de uma validação mais específica para uma floresta de Transição Amazônia Cerrado, o que trará uma enorme contribuição para pesquisas ambientais e formulações políticas.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 FLORESTA DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA CERRADO**

#### **2.1.1 Amazônia**

A Amazônia, localizada na região norte da América do Sul, ocupa mais de 6,5 milhões de quilômetros quadrados e abrange vários países como: Brasil, Venezuela, Colômbia, Peru, Equador, Suriname, Guiana e Guiana Francesa. Sendo que 85% da Amazônia esta em território brasileiro (DALMAGRO, 2009).

A Amazônia Legal, construção geopolítica estabelecida no ano de 1966, ocupa 59% do território nacional e é formada pelos seguintes estados: Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, além de uma parte dos estados de Mato Grosso, Tocantins e Maranhão (LENTINI et al., 2003).

A Amazônia é considerada rica por sua diversidade de fauna e flora. É uma região de papel importante na regulação do clima, do regime hidrológico e do estoque de carbono terrestre.

A maior parte da Amazônia é de floresta, sendo que desta, 12% da região esta sendo alterada pela ação antropica. A região é composta por atividades econômicas que envolvem apenas bens de consumo por meio da exploração de recursos minerais, pesqueiros, agropecuários e o setor madeireiro.

### **2.1.1 Cerrado**

O Cerrado é a maior savana da América do Sul, ocupando parte dos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Bahia, Distrito Federal, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Piauí, Maranhão, Rondônia e de forma esparsa o Amapá, Amazonas, Pará e Roraima.

O Cerrado é considerado uma Savana Tropical, além de ser a mais rica em biodiversidade do mundo, possuindo também três grandes bacias hidrográficas do Brasil.

A vegetação do Cerrado possui um papel importante na manutenção das condições climáticas regionais quando interfere nos processos de reciclagem da água. É formada principalmente por gramíneas, pequenas palmeiras e pequenas árvores de aparência retorcida (CARRILHO, 2011).

No período chuvoso existe grande produção de biomassa, já na estação seca, o acúmulo de biomassa seca acaba favorecendo os incêndios que são recorrentes de práticas agrícolas e pastagens (KLINK e SOLBRIG, 1996).

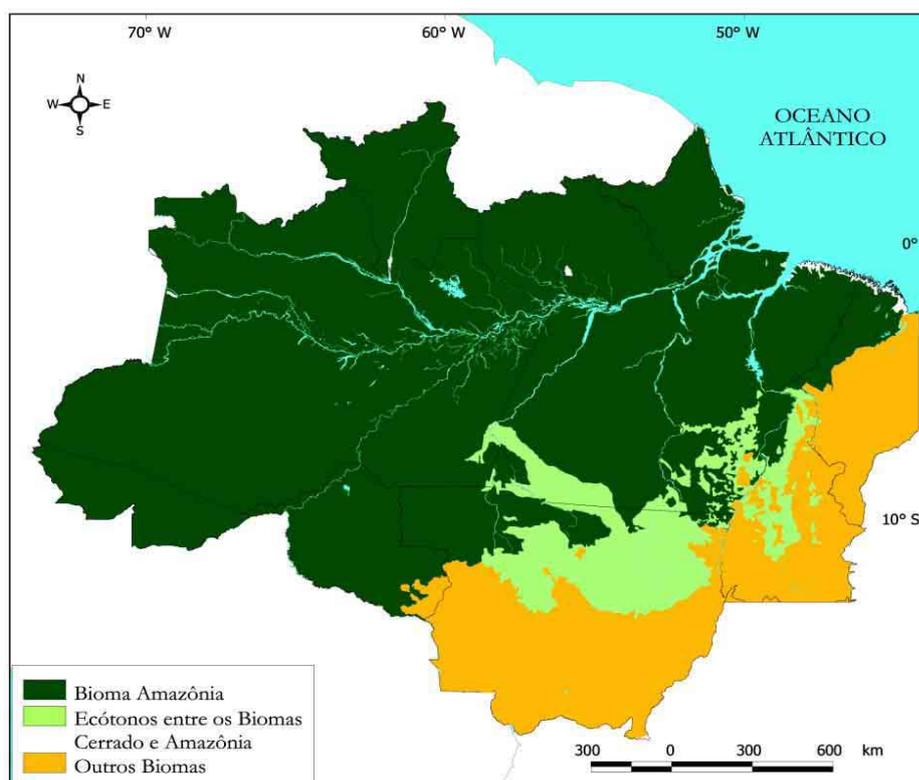
O clima predominante é tropical sazonal, com um inverno seco. A temperatura média é em torno de 22°C, sendo que as máximas podem chegar a mais de 40°C. A precipitação média anual está entre 1200 e 1800 mm e no período de maio a setembro, a quantidade de chuva pode chegar a zero.

### **2.1.2 Floresta de Transição Amazônia Cerrado**

No Brasil, existem dois tipos de floresta de transição: áreas de transição entre a Floresta Amazônica e o Cerrado e/ou Mata Atlântica. No estado de Mato Grosso, que é constituído de três ecossistemas bem distintos: a Amazônia, o Cerrado e o Pantanal, temos uma área de transição entre o clima equatorial úmido e o clima tropical, que compreende em parte da borda sul da Floresta Amazônica.

Localizada a aproximadamente 60 km de Sinop, no noroeste do estado de Mato Grosso, esta é uma região diferenciada e que traz algumas discussões quanto a

sua classificação. Vegetação de transição ou ecótonos, como também é conhecida (Figura 1), é definida como duas vegetações distintas que se misturam, entretanto cada uma conserva suas próprias características (ACKERLY 1989).



**Figura 1-** Ecossistemas da Amazônia.

**Fonte:** LENTINI et al., (2003).

Esta Floresta abrange em média 42% do território mato-grossense e merece atenção, pois nos últimos anos tem sido alvo de uma grande expansão da agricultura e pecuária. Esta situada em uma região conhecida como arco do desmatamento, região esta que têm sofrido mudanças em sua composição e estrutura, provocando mais alterações do microclima, além de ser considerada uma região mais sensível a mudanças climáticas (VOURLITIS et al., 2005; DALMAGRO et al., 2011; MALHI e WRIGHT 2006).

Acredita-se que as florestas de transição Amazônia Cerrado apresentem um fluxo de carbono nulo, pois nesta região ocorre uma liberação de carbono no período seco e uma absorção no período chuvoso. Entretanto com as mudanças climáticas ocorridas nos últimos tempos, como seca prolongada e chuvas em excesso, este ciclo

pode estar sendo alterado (VOURLITIS et al., 2002, 2004; DALMAGRO et al., 2011).

Segundo a classificação de Koppen (1931) o clima da região é do tipo AW, com temperatura do ar de aproximadamente 24 °C e precipitação média de 2000 mm (VOURLITIS et al., 2002), sendo que a precipitação anual ocorre nos meses entre dezembro e março, considerada estação úmida, e os meses de junho a setembro considerados como estação seca.

O solo da região é NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico. Estes solos são bem arenosos, pobres em nutrientes, com alta porosidade e rápida drenagem (VOURLITIS et al., 2002).

## **2.2 PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA**

O balanço líquido de carbono de um determinado ecossistema é resultado do fluxo do carbono tanto da forma orgânica, quanto pela inorgânica, independente da forma temporal e espacial (CHAPIN et al., 2006).

O fluxo destes gases entre o ecossistema e a atmosfera é conhecido como Net Ecosystem Exchange (NEE) e neste caso considera-se todo e qualquer tipo de gases compostos por carbono, até mesmo partículas de carbono presentes em queimadas, deposição vinda da água e intervenção antropogênica (OLIVEIRA, 2010).

Parte deste carbono presente na atmosfera na forma de dióxido de carbono é fixado pela floresta por meio de processos fotossintéticos, sendo que todo o carbono presente neste processo é definido como produção primária bruta (GPP – Gross Primary Production) deste ecossistema (PRENTICE et al, 2001). Em outros termos, GPP consiste na conversão do carbono inorgânico encontrado na atmosfera em carboidrato (substâncias orgânicas) por meio da atividade fotossintética, sendo que este processo depende de três elementos básicos: água, luz e CO<sub>2</sub>.

Parte deste carbono fixado é perdido por meio da respiração do ecossistema (Re), o que inclui organismos autotróficos (Ra) e heterotróficos (Rh). Sendo assim, a

produção líquida de um ecossistema (NEP) é definida como a diferença entre a produção primária bruta e a respiração do ecossistema (equação 1).

$$NEP = GPP - Re \quad (1)$$

Para obter a contribuição líquida apenas dos organismos autotróficos (NPP – Net Primary Production), basta calcular a diferença entre o GPP e a  $R_a$  (CHAPIN et al., 2006).

O GPP pode ser medido por vários métodos, dos quais se destaca a técnica de vórtices turbulentos, muito utilizada para quantificar o fluxo de  $CO_2$  em diversos ecossistemas florestais (BALDOCCHI, 2003) ou por meio de técnicas de sensoriamento remoto, tanto em escala regional como global, relacionando os índices de vegetação a alguns processos ecofisiológicos, como evaporação, transpiração e fotossíntese.

Portanto a medida do GPP leva em consideração fatores como a propriedade fotossintética dos ecossistemas, quantidade de nutrientes, água, luz e  $CO_2$ , fornecendo assim informações importantes quanto ao ambiente e o seu funcionamento, e a resposta do ecossistema quanto às perturbações locais e globais (MALHI & WRIGHT, 2004).

## 2.3 MODIS

O MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) é um sensor a bordo do satélite Terra (EOS AM-1), que foi lançado em 1999 e hoje é considerado o sensor mais importante em mapeamento global. Este observa a Terra em um intervalo de 1 a 2 dias através de 36 bandas espectrais que vão do visível ao infravermelho.

É composto por imagens de 36 faixas espectrais, sendo que sete delas são projetadas para o estudo da vegetação e da superfície terrestre: azul (459-479 nm) –

banda 3, verde (545-565 nm) – banda 4, vermelho (620-670 nm) – banda 1, NIR (841-875 nm, 1230-1250 nm) – banda 2 e 5, e SWIR (1628-1652 nm, 2105-2155 nm) – banda 6 e 7.

O sensor MODIS fornece informações como: temperatura da superfície terrestre, produtividade primária bruta, índice de área foliar, saldo de produção primária, FPAR (Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida) e reflectância da superfície de composição da Terra, tornando-se muito atrativo para simulação de modelos de ecossistemas, pois os produtos gerados pelo sensor MODIS, basicamente quantificam e detectam mudanças na cobertura terrestre.

