

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

**Produtividade Primária Bruta na Amazônia Legal:
relação com variáveis meteorológicas e validação do
produto MOD17A2**

Catherine Torres de Almeida

2016



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

**PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA NA AMAZÔNIA LEGAL: RELAÇÃO COM
VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E VALIDAÇÃO DO PRODUTO MOD17A2**

CATHERINE TORRES DE ALMEIDA

Sob a Orientação do Professor

Rafael Coll Delgado

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

CATHERINE TORRES DE ALMEIDA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 17/02/2016.

Rafael Coll Delgado. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Vicente Paulo Soares. Dr. UFV

Mauro Antonio Homem Antunes. Dr. UFRRJ

A meus avós, Anizio Pereira Torres e Maria Aparecida Carlos Torres.
Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por me dar as condições de crescer como pessoa e também pelo incentivo aos estudos desde minha infância.

A meu companheiro, José Ricardo de O. Nascimento Júnior, por sempre estar ao meu lado me apoiando e fornecendo suas valiosas opiniões que serviram como toque final para este trabalho.

A meus amigos, pelos momentos de descontração.

A meu orientador, Rafael Coll Delgado, por estar disponível a todo instante para esclarecer dúvidas, dar conselhos e dicas, por apresentar-me a proposta desta dissertação e pela oportunidade do mestrado, do qual levarei muitos aprendizados.

A todos meus professores, por compartilharem parte de seus conhecimentos comigo e por contribuírem para a melhoria da educação no Brasil.

Aos funcionários da Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais, que tornaram possível a efetivação do meu mestrado.

À banca examinadora, pelo aceite na participação desta etapa e no enriquecimento deste trabalho.

A Mauro Antonio Homem Antunes, pela atenção, dicas e simpatia.

À María Concepción Ramos, pela valiosa orientação que me iniciou nesta linha de pesquisa.

Aos colegas do LSRACA, pela troca de informações e experiências.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao CNPq, pelo financiamento do projeto relacionado a este estudo.

À UFRRJ, pelo apoio institucional.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipologias do bioma amazônico. Fonte: MMA (2014).	6
Figura 2. Ciclo global do carbono com estoques (em Pg C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano ⁻¹). Fonte: MACHADO, 2005.....	7
Figura 3. Distribuição espacial da PPB anual mediana (gC m ⁻² ano ⁻¹). Fonte: BEER et al., 2010.	9
Figura 4. Localização das EMC's e dos pontos do TRMM mais próximos a estas.	16
Figura 5. Precipitação pluvial mensal (mm) de janeiro de 2004 a dezembro de 2008: comparação entre TRMM e EMC's nos sete municípios avaliados.....	19
Figura 6. Diagrama de dispersão individual para cada localidade estudada (a-g) e geral, considerando todos os dados conjuntamente (h).	20
Figura 7. Média da precipitação pluvial total anual (mm) e do erro anual (mm) para todas as EMC's.....	21
Figura 8. Área de estudo e localização das torres micrometeorológicas.....	26
Figura 9. Classes de uso e cobertura do solo (ano 2005) do produto MODIS 500m Land Cover (IGBP Type 1) das áreas K34, K67 e K83. O número 2 representa a classe de floresta ombrófila sempre verde. Fonte: ORNL DAAC, 2012.....	28
Figura 10. Classes de uso e cobertura do solo (ano 2005) do produto MODIS 500m Land Cover (IGBP Type 1) da área K77. O número 2 representa a classe de floresta ombrófila sempre verde; 8, savanas lenhosas e 14, área agrícola/mosaico de vegetação natural. Fonte: ORNL DAAC, 2012.....	28
Figura 11. Classes de uso e cobertura do solo (ano 2005) do produto MODIS 500m Land Cover (IGBP Type 1) da área RJA. O número 2 representa a classe de floresta ombrófila sempre verde; 5, florestas mistas; 9, savanas; 11, zonas permanentemente úmidas e 14, área agrícola/mosaico de vegetação natural. Fonte: ORNL DAAC, 2012.....	29
Figura 12. Classes de uso e cobertura do solo (ano 2005) do produto MODIS 500m Land Cover (IGBP Type 1) da área FNS. O número 9 representa a classe de savana e 14, de área agrícola/mosaico de vegetação natural. Fonte: ORNL DAAC, 2012.....	29
Figura 13. Classes de uso e cobertura do solo (ano 2005) do produto MODIS 500m Land Cover (IGBP Type 1) da área BAN. O número 2 representa a classe de floresta ombrófila sempre verde; 4, floresta ombrófila decídua; 5, florestas mistas; 8, savanas lenhosas e 11, zonas permanentemente úmidas. Fonte: ORNL DAAC, 2012.....	30
Figura 14. Distribuição dos dados de PPB _{EC} para cada torre.	32

Figura 15. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em K34.....	34
Figura 16. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em K67.....	35
Figura 17. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em K83.....	35
Figura 18. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em K77.....	36
Figura 19. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em BAN.....	36
Figura 20. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em RJA.....	37
Figura 21. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em FNS.....	37
Figura 22. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre K34.....	38
Figura 23. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre K67. ¹	39
Figura 24. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre K83. ¹	39
Figura 25. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre K77. ¹	40
Figura 26. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre BAN. ¹	40
Figura 27. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre RJA. ¹	41
Figura 28. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre FNS. ¹	41
Figura 29. Diagrama de dispersão entre R_{TOA} e PPB_{EC} para a estação seca (acima) e chuvosa (abaixo) das torres em estudo.....	42
Figura 30. Árvore de regressão para estimativa da PPB média a partir das variáveis ambientais.....	43

Figura 31. Comparação entre a média anual da PPB da torre e das versões 5.0 (a) e 5.1 (b) do MOD17A2.....	52
Figura 32. Boxplot da PPB derivada da torre (a) e das duas versões do MODIS (b-c) para cada localidade estudada.	53
Figura 33. PPB média ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) das torres (linha contínua preta), do MOD17A2 versão 5.0 (linha tracejada azul) e do MOD17A2 versão 5.1 (linha tracejada vermelha).	54
Figura 34. Erro médio mensal com desvio-padrão da estimativa das duas versões do MOD17A2 para as sete áreas avaliadas.	55
Figura 35. Relação do erro com a PPB_{EC} para as sete áreas na estação seca (em vermelho) e chuvosa (em azul).	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição das torres de fluxo de carbono utilizadas neste trabalho.	27
Tabela 2. Estatísticas descritivas da PPB ($\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) de cada torre.	32
Tabela 3. Correlação de Spearman entre PPB_{EC} e variáveis meteorológicas.	42
Tabela 4. Variabilidade interanual da PPB_{EC} e da PPB estimada pelo MOD17A2 ($\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	51
Tabela 5. Erro médio ($\text{gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), REMQ ($\text{gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e coeficiente de correlação de Spearman entre a PPB das torres e das duas versões do MOD17A2.	52

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APAR - Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pela Fotossíntese (do inglês, *Absorbed Photosynthetically Active Solar Radiation*)
AVHRR - *Advanced Very High Resolution Radiometer*
BPLUT - *Biome Parameter Look-up Table*
CO₂ - Dióxido de carbono
DOY - dia do ano
 ϵ_{\max} - Máxima Eficiência de Uso da Luz
EM - Erro Médio
EMC - Estações Meteorológicas Convencionais
ENOS - El Niño-Oscilação Sul
FAPAR - Fração Absorvida da Radiação Fotossinteticamente Ativa (do inglês, *Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*)
GEE - Gases de Efeito Estufa
GMAO - *Global Modeling and Assimilation Office*
HDF - *Hierarchical Data Format*
IGBP - *International Geosphere Biosphere Programme*
JAXA - *National Space Development Agency of Japan*
Landsat - *Land Remote Sensing Satellite*
LBA - *Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*
LUE - Eficiência de Uso da Luz
MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
MRT - *Modis Reprojection Tool*
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
NCEP-DOE - *National Center for Environmental Prediction-Department of Energy*
PAR - Radiação Fotossinteticamente Ativa (do inglês, *Photosynthetically Active Radiation*)
PPB - Produtividade Primária Bruta
PPB_{EC} - PPB derivada do método de covariância de vórtices turbulentos
PPB_{MOD5.0} - PPB derivada da versão 5.0 do algoritmo MOD17A2
PPB_{MOD5.1} - PPB derivada da versão 5.1 do algoritmo MOD17A2
PPL - Produção Primária Líquida
r - Coeficiente de correlação de Pearson
rho - Coeficiente de correlação de Spearman
R_a - Respiração Autotrófica
R_e - Respiração do Ecossistema
R_h - Respiração Heterotrófica
REMQ - Raiz do Erro Médio Quadrático
R_{TOA} - Radiação no Topo da Atmosfera
SR - Sensoriamento Remoto
SWR_i - Radiação de onda curta incidente (do inglês, *Incoming Short-wave Radiation*)
Tmin - Temperatura do ar mínima
TRMM - *Tropical Rainfall Measuring Mission*
TSM - Temperatura da Superfície do Mar
VPD - Déficit de Pressão de Vapor D'água
WGS 84 - *World Geodetic System 84*

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	1
GENERAL ABSTRACT.....	2
INTRODUÇÃO GERAL	3
REVISÃO DE LITERATURA.....	5
1. Tipos de vegetação da Amazônia.....	5
2. O Ciclo do Carbono e as Mudanças Climáticas	6
3. Métodos de Estimativa do Carbono Florestal	9
CAPÍTULO I: Comparação das Estimativas de Precipitação do Produto 3B43-TRMM com dados de Estações Meteorológicas Convencionais do Estado do Amazonas ..	11
RESUMO.....	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1. Caracterização da área de estudo	14
2.2. Dados de superfície e de satélite	15
2.3. Validação das estimativas do satélite.....	16
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4. CONCLUSÃO.....	21
CAPÍTULO II: Variabilidade da Produtividade Primária Bruta estimada pelo método de covariância de vórtices turbulentos e sua relação com o uso e cobertura do solo e variáveis meteorológicas	22
RESUMO.....	23
ABSTRACT	24
1 INTRODUÇÃO	25
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
2.1. Caracterização da Área de Estudo	25
2.2. Dados e análise estatística.....	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4. CONCLUSÃO	44
CAPÍTULO III: Validação do produto MOD17A2 para a Amazônia Legal com base em dados de torres micrometeorológicas	45
RESUMO.....	46
ABSTRACT	47
1. INTRODUÇÃO	48
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	49
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4 CONCLUSÃO	56
CONCLUSÕES GERAIS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