Estes dados são fornecidos a cada 8 ou 16 dias, dependendo do produto, com resoluções espaciais que variam de 250 a 1000m, corrigidos para os efeitos dos gases atmosféricos, aerossóis e nuvens cirrus fina.

## **2.4 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO ESTIMADOS POR SENSORES ORBITAIS**

Embora sejam encontrados inúmeros índices de vegetação na literatura, uma de suas maiores utilizações esta no estudo da cobertura vegetal, com o objetivo de ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e outros alvos (BRANDÃO et al., 2005).

Os índices de vegetação utilizados em sensoriamento remoto são indicadores da capacidade fotossintética do dossel (VETRITA et al., 2011). Estes índices são resultado da combinação medida da radiação eletromagnética refletida pela vegetação em algumas bandas. Por meio dos produtos da reflectância da superfície (MOD09A1) gerados pelo MODIS, é possível obter alguns índices de vegetação como Enhanced Vegetation Index (EVI) e Land Surface Water Index (LSWI).

Todos estes índices de vegetação são produzidos nas resoluções espaciais de 250 a 1000 m, sendo disponibilizados com uma frequência de 8 dias. O EVI (equação 2) caracteriza a variação sazonal de florestas temperadas (XIAO et al., 2004a, b) e florestas tropicais (XIAO et al., 2005; VOURLITIS, et al., 2011),

também apresenta o quanto de variações ocorrem na altura do dossel. O LSWI (equação 3), proposto por Xiao et al. (2002) é sensível a condição de água na vegetação, ou seja, por meio destes índices de vegetação, é possível monitorar a atividade fotossintética da vegetação, sendo para o presente estudo, a Floresta de Transição Amazônia Cerrado.

$$EVI = 2,5 \cdot \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6 \cdot \rho_{blue} - 7,5 \cdot \rho_{red} + 1} \quad (2)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (3)$$

em que  $\rho_{nir}$ ,  $\rho_{red}$ ,  $\rho_{swir}$  e  $\rho_{blue}$  são as reflectancias do infravermelho próximo, vermelho, infravermelho curto e azul, respectivamente.

## 2.5 RELAÇÃO ENTRE O GPP E OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Utilizando-se de equipamentos que estudam a cobertura vegetal, é possível saber como esta vegetação reage quando interage com a radiação eletromagnética, por meio dos índices de vegetação.

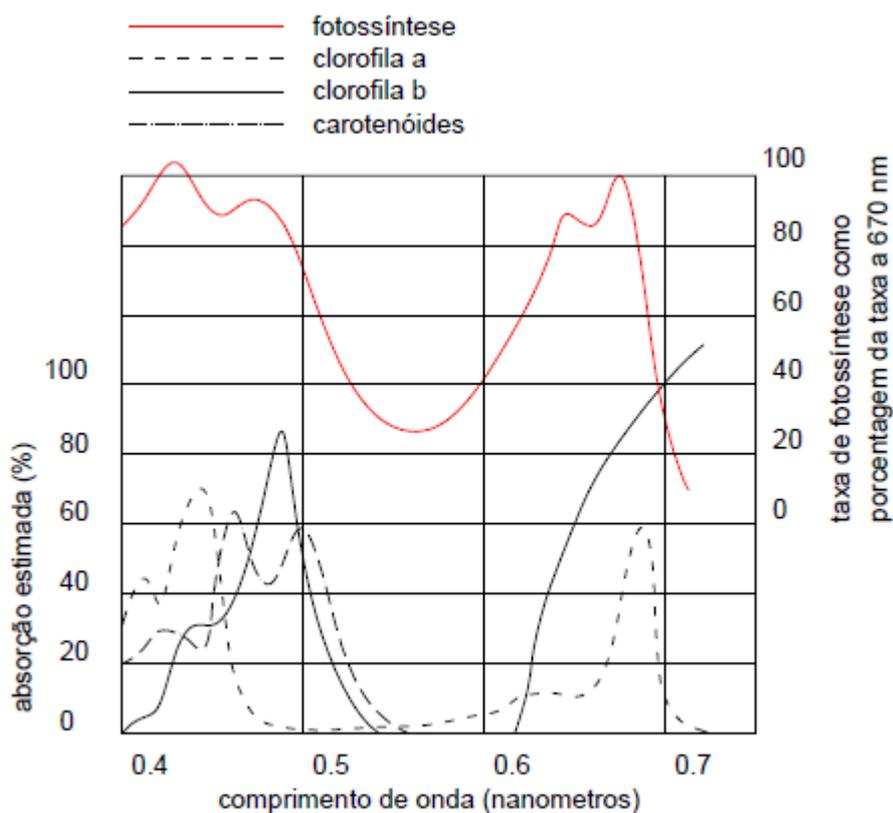
Para se entender o comportamento da vegetação a nível macroscópico é preciso estabelecer uma interação entre a radiação eletromagnética e a folha. Mesmo considerando-se que o albedo pode variar, tem-se um padrão geral para curvas de reflectância das folhas verdes, que é considerado semelhante independente das espécies. Este padrão é controlado pela absorção de moléculas específicas e pela estrutura celular (ARAGÃO, 2004).

Os principais pigmentos fotossintetizantes são a clorofila *a*, clorofila *b* e os carotenoides. O espectro para a ação da fotossíntese é relacionado com a faixa de absorção destes principais pigmentos.

Lembrando também que a disponibilidade de água na folha afeta a resposta espectral da vegetação, pois um índice de vegetação é gerado por uma combinação

entre bandas com a quantidade ou qualidade da vegetação acusada em um pixel de imagem (SULI, 2004).

A estimativa da produtividade primária bruta usando informações de sensoriamento remoto, por meio do modelo VPM, foi desenvolvida para estimar a absorção de luz por clorofila e do GPP dos ecossistemas, baseados no conceito de que o dossel da vegetação é composto por clorofila e vegetação não fotossinteticamente ativa (caule, ramos e principalmente folhagens). Por meio da reflectância espectral da vegetação, é possível estimar FPAR, que integrado a reguladores ambientais, melhora a estimativa de realização da fotossíntese da vegetação, pois proporciona mais informações sobre a estrutura da vegetação, relacionando as mudanças da dinâmica e condições do dossel (WANG et al., 2010).



**Figura 2** - Faixa de absorção dos principais pigmentos e sua relação com a taxa de atividade fotossintética no espectro visível.

Fonte: SULI (2004).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – LOCALIZAÇÃO**

Este trabalho foi realizado no norte do estado de Mato Grosso, em uma área de transição Amazônia Cerrado – na fazenda Maracaí, a 60 Km NE da cidade de Sinop, no qual existia uma torre micrometeorológica instalada de 42 m de altura, coordenada pelo grupo de pesquisa de Física Ambiental – UFMT ( $11^{\circ}24'43.4''S$ :  $55^{\circ}19'25.7''O$ ). Com uma área de cerca de 20 Km<sup>2</sup>, esta região pertence a Amazônia Legal.

A região é de transição entre o cerrado e a floresta tropical úmida, com um clima Aw, segundo a classificação de Köppen, apresentando pouca variação sazonal. Sendo de junho-setembro um período de seca, nos meses de outubro-novembro um período de transição entre seca-úmida, de abril-maio, transição úmida-seca e nos meses de dezembro-março, estação úmida.

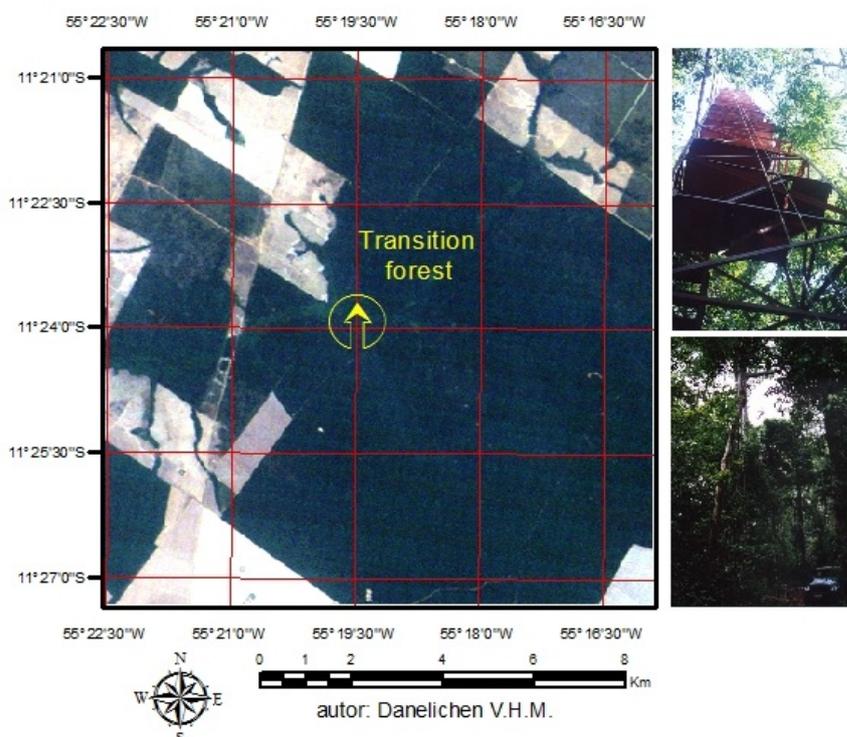
A temperatura média anual é em torno dos 24 °C, de acordo com os últimos 30 anos e a precipitação anual é de 2000 mm (VOURLITIS et al., 2002). O IAF varia de 5-6 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> na estação chuvosa e de 2-2,5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> na estação seca, sendo característica de floresta semi-decídua (VOURLITIS et al., 2002; SANCHES et al., 2008). Na região adjacente a torre instalada no local foi catalogada em média 94 espécies de árvores e 35 famílias de plantas (SANCHES et al., 2008).

O solo da região é NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico, com uma profundidade de 50 cm e textura arenosa com 76,2% de areia, 6,7% de silte e 17,1% de argila (PRIANTE FILHO et al., 2004). Estes solos são bastante arenosos, com baixa concentração de nutrientes, alta porosidade e drenam rapidamente a saturação das chuvas (VOURLITIS et al., 2002).

## 3.2 INSTRUMENTAÇÃO

### 3.2.1 Medida de variáveis ambientais e método de Covariância

As medidas de variáveis ambientais foram realizadas por sensores instalados na torre micrometeorológica de 42 m de altura, localizada na floresta de Transição Amazônia Cerrado a 60 km de Sinop (Figura 3). Os dados foram coletados para um período de quatro anos - julho de 2005 a junho de 2008.



**Figura 3** – Localização da torre micrometeorológica na floresta de Transição Amazônia Cerrado a 60 km de Sinop.

A radiação fotossinteticamente ativa foi medida por meio de um sensor quântico (LI-190SB, LI-COR, Lincoln, NE, USA) e a temperatura do ar por meio de um termohigrômetro (HMP-45 C, Vaisala, Inc., Helsinki, Finland).