RESUMO GERAL

A Produtividade Primária Bruta (PPB) é a taxa na qual o CO₂ atmosférico é convertido pela atividade fotossintética em substâncias orgânicas e é uma medida do total de carbono fixado pelo ecossistema. No contexto das mudanças climáticas, o enfoque para a fixação de carbono pelos ecossistemas florestais é a base para mitigar as emissões de CO₂ antropogênico. Existem diversos métodos destinados à quantificação do carbono estocado na vegetação, que utilizam dados obtidos por meio de torres micrometeorológicas de fluxo ou através de sensoriamento remoto. Dentre esses métodos, se destaca a técnica de covariância de vórtices turbulentos, por ser muito empregada para quantificar o fluxo de CO₂ em diversos ecossistemas florestais. Porém, esta técnica possui um custo alto, operacionalidade restrita e abrange uma pequena extensão. Nesse sentido, os métodos que empregam o sensoriamento remoto têm a vantagem de fornecer estimativas de produtividade primária terrestre para grandes áreas, onde os métodos ao nível do terreno não são viáveis. Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a dinâmica da PPB na Amazônia Legal brasileira em relação ao uso e cobertura do solo e às variáveis meteorológicas. Para compreender a relação da PPB obtida pelo método de covariância de vórtices turbulentos com dados meteorológicos, foram utilizados dados de chuva do produto 3B43 do satélite TRMM e variáveis ambientais das torres de fluxo. Os dados do satélite TRMM foram validados com dados de sete estações meteorológicas convencionais do estado do Amazonas. A comparação foi baseada no Erro Médio (EM), Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ), coeficiente de correlação linear (r) e índice de concordância de Wilmott (d). Também utilizou-se o coeficiente de correlação de Spearman e um modelo de árvore de regressão para avaliar a relação entre a PPB da torre de fluxo e as variáveis ambientais. Para avaliar as estimativas de PPB de duas versões do produto MOD17A2, derivadas de dados do sensor MODIS, estas foram validadas com dados de superfície de sete torres de fluxo do Projeto LBA, das quais quatro se encontram em cobertura florestal, uma em floresta de transição e duas em áreas antropizadas. As análises estatísticas foram realizadas no software R, versão 3.1.0. Os resultados da validação do produto 3B43 do TRMM foram positivos, com alta correlação linear ($r = 0,83$), alto índice de concordância ($d = 0,85$) e REMQ satisfatório (59,77 mm), mostrando que este produto pode ser utilizado como uma fonte alternativa de dados de qualidade. Em relação à influência do uso e da cobertura do solo na PPB, verificou-se que as áreas antropizadas apresentaram menor produtividade em relação às áreas conservadas e tiveram seu balanço hídrico afetado, pois apresentaram altos valores da razão de Bowen. A sazonalidade da PPB foi predominantemente relacionada à radiação no topo da atmosfera nas áreas de floresta da Amazônia equatorial. Nas áreas mais distantes do Equador, a PPB foi influenciada pela radiação no topo da atmosfera e também pela chuva e VPD, indicando limitação tanto pela radiação quanto pela disponibilidade de água. O MOD17A2 não apresentou boa estimativa de PPB comparado ao método de vórtices turbulentos, subestimando a produtividade para a maioria das localidades estudadas. A sazonalidade da PPB deste algoritmo somente foi similar à sazonalidade da PPB pelo método de vórtices turbulentos para as localidades não-equatoriais. As áreas na Amazônia Equatorial apresentaram padrão sazonal da PPB do MOD17A2 distinto do verificado pelos dados das torres micrometeorológicas. Diante disto, é necessário melhorar o algoritmo MOD17A2 para que este possa estimar PPB em função das diferentes respostas da vegetação à seca e à radiação. Esse melhor entendimento poderá contribuir para produzir melhores estimativas da PPB para a Amazônia e o uso do sensoriamento remoto em conjunto com os dados de superfície pode contribuir para gerar uma visão geral da PPB nesse bioma.

Palavras-chave: Amazônia, Produtividade Primária Bruta, Sensoriamento Remoto.

GENERAL ABSTRACT

The Gross Primary Productivity (GPP) is the rate at the atmospheric CO₂ is converted by photosynthetic activity in organic substances and is a measure of the total carbon fixed by the ecosystem. In the context of climate change, the focus for the fixation of carbon by forest ecosystems is the basis to mitigate emissions of anthropogenic CO₂. There are several methods for the quantification of carbon stored in the vegetation, using data obtained by micrometeorological towers or by remote sensing. Among these methods, stands out the eddy covariance technique, that is much used to quantify the CO₂ flux in many forest ecosystems. However, this technique has a high cost, limited operation and covers a small extent. Accordingly, the methods that employ remote sensing have the advantage of providing terrestrial primary productivity estimates for large areas where the methods at the field level are not feasible. This work has as main objective to evaluate the dynamics of the GPP in the Brazilian Legal Amazon over land use and land cover and weather variables. For understanding the relationship of the eddy covariance GPP with meteorological data, rainfall data from TRMM 3B43 product and environmental variables of flux towers were used. Data from TRMM satellite were validated with data from seven conventional weather stations of Amazonas state. The comparison was based on the Average Error (AE), Root Mean Square Error (RMSE), linear correlation coefficient (r) and Wilmott agreement index (d). We also used the Spearman correlation coefficient and a regression tree model to assess the relationship between flux tower GPP and environmental variables. To evaluate GPP estimates from two versions of the MOD17A2 product, derived from MODIS sensor data, these have been validated with surface data from seven LBA flux towers, of which four are in forest cover, one in transition forest and two in disturbed areas. The statistical analyzes were performed with R software, version 3.1.0. The results of the validation of TRMM 3B43 were positive, with high linear correlation ($r = 0.83$), high level of agreement ($d = 0.85$) and an adequate RMSE (59.77 mm), showing that this product can be used as an alternative source of quality data. Regarding the influence of the land use and land cover in GPP, it was found that the disturbed areas had lower productivity compared to the conserved areas and had their water balance affected, presenting higher values of the Bowen ratio. The GPP seasonality was predominantly related to radiation at the top of the atmosphere in forest areas of the equatorial Amazon. In areas more distant of the Ecuador, the GPP was influenced by radiation at the top of the atmosphere and also by rainfall and VPD, indicating limitation both by radiation and by water availability. MOD17A2 had no satisfactory agreement between in estimating GPP compared to the method of eddy covariance, underestimating productivity for most locations studied. The seasonality derived from the MODIS algorithm was only similar to the seasonality of GPP by eddy covariance method for non-equatorial locations. The areas in Equatorial Amazon exhibit distinct MOD17A2 GPP seasonal pattern of that verified by data from the micrometeorological towers. Given this, it is necessary to improve the MOD17A2 algorithm to enable it to estimate GPP depending on the different vegetation responses to drought and radiation. This improved understanding may help to produce better estimates of GPP in Amazon and the use of remote sensing in conjunction with the surface data can contribute to generate an overview of GPP in this biome.

Keywords: Amazon, Gross Primary Productivity, Remote Sensing.