A flutuação da velocidade tridimensional do vento foi medida por meio de um anemômetro sônico (CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) e a flutuação da concentração de gás carbônico foi medida por meio de um analisador de gases (LI-7500, LI-COR, Inc. Lincoln, NE, USA), ambos instalados a 42 m de altura.

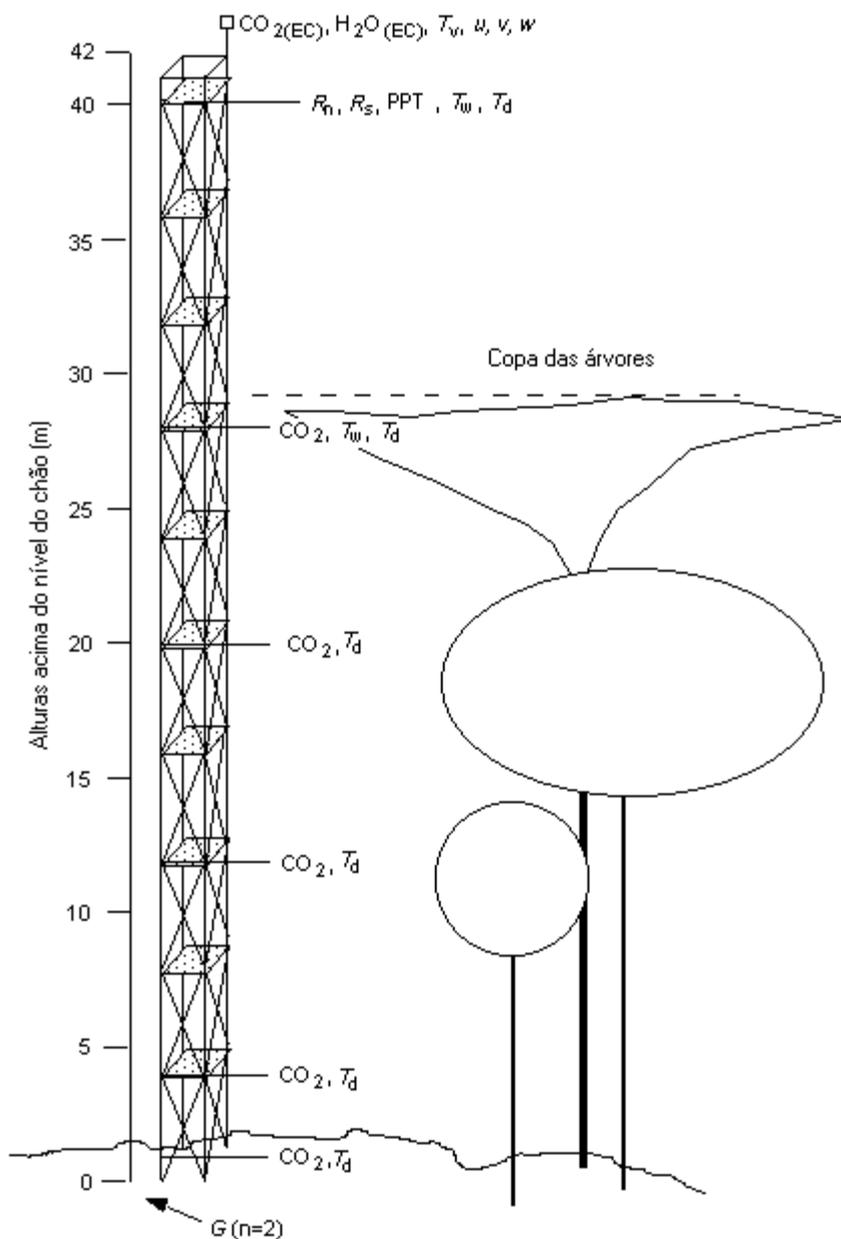
Os dados produzidos por sinais dos transdutores foram processados em uma frequência de 10 Hz e armazenados a cada 30 minutos por um datalogger (CR5000, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA).

Os dados de precipitação foram obtidos diariamente na Fazenda Maracaí por meio de um coletor de chuvas manual localizado a 5 km SE da torre micrometeorológica.

Por meio da técnica de covariância de vórtices turbulentos, foi possível quantificar diretamente as trocas de massa e energia entre a superfície e a atmosfera, por meio do transporte de fluxo turbulento de vapor de água e calor (VOURLITIS et al., 2002).

O fluxo de CO<sub>2</sub> vindo do analisador de gases foi corrigido para flutuações simultâneas de calor e vapor de H<sub>2</sub>O enquanto que o fluxo de vapor de H<sub>2</sub>O foi corrigido para flutuações de fluxo de calor (WEBB et al, 1980). O calor e o vapor de água do dossel foram calculados usando funções empíricas derivadas para a floresta Amazônica, por meio de medições de temperatura e umidade obtidas no topo da torre (MOORE e FISCH, 1996).

A cada hora o NEE foi calculado com a soma do Eddy fluxo de CO<sub>2</sub> e do estoque de CO<sub>2</sub> na copa. Este armazenamento de CO<sub>2</sub> na copa foi determinado pela quantificação da taxa da variação deste dióxido de carbono na coluna de ar entre a superfície do solo e os sensores do sistema (VOURLITIS et al, 2011). Amostras foram feitas a 1, 4, 12, 20 e 28 m acima do nível do solo (Figura 4), utilizando uma bomba de diafragma, um sistema de solenoide de comutação, além do perfil de concentração vertical de CO<sub>2</sub> por meio de um caminho fechado de analisador de CO<sub>2</sub> (LI-820, LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA).



**Figura 4** – Ilustração da torre micrometeorológica de 42 m com informações das posições dos equipamentos.

**Fonte:** ARRUDA (2011).

A produção primária bruta foi estimada pela equação 1, usando diariamente NEE e a respiração do ecossistema. Em todos os pontos de dados em que  $\text{PAR} < 5 \text{ mmol/m}^2\text{s}$  foram considerados como NEE noturno e  $R_e$  diário foi obtido por meio da integração de dados de NEE noturno de meia em meia hora.

O sistema de medição do gradiente foi considerável para 30% ao longo de todas as observações e durante o armazenamento falhas foram quantificadas a partir das medições de CO<sub>2</sub> feitas na parte superior da torre (VOURLITIS et al., 2011).

### **3.2.2 Medidas de variáveis orbitais**

De acordo com o presente trabalho, para simular a produção primária bruta pelo modelo VPM, além dos dados de campo houve a necessidade de integrar juntamente vários produtos do sensor MODIS. Por meio da reflectância da superfície obtive-se alguns índices de vegetação (produto MOD09A1) como o EVI e o LSWI.

Os dados são publicados pelo centro de dados EROS do Active Archive Center (EDC DAAC) com uma frequência de 8 dias e resolução espacial de 500 m.

Como o ruído nos índices de vegetação deve ser baixo e a distância entre a torre e a borda da floresta é maior que 5 km, utiliza-se um grupo 3x3 pixel como garantia de alta qualidade métrica (QA).

Os valores de reflectância da superfície foram em média para os nove pixels que parcialmente cobriam a torre de fluxo. No entanto como a geometria do sensor varia, técnicas de extração de sinais são muitas vezes utilizadas para melhorar o sinal de possíveis ruídos (HERMANCE et al., 2007).

Portanto aplicou-se a Análise de Espectro Singular (ZEILHOFER et al., 2011), utilizando o software catMV, devido sua eficácia para a reconstrução filtrada de séries de tempo curtas, para melhorar a relação sinal-ruído da reflectância da superfície terrestre MODIS.

## **3.3 MÉTODO**

### **3.3.1 Modelo VPM**

O modelo VPM (Vegetation Photosynthesis Model) de Xiao et al. (2004c), é um modelo de LUE - *Light Use Efficiency* (LIU et al., 2011) baseado em estimativas

de satélites, que permite o mapeamento diário da produtividade primária bruta (CHAPIN et al., 2011).

Este modelo utiliza-se de dois índices de vegetação e da eficiência do uso da luz ( $\varepsilon_g$ ) que é descrita por alguns parâmetros reguladores  $T_{esc}$ ,  $W_{esc}$  e  $P_{esc}$  que correspondem à temperatura, água e fenologia da eficiência do uso da luz na vegetação, respectivamente.

$$GPP = \varepsilon_g \cdot FPAR_{chl} \cdot PAR \quad (4)$$

$$FPAR_{chl} = \alpha \cdot EVI \quad (5)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \cdot T_{esc} \cdot W_{esc} \cdot P_{esc} \quad (6)$$

no qual PAR é a radiação fotossinteticamente ativa incidente média do dia, descrita em  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  e  $FPAR_{chl}$  é a fração de PAR absorvida pela planta para a realização da fotossíntese, ou seja, pela clorofila (XIAO et al., 2004a; VETRITA et al., 2011).

É um desafio estimar  $FPAR_{chl}$  com precisão, portanto este modelo utiliza-se de uma função linear de EVI para a estimativa de  $FPAR_{chl}$ , assumindo o coeficiente  $\alpha$  ajustado para 1 (XIAO et al., 2004a; 2003).

A eficiência do uso da luz  $\varepsilon_g$  é descrita em  $\text{gC}/\text{molPAR}$  e deve ser calibrado rigorosamente, pois apresenta grande impacto sobre o modelo, além de ser um fator que varia de acordo com cada vegetação em específico (SIMS et al., 2008; YANG et al., 2007). A  $\varepsilon_g$  de um ecossistema varia principalmente de acordo com a disponibilidade de luz no ambiente (CHAPIN et al., 2011).

Em resposta a esta disponibilidade de luz, as plantas alteram sua condutância estomática, ajustando o fornecimento de  $\text{CO}_2$  para atender as necessidades de fixação de carbono da planta (CHAPIN et al., 2011). No momento em que a capacidade de absorção de luz pela clorofila torna-se saturada, a fotossíntese atinge o seu máximo (CHAPIN et al., 2011).

A estimativa da eficiência máxima do uso da luz  $\varepsilon_0$  é determinado pela escolha do modelo, seja ele linear ou não linear (como por exemplo, hiperbólico) (XIAO et al., 2004b). Como sugerido pelo modelo VPM,  $\varepsilon_0$  é calculado por meio do

NEE em uma função hiperbólica não linear proposta pelo modelo de função de Michaelis-Menten (equação 7).

$$NEE = \frac{\varepsilon_0 \cdot PAR \cdot GPP_{max}}{\varepsilon_0 \cdot PAR + GPP_{max}} - R_e \quad (7)$$

em que NEE é o fluxo dos gases entre a atmosfera e o ecossistema,  $GPP_{max}$  é o valor máximo para GPP estimado por meio dos dados de fluxo, considerado para a capacidade fotossintética máxima como descrito acima, e  $R_e$  é a respiração do ecossistema.