INTRODUÇÃO GERAL

Alterações globais do clima tem sido verificadas durante o último século, principalmente pelo aumento da temperatura média global do ar de 0,85°C no período 1880-2012 (IPCC, 2014). A principal causa atribuída ao aquecimento global é o aumento de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera desde o período pré-industrial até a atualidade. As mudanças climáticas podem desencadear impactos ambientais, sociais e econômicos, como extinção de espécies (MACLEAN e WILSON, 2011), modificações na distribuição geográfica e fenologia de algumas espécies (PARMESAN e YOHE, 2003; MILES et al., 2004), alteração da mortalidade e produtividade das florestas (BRANDO et al., 2014), aumento na distribuição e prevalência de doenças (PATZ et al., 2005; LAFFERTY, 2009), prejuízos na agricultura (NELSON et al., 2009), ocorrências de incêndios florestais e queimadas (SWETNAM e ANDERSON, 2008; CAÚLA et al., 2015), dentre outros (CONRADO, 2006).

As florestas desempenham um papel importante na mitigação das mudanças climáticas, atuando como um estoque de carbono por meio de sua produtividade primária. A PPB é a taxa em que produtores de um ecossistema convertem energia solar em energia química, através da fotossíntese (CHAPIN III et al., 2002). O conhecimento da PPB é importante para estudos das mudanças climáticas, já que a PPB está diretamente relacionada ao carbono efetivamente extraído da atmosfera pelos diferentes ecossistemas terrestres.

Estudos na região Amazônica são particularmente importantes devido ao papel crucial de sua vasta floresta tropical no estoque de carbono, na regulação do clima regional e global (MARENGO e BETTS, 2011) e na manutenção de sua rica biodiversidade (SFB, 2010). Além disso, essa região está submetida a mudanças no uso e cobertura do solo, como incêndios florestais e desmatamento, podendo tornar-se fonte de carbono para a atmosfera e modificar os fluxos superficiais de energia, padrões da circulação atmosférica, regimes de chuva e temperatura da superfície continental (LEJEUNE et al., 2015), potencializando os impactos das mudanças climáticas.

A chuva é uma importante variável meteorológica a ser analisada na região Amazônica, pois influencia nas características e comportamentos de outros parâmetros (AGUIAR et al., 2006). Estudos relatam que mudanças no regime hídrico Amazônico, especialmente na estação seca, podem induzir importantes alterações nesse ecossistema terrestre (MALHI et al., 2008; MALHI et al., 2009a; VOLDOIRE e ROYER, 2004).

Devido à importância da PPB no balanço global de carbono e da Amazônia enquanto região estratégica nesse processo, estudos têm sido realizados na tentativa de compreender a dinâmica da produtividade do ecossistema Amazônico (MALHI et al., 2009b; MERCADO et al., 2011; LI et al., 2011; MARTHEWS et al., 2012). A metodologia de covariância de vórtices turbulentos, que utiliza torres micrometeorológicas, é comumente utilizada para analisar os fluxos de carbono a nível de ecossistema, possibilitando o entendimento dos mecanismos ecológicos, atmosféricos e climáticos que regulam a PPB (SALESKA et al., 2009). No entanto, são poucas as torres de fluxo existentes na Amazônia em relação à sua grande extensão, o que limita o entendimento da PPB em diferentes tipos de usos e coberturas do solo e gradações ambientais.

O uso das técnicas de sensoriamento remoto (SR) tem sido uma alternativa viável em estudos ambientais e climáticos, pois possibilita uma visão de grande escala espacial e continuidade no tempo. Dessa forma, essas técnicas podem ser empregadas para complementar os estudos relativos à PPB nos ecossistemas florestais, possibilitando um melhor entendimento dos mecanismos importantes para o futuro das florestas amazônicas (SALESKA et al., 2009). Apesar de sua potencialidade, observações pontuais de superfície dos fluxos de energia e carbono ainda são necessárias para validar os modelos derivados do

SR. Dessa forma, é por meio da conjunção de observações a partir do SR juntamente com uma rede terrestre, que se poderá compreender melhor o balanço de carbono da floresta Amazônica e seus padrões de resiliência e vulnerabilidade em resposta à mudança climática.

Diante do exposto, este trabalho foi dividido em três capítulos com o objetivo geral de avaliar a dinâmica da produtividade primária bruta na Amazônia Legal em relação aos diferentes tipos de usos e coberturas do solo e à variabilidade climática, bem como avaliar a estimativa da PPB derivada de dados de sensoriamento remoto. No capítulo 1, dados de precipitação pluvial do produto 3B43 do TRMM foram validados com dados de estações meteorológicas convencionais, visando a utilizar este produto para determinar a estação seca e úmida na Amazônia. No capítulo 2, analisou-se a variabilidade da PPB em diferentes tipos de usos e coberturas do solo (floresta, ecótono e áreas antropizadas de pastagem e plantio agrícola) e em relação às variáveis meteorológicas. O capítulo 3 teve como objetivo validar as estimativas de PPB do produto MOD17A2 derivado do sensor MODIS, através da comparação com dados de PPB obtidos pelo método de covariância de vórtices turbulentos.

REVISÃO DE LITERATURA

1. Tipos de vegetação da Amazônia

A história da fitogeografia brasileira é antiga e teve início com a classificação do naturalista alemão Carl Friedrich Philipp von Martius, em 1824, que usou nomes de divindades gregas para sua divisão botânica. Após Martius, houve várias tentativas de novas classificações, sem que nenhuma alcançasse completa aceitação e consenso (IBGE, 2012a).

O Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012a) classifica a Região Florística Amazônica em quatro principais tipos de vegetação: Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Sempre-Verde e Campinarana. A Floresta Ombrófila Densa caracteriza-se por fanerófitos, lianas e epífitas em abundância. Esta formação está condicionada à ocorrência de temperaturas elevadas, em média 25°C, e altos índices de chuva, bem distribuídas durante o ano, cujo período seco varia de 0 a 60 dias, o que determina uma situação bioecológica praticamente sem período biologicamente seco. Este tipo de vegetação foi subdividido em cinco faciações ordenadas segundo a hierarquia topográfica que refletem fisionomias diferentes de acordo com as variações ecotípicas das faixas altimétricas (IBGE, 2012a).