Normalmente para o modelo VPM, utiliza-se um valor fixo para a eficiência do uso da luz, entretanto optou-se em estimar mensalmente  $\varepsilon_0$ , considerando a dinâmica diária do GPP medido pelo método de Eddy Covariance.

O parâmetro  $T_{esc}$  (equação 8) representa a sensibilidade da temperatura a fotossíntese, calculada diariamente pela equação desenvolvida por Terrestrial Ecosystem Model, proposto por RAICH et al. (1991).

$$T_{esc} = \frac{(T - T_{min})(T - T_{max})}{[(T - T_{min})(T - T_{max})] - (T - T_{opt})^2} \quad (8)$$

em que  $T_{min}$ ,  $T_{max}$  e  $T_{opt}$  correspondem a temperatura mínima, máxima e ótima para a fotossíntese respectivamente ( $^{\circ}C$ ). Para situações em que a temperatura do ar esta abaixo da temperatura mínima, admitiu-se  $T_{esc}$  como zero (XIAO et al., 2004b).

A produtividade primária bruta esta ligada a temperatura, pois para que haja fotossíntese, é necessário calor. Para todas as plantas, a atividade fotossintética é mais eficiente dentro de certo limite de temperatura, sendo que acima ou abaixo deste intervalo as reações químicas necessárias para a fotossíntese são inibidas.

Este limite é amplo e varia de vegetação para vegetação. Para a região de Floresta de Transição Amazônia Cerrado admitiu-se  $T_{min}$  como  $2,0^{\circ}C$ ,  $T_{max}$  é  $40,0^{\circ}C$  e  $T_{opt}$  equivale a  $35,1^{\circ}C$ , o que se assemelha aos valores encontrados por Xiao et al. (2005) e Vetrina et al. (2011) para florestas tropicais.

O efeito da água para a fotossíntese da planta,  $W_{esc}$  (equação 9), é calculado em função da umidade do solo e/ou déficit de pressão de vapor, que são fatores altamente determinantes do teor de água na planta e do dossel (XIAO et al., 2003).

$$W_{esc} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}} \quad (9)$$

em que LSWI representa o efeito da água nas plantas para a fotossíntese e  $LSWI_{max}$  o valor máximo para LSWI dentro da estação de crescimento da planta, sendo que para o presente estudo, este foi considerado 0,38. O  $LSWI_{max}$  se deu ao começo da estação chuvosa.

No modelo VPM,  $P_{esc}$  (equação 10) é o efeito da fenologia foliar na fotossíntese do dossel. A idade da folha afeta a capacidade fotossintética e a troca de carbono da floresta. O modelo de cálculo para o modelo VPM não depende da expectativa de vida das folhas (XIAO et al., 2004a).

$$P_{esc} = \frac{1 + LSWI}{2} \quad (10)$$

Para estimar o efeito da fenologia foliar, durante a brotação de expansão das folhas, utiliza-se a equação 10; Entretanto, após a expansão completa da folha, assume-se  $P_{esc} = 1$ .

Pelo estudo ser realizado em uma floresta tropical que apresenta uma cobertura verde o ano todo, admitiu-se  $P_{esc} = 1$ , pois em florestas semidecíduas, existem folhas crescendo e expandindo o tempo todo, ou seja, apresentam folhas de várias idades.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

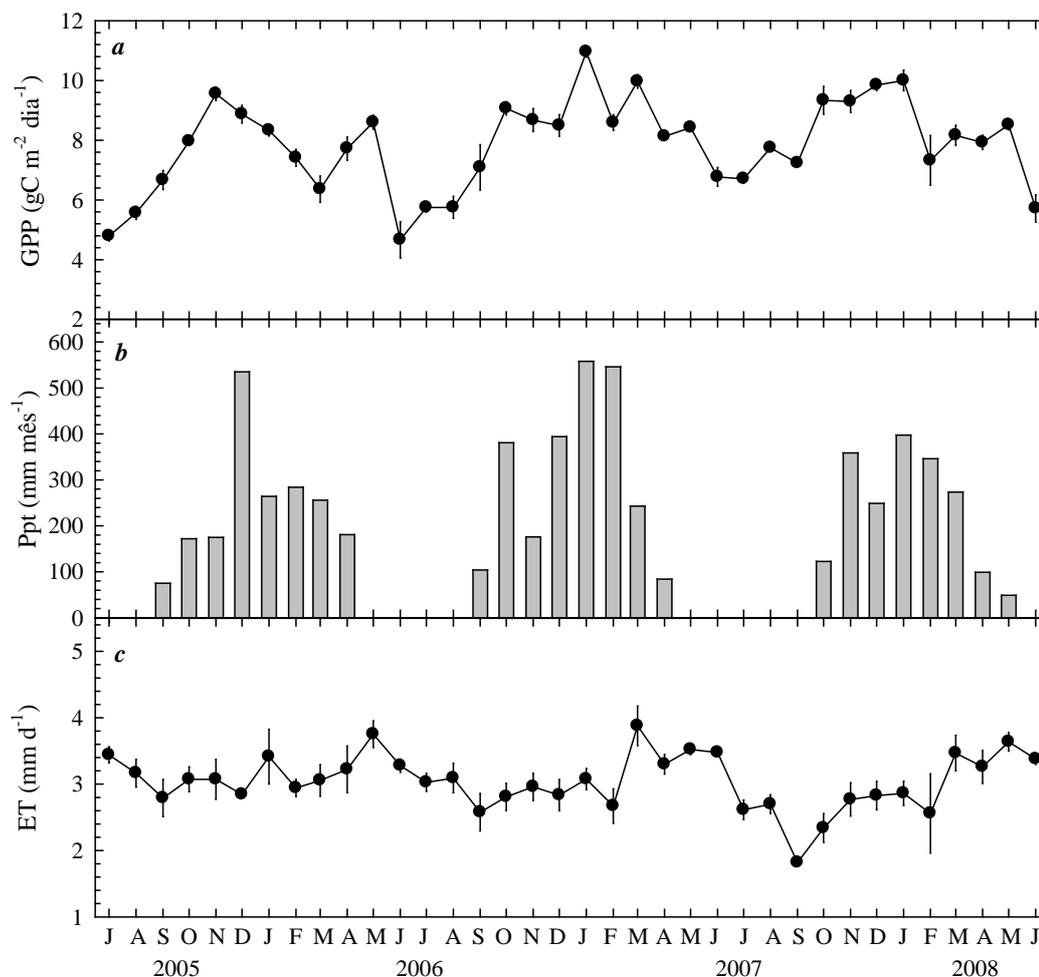
### **4.1 VARIAÇÃO SAZONAL E INTERANUAL DO GPP E DOS DADOS MICROMETEOROLÓGICOS**

Durante o período de estudo, a produtividade primária bruta (GPP) não diferenciou de um ano para o outro, entretanto para o período de 2007-2008 o GPP foi 16% maior que 2005-2006, evidenciando uma possível tendência de aumento ao longo dos anos (Figura 5).

O GPP apresentou sazonalidade, aumentando rapidamente durante a transição do período seco para o chuvoso, sendo 28% maior na estação de chuva. Para os três anos analisados, a dinâmica do GPP apresentou similaridade, com aumento entre os meses de julho e novembro. Houve picos em novembro de 2005-2006, janeiro de 2006-2007 e 2007-2008. Para o período de inverno e seca, tem-se que a atividade fotossintética é inibida em todos os anos.

O GPP teve forte correlação com a precipitação ( $r = 0,64$ ) e apresentou picos bem definidos no período chuvoso. Esta relação entre a disponibilidade de água e a variação do fluxo de carbono também foram encontradas por Vourlitis et al. (2005) para a mesma região de estudo nos anos de 1999 a 2002.

Acredita-se que para ecossistemas tropicais, a alta variabilidade sazonal das chuvas parece estar acoplada a taxa de fotossíntese do sistema (VOURLITIS et al., 2005; SALESKA et al., 2009; VOURLITIS & da ROCHA, 2009).



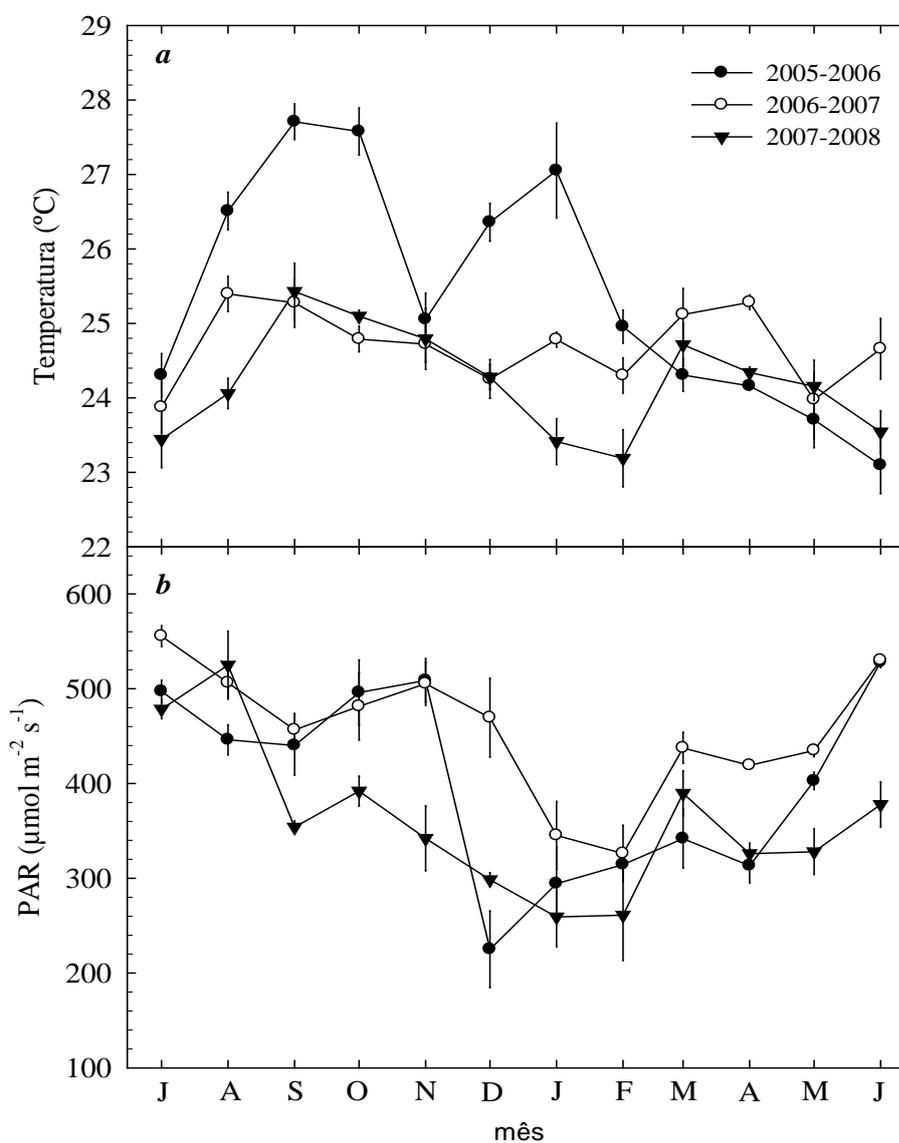
**Figura 5** - (a) Média mensal da produtividade primária bruta (GPP), (b) total mensal de precipitação e (c) média mensal de evapotranspiração de julho de 2005 a junho de 2008.

O total anual da precipitação em 2005-2006 e 2007-2008 foi menor (60-100 mm) que a média histórica de 30 anos da área de estudo (VOURLITIS et al., 2002), enquanto que em 2006-2007 a precipitação foi aproximadamente 500 mm maior que a média histórica.

A maior quantidade de chuva em 2006-2007 foi devido a picos ocorridos em outubro, janeiro e fevereiro (Figura 5). Durante a estação úmida ocorreu uma média

de 96% da precipitação total, pois entre junho e agosto não houve ocorrência de precipitação.

A temperatura do ar foi maior em 2005-2006, não tendo diferença em 2006-2007 e foi menor em 2007-2008 (Figura 6). Em um mesmo ano, a temperatura do ar não apresentou sazonalidade, por isso houve falta de correlação com o GPP. Entretanto, na estação úmida de 2005-2006 observou-se a maior média da temperatura do ar.



**Figura 6-** (a) Média mensal da temperatura do ar e (b) Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) para 2005-2006, 2006-2007 e 2007-2008.

A fotossíntese é um dos processos fisiológicos mais sensíveis ao calor, visto que as altas temperaturas foliares têm sido apontadas por muitos autores, como o principal fator que afeta a fixação de carbono nas diversas etapas do processo (DALMAGRO, 2009), contudo a pouca variação da temperatura ao longo do ano, não é suficiente para explicar a dinâmica do GPP.

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) correlacionou negativamente com o GPP ( $r = -0,39$ ). E os valores anuais de PAR para o período de 2007-2008 se mostraram menores em relação aos outros anos, principalmente no período chuvoso. Os maiores valores de PAR ocorreram em junho e julho, estação seca, devido à maior quantidade de dias de céu claro.

A evapotranspiração (ET) foi praticamente constante ao longo dos 3 anos de estudo, não apresentando variação sazonal e interanual, o que influenciou na falta de correlação entre ET e GPP. Esta consistência temporal da ET pode ser explicada pelo acesso à reserva de água profunda pelas plantas (VOURLITIS et al., 2005).

O conteúdo de água no solo é menor durante a estação seca que na estação úmida (SALESKA et al., 2003; VOURLITIS et al., 2011), no entanto, a ET é ligeiramente maior na estação seca que na estação úmida.

Vourlitis et al. (2008) reportam que a ET e o fluxo de seiva da floresta de transição Amazônia-Cerrado são supridos pelo lençol freático durante toda a estação seca. Devido este acesso à água pelas plantas, os altos valores de déficit de pressão de vapor e radiação durante a estação seca, levam a altas taxas de ET (VOURLITIS et al., 2011).

**Tabela 1** - Precipitação Total e média anual das variáveis, para o período seco e o período chuvoso ( $\pm 95\%$  intervalo de confiança).

Variável	Anual			Seco			Chuvoso		
	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2005-2006	2006-2007	2007-2008
Precipitação (mm)	1942	2486	1895	75	104	49	1867	2382	1846
Temperatura (°C)	25,4 $\pm$ 0,5	24,8 $\pm$ 0,2	24,2 $\pm$ 0,3	25,0 $\pm$ 0,9	24,8 $\pm$ 0,4	24,2 $\pm$ 0,4	25,7 $\pm$ 0,5	24,7 $\pm$ 0,2	24,2 $\pm$ 0,4
PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	396 $\pm$ 33	449 $\pm$ 25	365 $\pm$ 31	459 $\pm$ 26	485 $\pm$ 21	415 $\pm$ 40	355 $\pm$ 45	425 $\pm$ 32	313 $\pm$ 32
ET (mm d <sup>-1</sup> )	2,9 $\pm$ 0,1	2,9 $\pm$ 0,2	2,6 $\pm$ 0,2	3,3 $\pm$ 0,2	3,2 $\pm$ 0,2	2,5 $\pm$ 0,3	3,1 $\pm$ 0,2	3,1 $\pm$ 0,2	2,7 $\pm$ 0,3
GPP (gC m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	7,4 $\pm$ 0,5	8,3 $\pm$ 0,5	8,5 $\pm$ 0,5	6,2 $\pm$ 0,8	7,0 $\pm$ 0,6	7,5 $\pm$ 0,6	8,1 $\pm$ 0,4	9,2 $\pm$ 0,4	9,3 $\pm$ 0,6
LSWI	0,33 $\pm$ 0,01	0,34 $\pm$ 0,01	0,34 $\pm$ 0,01	0,35 $\pm$ 0,01	0,35 $\pm$ 0,01	0,35 $\pm$ 0,01	0,32 $\pm$ 0,01	0,33 $\pm$ 0,01	0,33 $\pm$ 0,01
EVI	0,59 $\pm$ 0,01	0,58 $\pm$ 0,01	0,59 $\pm$ 0,01	0,58 $\pm$ 0,02	0,56 $\pm$ 0,02	0,57 $\pm$ 0,02	0,60 $\pm$ 0,01	0,60 $\pm$ 0,01	0,60 $\pm$ 0,01
T <sub>esc</sub>	0,98 $\pm$ 0,01	0,99 $\pm$ 0,00	1,00 $\pm$ 0,00	0,98 $\pm$ 0,01	0,99 $\pm$ 0,00	1,00 $\pm$ 0,00	0,98 $\pm$ 0,01	1,00 $\pm$ 0,00	1,00 $\pm$ 0,00
W <sub>esc</sub>	0,96 $\pm$ 0,00	0,96 $\pm$ 0,00	0,97 $\pm$ 0,00	0,97 $\pm$ 0,00	0,98 $\pm$ 0,00	0,98 $\pm$ 0,01	0,95 $\pm$ 0,00	0,96 $\pm$ 0,00	0,96 $\pm$ 0,01
$\epsilon_0$	0,47 $\pm$ 0,09	0,51 $\pm$ 0,08	0,68 $\pm$ 0,12	0,28 $\pm$ 0,06	0,31 $\pm$ 0,06	0,44 $\pm$ 0,16	0,62 $\pm$ 0,11	0,63 $\pm$ 0,11	0,86 $\pm$ 0,12
$\epsilon_g$	0,36 $\pm$ 0,07	0,37 $\pm$ 0,06	0,49 $\pm$ 0,09	0,21 $\pm$ 0,05	0,23 $\pm$ 0,04	0,32 $\pm$ 0,11	0,48 $\pm$ 0,09	0,46 $\pm$ 0,08	0,62 $\pm$ 0,07
GPP <sub>VPM</sub> (gC m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	6,6 $\pm$ 0,8	7,9 $\pm$ 0,9	8,5 $\pm$ 1,1	4,7 $\pm$ 1,0	5,3 $\pm$ 0,9	6,3 $\pm$ 1,1	8,0 $\pm$ 0,9	9,6 $\pm$ 1,1	10,0 $\pm$ 1,3

Os intervalos de confiança foram calculados por bootstrap com mais de 1000 interações.

Sendo assim, os menores valores de GPP em 2005-2006, intermediários em 2006-2007 e maiores em 2007-2008 também não foram devido ao stress hídrico provocado pela escassez de água.

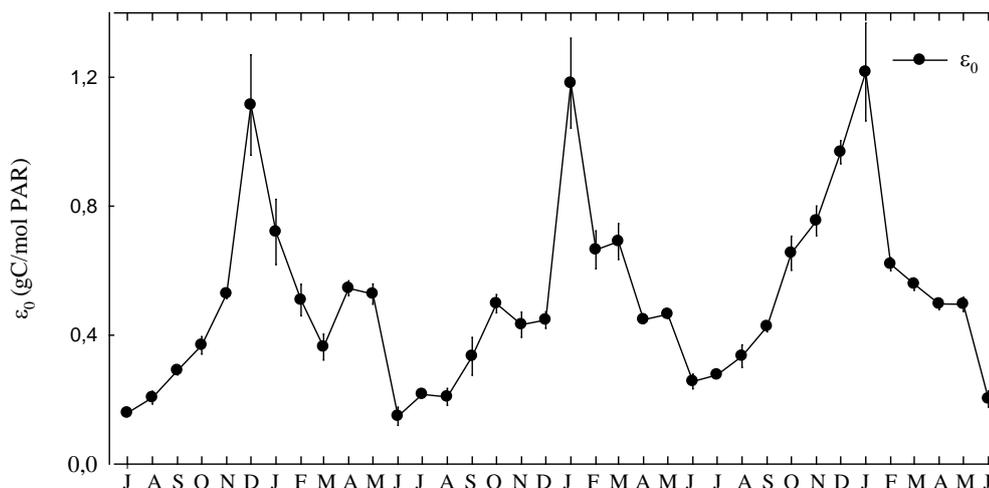
Enquanto a precipitação de 2005-2006 e 2007-2008 pode ser considerada semelhante, a temperatura do ar e PAR, foram bem inferiores para o período de 2007-2008 (Tabela 1), indicando provavelmente que este seja um ano com maior quantidade de cobertura de nuvens (VOURLITIS et al., 2011), podendo explicar as maiores taxas de GPP para 2007-2008.

Considera-se que para ecossistemas naturais, a dinâmica do GPP seja descrito pela dinâmica da temperatura do ar e PAR (YAN et al., 2009; WANG et al., 2010), contudo os resultados apontam que provavelmente a variação interanual ocorreu em função das condições meteorológicas que variaram ao longo do período de estudo na floresta de transição Amazônia-Cerrado, sendo em 2005-2006 seco e quente, em 2006-2007 úmido e quente e em 2007-2008 seco e frio (VOURLITIS et al., 2011).