A Floresta Ombrófila Aberta é considerada um tipo de transição da floresta ombrófila densa, caracterizando-se por gradientes climáticos com mais de 60 dias secos. Possui quatro faciações florísticas: com cipó, nas áreas de depressões circulares do embasamento pré-cambriano; com palmeiras, em terrenos areníticos que ocorre por toda a Amazônia e até mesmo fora dela; com bambu, que ocorre da parte ocidental da Amazônia até o planalto meridional do Estado do Paraná (ocupando geralmente as áreas onde foram exploradas espécies nobres); com sororoca (*Phenakosperma guyanensis*) no sul da bacia Amazônica, no médio rio Xingu, ocorrendo em depressões que ficam temporariamente inundadas e em pequenas áreas onde predominam solos do tipo Latossolo Vermelho-amarelo (IBGE, 2012a; EMBRAPA, 2014).

A Floresta Estacional Sempre-Verde que tem como área *core* o extenso Planalto dos Parecis, constituído por sedimentos cretácicos e terciário-quadernários, se estende, de forma disjunta, até as Depressões dos Rios Paraguai, Guaporé e Araguaia, sobre terrenos sedimentares quadernários e em algumas superfícies periféricas aplanadas. Apresenta uma baixa riqueza de espécies quando comparada às florestas do entorno, sejam as Ombrófilas (Densa e Aberta) ao norte ou a Estacional Semidecidual ao sul (IBGE, 2012a; EMBRAPA, 2014).

Nos terrenos com solos arenosos muito lixiviados, situados no norte da Amazônia, dentro das Bacias dos Rios Negro, Orinoco e Branco, ocorre a Campinarana (Campinas). É uma formação vegetal de clímax edáfico, com ambientes capeados por Espodossolos que condicionam uma vegetação oligotrófica raquítica. Este tipo de vegetação ocorre predominantemente em áreas fronteiriças da Colômbia e Venezuela, nas Bacias dos Rios Negro e Branco, e sob a forma de disjunções por toda a Amazônia, adaptado ao solo Espodossolo. As campinaranas ocorrem em áreas planas e alagadas, e apresentam fisionomia bastante variada, desde formações campestres até florestais, com árvores finas (EMBRAPA, 2014). A Figura 1 apresenta as tipologias do bioma amazônico segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014).

Segundo Leitão Filho (1987), a Amazônia é composta por uma série contínua de formações vegetais que são, floristicamente bastante distintas. Pires (1972) aponta a ocorrência de nove tipos principais de vegetação na Amazônia, sendo que as chamadas Matas de Terra Firme ocupam cerca de 90% da área de toda a região, representando, de longe, o ecossistema mais conspícuo e o de maior interesse científico. A floresta Amazônica de Terra

Firme é um ecossistema que apresenta uma diversidade florística muito elevada, via de regra, maior que os demais ecossistemas florestais do mundo.

Coutinho (2006) defende que os biomas que compõem o domínio morfoclimático e fitogeográfico amazônico, na verdade, não são constituídos por um único tipo de floresta, por um único bioma, em toda sua vastíssima extensão. Segundo este autor, ali existem diferentes tipos de biomas, como a floresta de terra-firme, um bioma de floresta tropical pluvial do Zonobioma I, que predomina; a floresta de igapó, inundável, um bioma de floresta pluvial tropical do hidrobioma I; as caatingas do Rio Negro, um bioma de savana arenosa, distrófica, inundável do psamopeino-hidrobioma I; os campos rupestres, como os dos picos das serras, nas fronteiras com países vizinhos, um litobioma do Orobioma I, e etc. O domínio amazônico não é, portanto, um bioma único, mas sim um mosaico de biomas.

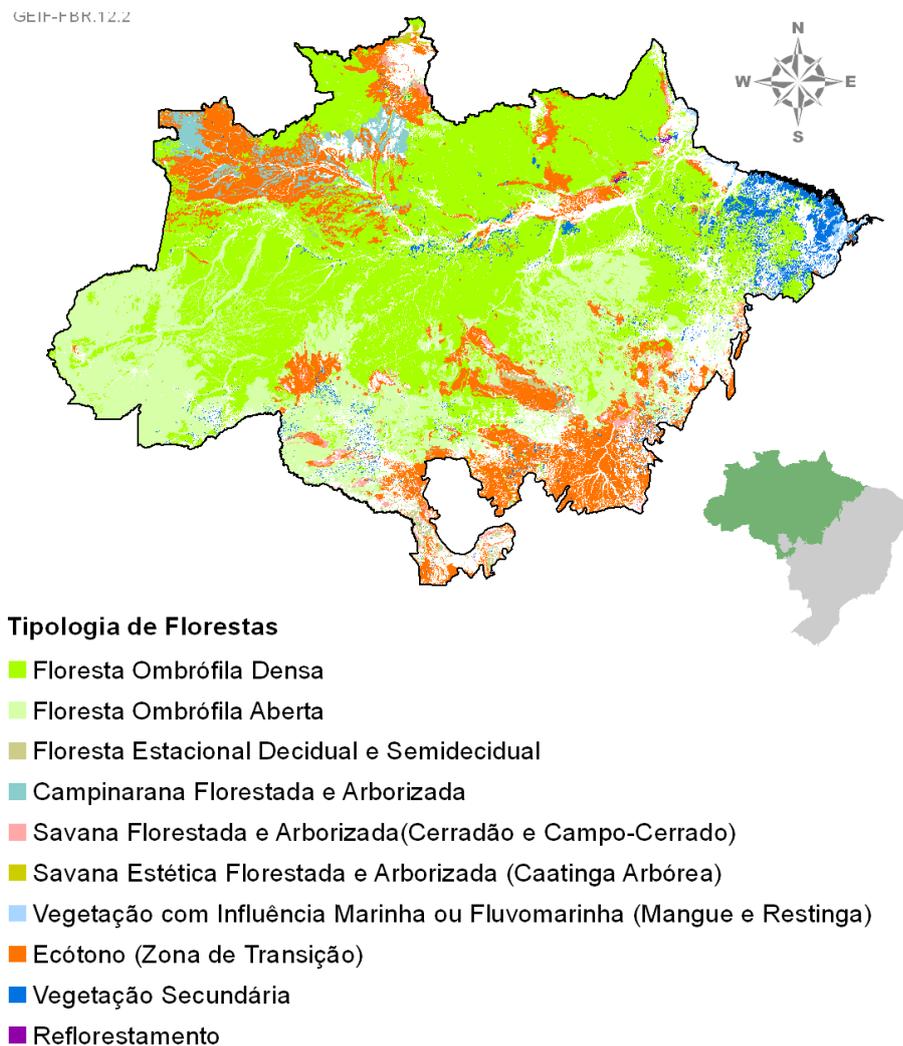


Figura 1. Tipologias do bioma amazônico. Fonte: MMA (2014).