A estação seca de 2005 é um período de importância, pois retrata uma intensa seca reportada ao sul da bacia amazônica (MARENGO et al., 2008). A ocorrência de severas secas sazonais e interanuais são potencialmente importantes no controle da produtividade de ecossistemas tropicais e nos processos de ciclagem de carbono (SALESKA et al., 2003; VOURLITIS et al., 2004, 2005; VOURLITIS & da ROCHA, 2010).

Como o GPP não foi limitado pela água, provavelmente a fenologia do dossel, que é representada pela eficiência do uso da luz ( $\epsilon_0$ ), tenha influenciado na dinâmica do GPP. A  $\epsilon_0$  aumentou ao longo dos três anos analisados e foi sempre maior na estação úmida que na estação seca (Figura 7).

A  $\epsilon_0$  apresentou as mesmas causas de variação que o GPP medido na torre (Tabela 1), no entanto, com maiores valores de coeficientes de correlação. A  $\epsilon_0$  foi positivamente correlacionada com a precipitação ( $r = 0,77$ ), não correlacionou com a temperatura do ar e foi negativamente correlacionada com a PAR ( $r = -0,77$ ).



**Figura 7** - Média mensal da eficiência do uso da luz  $\epsilon_0$  de julho de 2005 a junho de 2008.

Segundo Vourlitis et al. (2011) e Samanta et al. (2010), em florestas tropicais, devido alta variabilidade sazonal de chuvas, as taxas de fotossíntese e respiração do ecossistema possuem forte correlação com a precipitação. A importância da precipitação para a eficiência do uso da luz também tem sido bem documentada e observada por Sendall et al. (2009) e por Vourlitis et al. (2011) ao estudarem as taxas de fotossíntese e da troca líquida de  $\text{CO}_2$  no ecossistema (NEE).

Tem-se então que a relação negativa entre  $\epsilon_0$  e PAR não é conclusiva, pois há pouca evidência que a eficiência do uso da luz é afetada pela quantidade de radiação (BOARDMAN, 1977). Entretanto, observa-se que a sazonalidade e a interanualidade interferem no balanço de carbono.

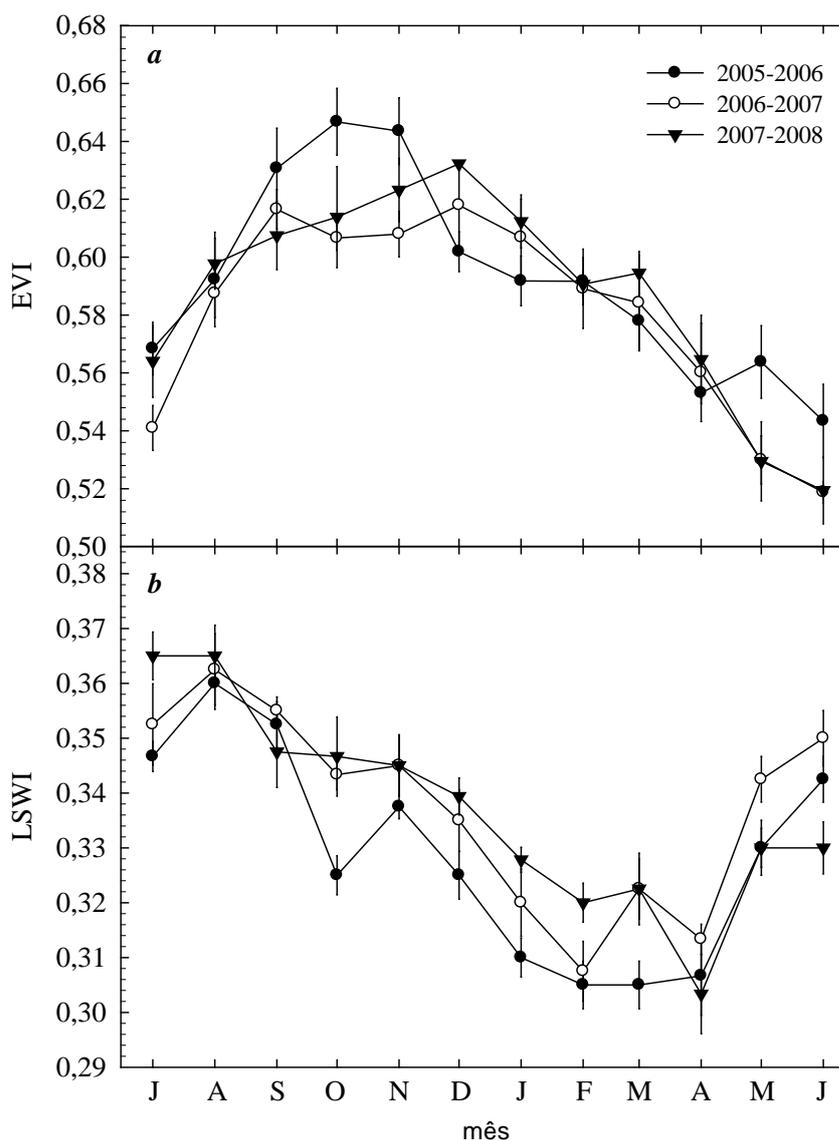
## 4.2 ANÁLISE TEMPORAL DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DO SENSOR MODIS

As médias do EVI e do LSWI não foram diferentes entre os anos, mas houve dinâmica sazonal destes índices. O EVI foi menor durante os meses de estação seca, apresentando em média um aumento de 5% na estação úmida.

O EVI aumenta de junho a novembro, com máximo em novembro de 2005-2006 e em dezembro de 2006-2007 e 2007-2008, declinando após o pico. O LSWI

teve uma distinta dinâmica sazonal, sendo em média 8% maior na estação seca, aumentando entre abril e agosto, com máximos em agosto de todos os anos (Figura 8).

A diferença na dinâmica do EVI e o LSWI foi devido à defasagem de 2 meses entre esses índices, o que influenciou na fraca correlação entre o GPP e o EVI ( $r = 0,44$ ) e o LSWI ( $r = -0,30$ ).



**Figura 8** - (a) Média mensal Enhanced Vegetation Index (EVI) e (b) Land Surface Water Index (LSWI) para 2005-2006, 2006-2007 e 2007-2008.

A relação positiva entre o GPP de florestas tropicais e o EVI está bem documentada e esperada, pois, a dinâmica do EVI está relacionada com a dinâmica

da cobertura do dossel da floresta, que é composto por folhas de diferentes idades (XIAO et al., 2005). Com isso, a refletância espectral é positivamente correlacionada com o IAF, com a concentração de pigmentos fotossintéticos e aos nutrientes presentes na folha (ASNER & MARTIN, 2008).

O EVI esteve correlacionado positivamente com a precipitação ( $r = 0,47$ ). É na estação úmida que ocorre aumento do índice de área foliar (IAF) e conseqüentemente a fotossíntese (VOURLITIS et al, 2004, 2005).

O LSWI tem sido usado para caracterizar condições hídricas da vegetação em estudo, seus maiores valores ocorrem quando há maior disponibilidade de água para o ecossistema (XIAO et al., 2004). Entretanto o LSWI se relacionou negativamente com a precipitação ( $r = -0,48$ ).

Em todos os anos, o maior valor de LSWI ocorreu no mês anterior à ocorrência de precipitação (agosto) e o menor valor de LSWI ocorreu no último mês de ocorrência da precipitação (abril).

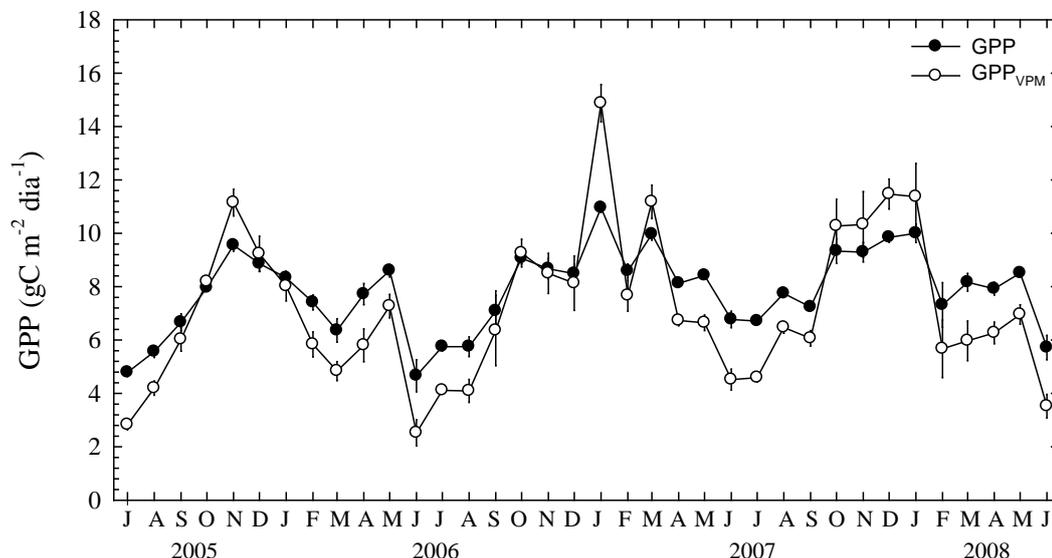
Devido ao dossel da floresta de transição Amazônia-Cerrado ser fechado, os valores das refletâncias medidas pelos sensores orbitais não são diretamente influenciadas pelo conteúdo de água no solo, e sim, pela água nas folhas.

Altos valores de LSWI na estação seca podem ser atribuídos a (1) alta proporção de folhas jovens (com maior conteúdo de água na folha) por meio da fenologia foliar como indicada pela dinâmica sazonal do EVI, e (2) alta espessura d'água equivalente no dossel superior suprido pelo sistema de raízes profundo. Folhas jovens possuem mais conteúdo de água na folha que folhas velhas (ROBERTS et al., 1998). Sendo assim, a dinâmica sazonal do LSWI indica que não houve stress hídrico ao longo da estação seca nos anos analisados.

#### **4.3 ANÁLISE DO MODELO VPM**

A dinâmica sazonal do  $GPP_{VPM}$ , estimado pelo modelo VPM, usando os dados do sensor MODIS e dados microclimáticos da torre micrometeorológica situada na floresta de transição Amazônia-Cerrado, concorda com a dinâmica de

GPP, medido a partir da torre pelo método de Eddy Covariance, tanto em fase, como em magnitude (Figura 9).