2. O Ciclo do Carbono e as Mudanças Climáticas

O carbono é essencial para a existência da vida, pois participa da composição química de todos os componentes orgânicos atualmente conhecidos (RAMPELOTTO, 2012). O ciclo do carbono consiste no fluxo deste elemento químico entre os diferentes componentes da Terra (atmosfera, oceano, biosfera e litosfera) e pode ser dividido em dois domínios: o primeiro é constituído por rápidos fluxos de troca, através de ciclagem entre os organismos e

o ambiente. O segundo domínio consiste de fluxos lentos entre rochas e sedimentos com o primeiro domínio, através de emissões vulcânicas, intemperismo químico, erosão e formação de sedimentos no fundo do mar (CIAIS et al., 2013).

Na escala global, os principais reservatórios de carbono atualmente são os oceanos, seguidos pelas formações geológicas, os solos, a atmosfera e a vegetação (MACHADO, 2005), como representado na Figura 2. Na atmosfera, o carbono se encontra principalmente na forma de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4), que ocorrem em pequenas concentrações, mas são essenciais ao aquecimento natural da terra, por atuarem como GEE (MARTINS et al., 2003). Apesar de o depósito de carbono atmosférico ser pequeno em relação aos demais reservatórios, ele é muito ativo e vulnerável às perturbações provocadas pelo homem (ODUM, 1983).

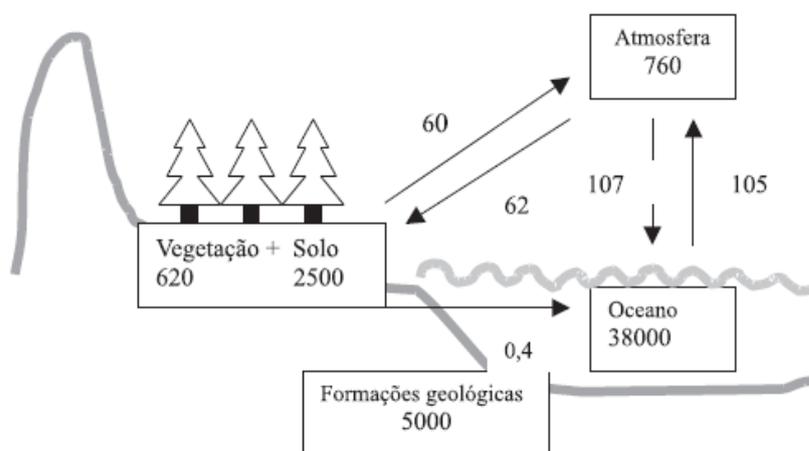


Figura 2. Ciclo global do carbono com estoques (em Pg C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano⁻¹). Fonte: MACHADO, 2005.

A transferência de carbono dos reservatórios terrestres para a atmosfera, por meio de atividades antropogênicas, tais como a geração de energia a partir de combustíveis fósseis e o desmatamento, vem provocando um aumento nos níveis de GEE na atmosfera (MARENGO, 2001) e causando mudanças climáticas globais, principalmente no aumento gradual da temperatura do ar (IPCC, 2014).

Essas mudanças climáticas podem desencadear diversos impactos ambientais, sociais e econômicos, dos quais se pode citar: o derretimento das calotas polares, com aumento do nível dos oceanos e, conseqüentemente, a perda de regiões costeiras, com prejuízos para a agricultura e o turismo; a ocorrência de eventos extremos de secas, enchentes, furacões e tempestades, trazendo riscos à vida; alterações na biodiversidade, na medida em que as espécies terão que se adaptar a novos regimes climáticos, podendo migrar para locais mais adequados ou mesmo serem extintas; alterações nas condições de saúde, com o possível aumento da incidência de casos de epidemias e pandemias (CONRADO, 2006).

Diante desses impactos, existe uma preocupação internacional em diminuir as concentrações de GEE na atmosfera, principalmente de CO_2 , em razão de suas altas concentrações na atmosfera (MARTINS et al., 2003). A biota terrestre desempenha um importante papel como sumidouro do excesso de carbono atmosférico (NOBRE e NOBRE, 2002). Devido a isso, uma série de especialistas propuseram que o sequestro de carbono atmosférico como matéria orgânica do solo e como biomassa vegetal, é um meio desejável, viável e eficaz, através do qual a concentração de C na atmosfera pode ser reduzida (FROUZ et al., 2009; GANJEGUNTE et al., 2009; SPEROW, 2006).

Chang (2002) destaca três formas de sequestro de carbono florestal: através da preservação do estoque de carbono nas florestas já existentes, por ação protetora; aumentando o estoque de carbono florestal por meio de uma ação combinada de práticas de manejo florestal sustentável, regeneração florestal e reflorestamento em áreas degradadas, ou introdução de atividades agroflorestais em áreas de agricultura; e pela substituição de combustíveis fósseis por produtos de biomassa vegetal sustentável.

A captação do carbono atmosférico nos ecossistemas terrestres, dos quais se destacam os ecossistemas florestais, ocorre por meio da fotossíntese que, a partir do carbono inorgânico do CO₂, produz compostos orgânicos. Os ecossistemas terrestres retornam o carbono para a atmosfera por meio da respiração, decomposição e queimadas (POST et al., 1990).

A taxa na qual o CO₂ presente na atmosfera é convertido pela atividade fotossintética em substâncias orgânicas é a produtividade primária bruta (BEER et al., 2010). Em escala ecossistêmica, a PPB pode ser considerada como o total de carbono fixado pelo ecossistema, medida em unidades de massa de carbono por área por tempo (ex. gC m⁻² ano⁻¹) (CHAPIN III et al., 2002). A PPB, juntamente com a respiração, é um dos principais processos que controlam as trocas de CO₂ entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera, proporcionando a capacidade parcial de compensação das emissões de CO₂ antropogênico. O crescimento da comunidade vegetal depende de que a taxa de armazenamento de matéria orgânica exceda as perdas de CO₂ pelo processo de respiração autotrófica (R_a) (MALHI et al., 2009b).

Uma fração substancial do carbono fixado pela PPB é perdida por meio da respiração do ecossistema (R_e), o que inclui a respiração de organismos autotróficos (R_a) e heterotróficos (R_h). O restante da PPB é destinado à produção primária líquida (PPL) da biomassa estrutural dos caules, folhas e frutas, carboidratos instáveis, como açúcares e amido, e, em menor grau, dos compostos orgânicos voláteis utilizados na defesa e sinalização de plantas (GOUGH, 2012). Por conseguinte, a PPB em escala ecossistêmica relaciona-se à PPL, através da seguinte equação:

$$PPB = PPL + R_e \quad (1)$$

No debate sobre o sequestro de carbono, há um interesse maior voltado às florestas tropicais úmidas, como floresta Amazônica, pois é sabido que estas são caracterizadas por alta PPB (Figura 3) (CHANG, 2002). As florestas tropicais assimilam 34% da PPB terrestre global e têm a maior PPB por unidade de área (BEER et al., 2010). A floresta Amazônica pode atuar como fonte de CO₂ para a atmosfera em função das suas altas taxas de desmatamento (entre 15 e 20 mil km² ao ano na Amazônia brasileira) (INPE, 2008). Entretanto, estudos sobre a influência das florestas tropicais da Amazônia no ciclo do carbono abrem a possibilidade de que estas desempenham um papel relevante como sumidouros de CO₂ (NOBRE e NOBRE, 2002).

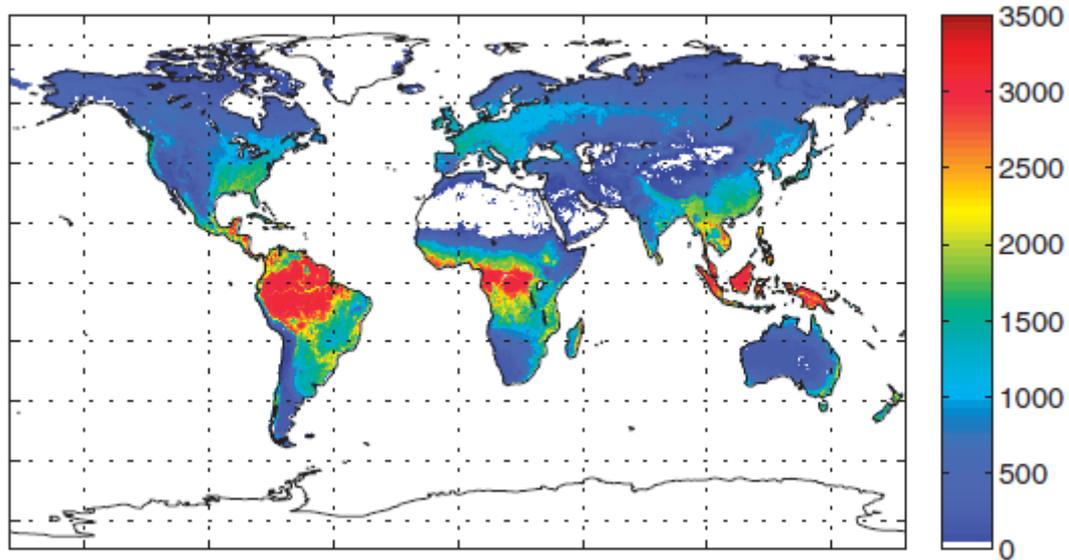


Figura 3. Distribuição espacial da PPB anual mediana ($\text{gC m}^{-2} \text{ano}^{-1}$). Fonte: BEER et al., 2010.

3. Métodos de Estimativa do Carbono Florestal

Segundo Houghton et al. (2009), pelo menos cinco abordagens diferentes podem ser utilizadas para estimar o fluxo de carbono ou porções dele em uma região: (1) cálculos inversos baseados em variações espaciais e temporais nas concentrações de CO_2 atmosférico e modelos de transporte atmosférico; (2) balanços da coluna de ar do carbono atmosférico baseados em perfis verticais de CO_2 sobre a região; (3) medição direta de mudanças nos estoques de carbono (inventários); (4) medições diretas de fluxo de CO_2 em nível de paisagem (covariância de vórtices turbulentos); (5) modelos ecossistêmicos, juntamente com medições de covariância de vórtices turbulentos.

De acordo com os mesmos autores, essas diferentes abordagens apresentam muitas controvérsias e frequentemente consideram componentes diferentes do ciclo do carbono regional. Considerando todas as abordagens em conjunto, sugerem que a Amazônia tem sido, em média, quase neutra com relação ao balanço de carbono ao longo da última década, embora constitua uma pequena fonte durante eventos de El Niño (HOUGHTON et al., 2009).

Um método bastante utilizado para mensurar o carbono florestal baseia-se em dados de inventário florestal (SILVEIRA et al., 2008). Higuchi et al. (2004) afirma que a estimativa de estoque de carbono pode ser obtida do produto da biomassa florestal pela concentração de carbono. A concentração de carbono na vegetação obtida por Higuchi e Carvalho Júnior (1994) está em torno de 48%, valor este que está dentro dos limites de concentrações em florestas tropicais (entre 46% e 52%). No entanto, para Koehler et al. (2002), o uso de fatores para espécie da qual não se conhece o verdadeiro teor pode levar a resultados de sub ou superestimativas do estoque de carbono.