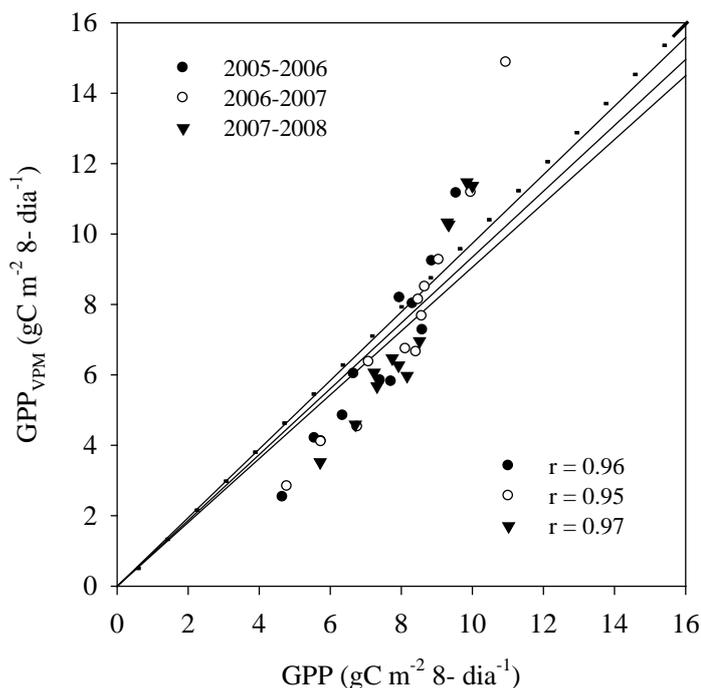


**Figura 9** - Comparação da média mensal entre a produtividade primária bruta estimada (GPP) pelo método de Eddy Covariance e a produtividade primária bruta estimada pelo modelo VPM ( $GPP_{VPM}$ ) de julho de 2005 a junho de 2008.

Em geral, o GPP estimado pelo modelo VPM foi subestimado em média de 10%, com maior subestimativa na estação seca (21,4%) e menor na estação chuvosa (3,5%). Como os escalares  $T_{esc}$ ,  $W_{esc}$  e  $P_{esc}$  não variaram entre os anos e sazonalmente, a subestimativa de GPP na estação seca pode ser devido aos menores valores de EVI entre maio e julho. Como a dinâmica do EVI retrata a fenologia das plantas ao longo do dossel, isto reforça que a fenologia das plantas tem importante influência no cálculo do GPP.

A regressão linear apresentou alta correlação entre o GPP estimado pelo Eddy Covariance e o GPP previsto pelo modelo VPM ( $R^2 = 0,90$ ), com MAE de  $1,66 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , RMSE de  $1,69 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e coeficiente de Willmott-d igual a 0,99.

O GPP anual foi 26,9 Ton/ha, 30,3 Ton/ha e 31,2 Ton/ha e o  $GPP_{VPM}$  anual foi 24,2 Ton/ha, 28,8 Ton/ha e 31,0 Ton/ha em 2005-2006, 2006-2007 e 2007-2008, respectivamente.



**Figura 10** - Relação da média de 8 dias da produtividade primária bruta estimada pelo Eddy Covariance (GPP) e a produtividade primária bruta estimada pelo modelo VPM ( $GPP_{VPM}$ ).

Alguns possíveis erros podem ser atribuídos aos dados de entrada climática e os índices de vegetação. A comparação entre o GPP e  $GPP_{VPM}$  mostrou que a estimativa da produtividade pelo modelo VPM concorda muito bem com a estimativa de GPP em florestas de Transição Amazônia Cerrado.

Este estudo explorou o potencial de utilização dos índices de vegetação (EVI e LSWI) em conjunto com dados micrometeorológicos para caracterizar a interanualidade e a sazonalidade do GPP. Além disso, demonstrou o potencial do modelo VPM na estimativa do GPP. Um ponto importante a ser levado em consideração na avaliação do modelo VPM, é a dinâmica da  $\epsilon_0$  que foi levada em consideração, pois em geral, utiliza-se da média da  $\epsilon_0$  na estimativa do GPP (XIAO et al., 2005; WU et al., 2010; WANG et al., 2010).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produtividade primária bruta estimada por meio do método de Eddy Covariance apresentou uma dinâmica sazonal, com valores maiores no período chuvoso e menores no período de seca, entretanto apresenta pouca variação de um ano subsequente para outro.

O mesmo acontece com os índices de vegetação para a região, que também apresentaram pouca variação ao longo dos anos, sendo um dos motivos o fato de se tratar de uma floresta.

Conclui-se que o estudo avaliou o potencial do modelo VPM para Florestas de Transição entre a Amazônia e o Cerrado. Apresentou fortes correlações entre as estimativas encontradas pelo método de Eddy Covariance e o modelo proposto, contudo a estimativa e a avaliação sazonal é apenas uma etapa para o estudo do ciclo de carbono para florestas, havendo a necessidade de realização de pesquisas futuras para entender melhor as interações em regiões de transição, como a Floresta Amazônia Cerrado.

## **5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Análise de outras técnicas de sensoriamento remoto, buscando melhores resultados para a estimativa de GPP;
- Estudos mais aprofundados com uma série maior de dados temporais;
- Aumentar o número de estações representando diferentes tipos de cobertura vegetal no estado de Mato Grosso.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERLY, D. D.; THOMAS, W. W.; FERREIRA, C. A. C; PIRANI, J. R. The forest–cerrado transition zone in southern Amazonia: results of the 1985 Projecto Flora Amazonica Expedition to Mato Grosso. **Brittonia**. Vol. 41, p.113–128. 1989.

ARAGÃO, L. E. O. C. **Modelagem dos padrões temporal e espacial da produtividade primária bruta na região do Tapajós: uma análise multi-escala**. 283p. Tese (Doutorado Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2004.

ARRUDA, J. C. **Estudo do fechamento do balanço de energia pelo método de Covariância de Vórtices Turbulentos em uma Floresta de Transição em Mato Grosso** 134p. (Tese Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

ASNER, G.P. E MARTIN R.E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. **Remote Sensing of Environment**. Vol. 112, p. 3958-3970. 2008.

BALDOCCHI, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**. Vol.9, p.479-492. 2003.

BERNOUX, M., CARVALHO, M.S., VOLKOFF, B., CERRI, C.C.. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**. Vol. 66, N. 3, p. 888-896. 2002.

BOARDMAN, N. K. Comparative photosynthesis of sun and shade plants. **Annual Review of Plant Physiology**. Vol. 28, p. 355-377. 1977.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; FREIRE, E. C.; SILVA, B. B. 2005. Determinação de índices de vegetação usando imagens de satélite para agricultura de precisão. In: V Congresso Brasileiro de Algodão. Salvador, Bahia. Agosto, 2005.

CARRILHO, S. B. P. **Avaliação de modelos para estimativa da radiação de onda longa atmosférica no Cerrado Mato-Grossense**. 133 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011

CHAPIN, F.S, WOODWELL, G.M, RANDERSON, J.T, RASTETTER, E.B, LOVETT, G.M, BALDOCCHI D.D, CLARK, D.A, HARMON, M.E, SCHIMEL, D.S, VALENTINI, R, WIRTH C, ABER J.D, COLE, J.J, GOULDEN M.L, HARDEN J.W, HEIMANN M, HOWARTH, R.W, MATSON P.A, MCGUIRE A.D, MELILLO J.M, MOONEY H.A, NEFF J.C, HOUGHTON R.A, PACE M.L, RYAN M.G, RUNNING S.W, SALA O.E, SCHLESINGER W.H, SCHULZE E.D. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. **Ecosystems**. Vol 9, p. 1041-1050. 2006

CHAPIN, F. S.; MATSON, P. A.; MOONEY, H. A. **PRINCIPLES OF TERRESTRIAL ECOSYSTEM ECOLOGY**. 2 Edição. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011. 546p.

DALMAGRO, H. J. **Dinâmica da Assimilação do Carbono em *Brosimum lactescens* S Moore (Moraceae) na Floresta de Transição Amazônia-Cerrado**, 2009. 75 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá 2009.

DALMAGRO, J.H.; ALMEIDA LOBO, F.; ORTÍZ, C. E. R.; BIUDES, M. S.; NOGUEIRA, J. S.; VOURLITIS, G. L.; PINTO JUNIOR, O. B. Trocas gasosas de uma espécie Lenhosa na floresta de transição Amazônia - cerrado. **Ciência e Natura**, Vol. 33, N. 2, p. 147-165, 2011.

EROS do Active Archive Center. In: EDC DAAC. **Base de dados MODIS**. Disponível em: [http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ\\_1\\_Glb/modis\\_subset\\_order\\_global\\_col5.pl](http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ_1_Glb/modis_subset_order_global_col5.pl). Acesso em: 20 de setembro de 2012.

HERMANCE, J. F., JACOB, R. W., BRADLEY, B. A., MUSTARD, J. F. MUSTARD. Extracting phenological signals from multiyear A VHRR NDVI time series: Framework for applying high-order annual splines. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Society.**, Vol. 45, N. 10, p. 3264- 3276. 2007.

KLINK, C. A. & SOLBRIG, O. T. **Biodiversidad y Funcionamiento de Pastizales y Sabanas e América Latina**. SARMIENTO, G. & CABIDO, M. (eds). CYTED y CIELAT, Venezuela, 1996.

LENTINI, M; VERÍSSIMO, A; SOBRAL, L. **Fatos Florestais da Amazônia 2003**. Belém. Imazon, 110 p. 2003.

LIU, J. ;SUN O.J., JIN, H., ZHOU, Z. E HAN, X. Application of two remote sensing GPP algorithms at a semiarid grassland site of North China. **Journal of Plant Ecology**. Vol 4, N. 4, p. 302–312. 2011.

LOSOS, E. C. & LEIGH, JR. E. G. (Eds). 2004. **Tropical forest diversity and dynamism: findings from a large-scale plot network**. Chicago, IL: University of Chicago Press. 2004.

MAHADEVAN, P. WOFSEY, S. C., MATROSS, D. M., XIAO, X., DUNN, A. L., LIN, J. C., GERBIG, C., MUNGER, J. W., CHOW, V. Y., GOTTLIEB, E. W. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM). **Global Biogeochemical Cycles**. Vol. 22. 2008.

MALHI, Y.; WRIGHT, J.; Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **Philosophical Transactions of The Royal Society B**. Vol. 359, N 1434, p. 311-329. 2004.

MARENGO, J. A., C. A. NOBRE, J. TOMASELLA, M. D. OYAMA, G. S. DE OLIVEIRA, R. DE OLIVEIRA, H. CAMARGO, L. M. ALVES, AND I. F. BROWN. The drought of Amazonia in 2005. **Journal Climate**. Vol. 21, N.3, p. 495–516. 2008.

MARIANO, R.T.G. **Análise Espectral de séries temporais de variáveis microclimatológicas em uma área de ecótono entre os biomas Amazônia e Cerrado no norte de Mato Grosso**, 2008. 83 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá 2008.

MOORE, C. J.; G. F. FISCH. Estimating heat storage in Amazonian tropical forest. **Agricultural Forest Meteorology**. Vol. 38, p.147–169. 1996.

NEPSTAD, D.C.; STICKLER, C.M.; SOARES-FILHO, B.; MERRY, F. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. **Philosophical Transactions of The Royal Society B**. Vol. 363, N. 1498, p.1737-1746. 2008.

OLIVEIRA, C. L. **Estimativa da dinâmica de carbono na biomassa lenhosa de terra-firme na reserva de desenvolvimento sustentável Amanã por métodos dendrocronológicos.** 53 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Instituto de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2009.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; DANTAS, A. C.; SILVA, B. B.; MACHADO, C. C. C.; GALVÍNCIO, J. D. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográficas obtidos por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** Vol.47, N. 9, p.1209-1217.2012.

PRENTICE, I. C., FARQUHAR, G. D., FASHAM, M. J. R., GOULDEN, M. L., HEIMANN, M., JARAMILLO, V. J., KHESHGI, H. S., LEQUERE, C., SCHOLES, R. J. E WALLACE, D.W. R. 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis.* (eds. HOUGHTON, J. T. DING, Y. GRIGGS, D. J. NOGUER, M. VAN DER LINDEN, P. J. DAI, X. MASKELL, K. e JOHNSON, C. A.). Cambridge University Press, Cambridge. 2001. p. 183-237.

PRIANTE FILHO, N.; VOURLITIS, G.L.; HAYASHI, M.M.S.; NOGUEIRA, J.S. DE, CAMPELO JR, J.H.; NUNES, P.C.; SANCHES, L.; COUTO, E.G.; HOEGER, W.; RAITER, F.; TRIENWEILER, J.L.; MIRANDA, E.J.; PRIANTE, P.C.; PEREIRA, L.C.; BIUDES, M.S.; FRITZEN, C.L.; LACERDA, M.; SULI, G.S.; SHIRAIWA, S.; SILVEIRA, M. 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.** Vol. 10, p. 863-876. 2004.

RAICH, J. W., RASTETTER, E. B., MELILLO, J. M., KICKLIGHTER, D. W., STEUDLER, P. A., PETERSON, B. J., GRACE, A. L., MOORE III, B., e VOROSMARTY, J. Potential net primary productivity in South-America-application of a global-model. **Ecological Applications.** Vol. 1, N. 4, p.399– 429. 1991.

ROBERTS, D. A., NELSON, B. W., ADAMS, J. B., e PALMER, F. Spectral changes with leaf aging in Amazon caatinga. *Trees-Structure and Function. Biomedical and life sciences*. Vol. 12, N. 6, p. 315– 325. 1998.

SAATCHI, S.S.; HARRIS, N.L.; BROWN, S. LEFSKY, M.; MITCHARD, E.T.A.; SALAS, W.; ZUTTA, B.R.; BUERMANN, W.; LEWIS, S.L.; HAGEN, S.; PETROVA, S.; WHITE, L.; SILMAN, M.; MOREL, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **PNAS**, Vol. 108, N. 24, p. 9899-9904, 2011.

SALESKA SR, MILLER SD, MATROSS DM, GOULDEN ML, WOFSY SC, ROCHA HR, CAMARGO PB, CRILL P, DAUBE BC, FREITAS HC, HUTYRA L, KELLER M, KIRCHHOFF V, MENTON M, MUNGER JW, HAMMIND-PYLE E, RICE AH E SILVA H. Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**. Vol. 302, N. 5650, p. 1554-1557. 2003.

SAMANTA, A., GANGULY, S. HASHIMOTO, H. DEVADIGA, S. VERMOTE, E. KNYAZIKHIN, Y. NEMANI, R. R. e MYNENI, R. B. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. **Geophysical Research Letters**. Vol. 37, p. 1- 5. 2010.

SANCHES, L.; VALENTINI, C. M. A.; PINTO JUNIOR, O. B.; NOGUEIRA, J. S.; VOURLITIS, G. L.; BIUDES, M. S.; SILVA, C. J.; BAMBI, P.; ALMEIDA LOBO, F. Seasonal and interannual litter dynamics of a tropical semideciduous forest of the southern Amazon Basin, Brazil. **Journal of geophysical research**. Vol. 113, N. 113, p. 1-9. 2008.

SANCHES, L.; VALENTINI, C.M.A.; BIUDES, M.S.; NOGUEIRA, J.S. Dinâmica sazonal da produção e decomposição de serapilheira em floresta tropical de transição. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Vol. 13, N. 2, p. 183-189. 2009.

SENDALL, M.M., VOURLITIS, G.L. E ALMEIDA LOBO F. Seasonal variation in the maximum rate of leaf gas exchange of canopy and understory tree species in an Amazonian semi-deciduous forest. **Brazilian Journal of Plant Physiology**. Vol. 21, p. 65-74. 2009.

SIMS, D. A., RAHMAN, A. F., CORDOVA, V. D., EL-MASRI, B. Z., BALDOCCHI, D. D., BOLSTAD, P. V., Flanagan, L.B., Goldstein, A.H., Hollinger, D.Y., Misson, L. Monson, R.K., Oechel, W.C., Schmid, S.P., Wofsy, S.C., Xu, L. A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS. **Remote Sensing of Environment**. Vol 112, p.1633–1646. 2008.

SIRIKUL, N. **Comparison of MODIS vegetation index products with biophysical and flux tower measurements**. 181 p. Dissertação (Department of Soil, Water and Environmental Science) – University of Arizona. 2007.

STAGAKIS, S.; MARKOS, N.; LEVIZOU, E.; KYPARISSIS, A. Forest ecosystem dynamics using spot and modis satellite images. In: ENVISAT SYMPOSIUM 2007. Montreux, Switzerland. July, 2007.

SULI, G. S. **Comparações empíricas entre medições multiespectrais de sistemas sensores e índices de área foliar verde em floresta amazônica de transição**. 2004. 90p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá 2004.

VETRITA, Y.; CHAOYANG, W.; ZHENG, N.; HIRANO, T. Evaluation of light use efficiency model using modis in tropical peat swamp forest, Indonesia. In: Second cresos International Symposium on south east Asia environmental problems and satellite remote sensing, 2011, Indonesia, 2011, p. 127-134.

VOURLITIS, G.L. et al. Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil. **Water Resources Research**, Vol. 38, N. 6, p. 1-11, 2002.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S.; NOGUEIRA, J. de S.; RAITER, F.; HOEGER, W.; CAMPELO JR, J. H. Effects of meteorological variations of the CO<sub>2</sub> exchange of a Brazilian transitional tropical Forest. **Ecological Applications**. Vol. 14, N. 4, p. 89-100. 2004.

VOURLITIS, G.L., NOGUEIRA, J.S. PRIANTE-FILHO, N. HOEGER, W. RAITER, F. BIUDES, M.S. ARRUDA, J.C. CAPISTRANO, V.B. FARIA J.L.B. e ALMEIDA LOBO, F. The sensitivity of diel CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O vapor exchange of a tropical transitional forest to seasonal variation in meteorology and water availability. **Earth Interactions**. Vol. 9, p. 9-27. 2005

VOURLITIS, G.L. E DA ROCHA, H. R. Flux dynamics in the Cerrado and Cerrado-Forest Transition of Brazil. 2010. In: Ecosystem Function in Global Savannas: Measurement and Modeling at Landscape to Global Scales. (eds. Hill, M.J. e Hanan, NP). Boca Raton, FL, USA. 2010. p. 97-116.

VOURLITIS, G.L.; LOBO, F.A.; ZEIHLOFER, P.; NOGUEIRA, J.S. Temporal patterns of net CO<sub>2</sub> exchange for a tropical semi-deciduous forest of the southern Amazon Basin. **Journal of Geophysical Research**. Vol.116, p. 1-15. 2011.

WANG, Z.; XIAO, X.; YAN, X. Modeling gross primary production of maize cropland and degraded grassland in northeastern China. **Agricultural and Forest Meteorology**. Vol. 150, N 15, p.1160–1167. 2010.

WEBB, E.K.; G.I. PEARMAN; LEUNING, R. Corrections of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. Vol. 106, N. 447, p. 85-100. 1980.

WU, C., MUNGER, J. W., NIU, Z., DA KUANG. Comparison of multiple models for estimating gross primary production using MODIS and eddy covariance data in Harvard Forest. **Remote Sensing of Environment**. Vol. 114, N 12, p. 2925–2939. 2010.

XIAO, X., BOLES, S., LIU, J. Y., ZHUANG, D. F.; LIU, M. L. Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data. **Remote Sensing of Environment**. Vol 82, p. 335– 348. 2002.

XIAO, X., BRASWELL, B., ZHANG, Q., BOLES, S., FROLKING, S., MOORE, B. Sensitivity of vegetation indices to atmospheric aerosols: Continental- scale observations in northern Asia. **Remote Sensing of Environment**. Vol 84, p. 385– 392. 2003.

XIAO, X.; ZHANG, Q.; HOLLINGER, D.; ABER, J.; MOORE III, B. Modeling seasonal dynamics of gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS images and climate data. **Ecological Applications**. Vol. 15, N. 3, p. 954-969. 2004a.

XIAO, X.; ZHANG, Q.; BRASWELL, B.; URBANSKI, S.; BOLES, S.; WOFSY, S.; MOORE III, B.; OJIMA, D. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. **Remote Sensing of Environment**. Vol. 91, N. 2, p. 256–270. 2004b.

XIAO, X., HOLLINGER, D., ABER, J., GOLTZ, M., DAVIDSON, E.A., ZHANG, Q., MOORE, B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. **Remote Sensing of Environment**. Vol. 89, N. 4, p. 519–534. 2004c.

XIAO, X.; ZHANG, Q.; SALESKA, S.; HUTYRA, L.; DE CAMARGO, P.; WOFSY, S.; FROLKING, S.; BOLES, S.; KELLER, M.; MOORE B. Satellite-based Modeling of Gross Primary Production in a Seasonally Moist Tropical Evergreen Forest. **Remote Sensing of Environment**. Vol. 94, N 1, p.105– 122. 2005.

YANG, F. H., ICHII, K., WHITE, M. A., HASHIMOTO, H., MICHAELIS, A. R., VOTAVA, P., ZHU, A. X., Huete, A. Running, S. W., Nemani, R.R. Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through Support Vector Machine approach. **Remote Sensing of Environment**. Vol. 110, p. 109–122. 2007.

ZEILHOFER, P., SANCHES, L., VOURLITIS, G. L., ANDRADE, N. L. R. Seasonal variations in litter production and its relation with MODIS vegetation indices in a semi-deciduous forest of Mato Grosso. **Remote Sensing Letters**. Vol. 3, N. 1, p. 1-9. 2011.