A técnica de covariância de vórtices turbulentos tem emergido recentemente como uma alternativa para quantificar o fluxo de carbono em diversos ecossistemas florestais (AGUIAR et al., 2006; BALDOCCHI, 2003; BEER et al., 2010; CABRAL et al., 2011; FALGE et al., 2002; KIRSCHBAUM et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2006). Esse método se baseia em medidas de flutuações da velocidade do vento e das concentrações de CO_2 . A técnica verifica o índice de troca de CO_2 através da interface entre a atmosfera e a copa das plantas, medindo-se a covariância entre as variações na velocidade do vento vertical e razão da mistura do CO_2 . Uma de suas vantagens é que causa um distúrbio mínimo ao

microambiente do ecossistema em estudo, permitindo medidas contínuas (BALDOCCHI, 2003). Porém, essa técnica possui um custo alto, operacionalidade restrita e cobre apenas alguns quilômetros quadrados, salvo nos casos de áreas extensas e homogêneas (SILVA et al., 2013).

Nesse sentido, os métodos que empregam o sensoriamento remoto têm a vantagem de fornecer estimativas de produtividade primária terrestre para grandes áreas, onde os métodos ao nível do terreno não são viáveis, a um baixo custo e com maior operacionalidade (GOUGH, 2012). Diversos sensores orbitais têm sido empregados na determinação da PPB, como o AVHRR (KITAMOTO et al., 2007), o TM/ETM+ da série Landsat (GITELSON et al., 2008) e o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (RUNNING et al., 2004; SAKAMOTO et al., 2011). O sensor MODIS fornece dados de alta qualidade para o monitoramento da vegetação terrestre, devido a sua maior resolução espectral em relação a outros sensores (36 bandas espectrais) (JUSTICE et al., 2002), sua alta resolução temporal (1-2 dias), sua calibração a bordo que garante a consistência da série temporal de reflectância (GUENTHER et al., 2002) e às manobras de órbita e altitude do satélite que fornecem precisão na geolocalização (WOLFE et al., 2002).

Lançado a bordo da plataforma Terra em 19 de dezembro de 1999, com uma varredura de 2.330 km, o sensor MODIS iniciou operacionalmente o fornecimento de produtos de produtividade primária (nomeados de MOD17) em 24 de fevereiro de 2000, em um intervalo de 8 dias, com uma resolução espacial de 1 km (ZHAO et al., 2005). Pela primeira vez na história, foi possível obter o status de crescimento da vegetação mundial, incluindo a produção primária, em tempo quase real (JUSTICE et al., 2002).

O produto MOD17A2, referente à produtividade primária bruta, é um composto cumulativo de valores de PPB, baseado no conceito da eficiência da utilização da radiação solar pela vegetação (ϵ). Nessa lógica, a produtividade primária está linearmente relacionada com a radiação ativa absorvida pela fotossíntese (APAR), conforme a Equação 2. Essa radiação é interceptada e absorvida de acordo com a capacidade de absorção e área foliar da vegetação (MONTEITH, 1972; 1977).

$$GPP = \epsilon * APAR \quad (2)$$

A APAR pode ser calculada como o produto da radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR), na faixa espectral visível de 0,4 μm - 0,7 μm assumida como 45% do total de radiação solar incidente e a fração de radiação fotossinteticamente ativa que é absorvida pela cobertura vegetal (FAPAR) (HEINSCH et al., 2003).

Um dos maiores desafios no uso de tais modelos consiste em se obter a eficiência de uso da luz “ ϵ ” numa grande área, isto em virtude de sua dependência de fatores ambientais e da própria vegetação. Uma das soluções consiste em relacionar “ ϵ ” em função do seu valor máximo (ϵ_{max}), mais as contribuições ambientais sintetizadas pela temperatura do ar mínima ($T_{\text{min}_{\text{escalar}}}$) e o status de água na vegetação (VPD_{escalar} - déficit de pressão de vapor d’água) (FIELD et al., 1995), conforme a Equação 3:

$$\epsilon = \epsilon_{\text{max}} * T_{\text{min}_{\text{escalar}}} * VPD_{\text{escalar}} \quad (3)$$

CAPÍTULO I

Comparação das Estimativas de Precipitação do Produto 3B43-TRMM com dados de Estações Meteorológicas Convencionais do Estado do Amazonas

Este capítulo baseia-se no seguinte artigo publicado na revista Floresta e Ambiente:

ALMEIDA, C. T. et al. Avaliação das Estimativas de Precipitação do Produto 3B43-TRMM do Estado do Amazonas. **Floresta e Ambiente**, v.22, n.3, p.279-286, 2015.

RESUMO

Para avaliar os dados de precipitação pluvial via satélite no estado do Amazonas, compararam-se as estimativas do produto 3B43 do satélite TRMM (2004-2008) com dados de sete Estações Meteorológicas Convencionais (EMC). A comparação foi baseada nos seguintes parâmetros estatísticos: Erro Médio (EM), Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ), coeficiente de correlação linear (r) e índice de concordância de Wilmott (d). As estimativas do TRMM foram similares aos dados de superfície e representaram bem a variabilidade sazonal das chuvas. Os dados apresentaram alta correlação linear ($r = 0,83$), alto índice de concordância ($d = 0,85$) e REMQ satisfatório (66,6 mm/mês). Dessa forma, as estimativas de precipitação pluvial do produto 3B43 podem ser utilizadas como uma fonte alternativa de dados de qualidade.

Palavras-chave: Amazônia, chuva, sensoriamento remoto, validação.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the rainfall data via satellites in Amazonas state, Brazil. To this end, the estimates from the TRMM-3B43 product (2004-2008) were compared with data from seven Conventional Weather Stations (CWS). The comparison was based on the following statistical parameters: Average Error (AE), Root Mean Square Error (RMSE), linear correlation coefficient (r), and Wilmott's index of agreement (d). The TRMM-3B43 estimates were similar to the surface data and represent well the seasonal variability of rainfall. The data showed high linear correlation ($r = 0.83$), high index of agreement ($d = 0.85$), and satisfactory RMSE (66.6 mm/month). Therefore, rainfall estimates from the TRMM-3B43 product can be used as an alternative source of quality data.

Keywords: Amazon, rainfall, remote sensing, validation.

1. INTRODUÇÃO

A precipitação pluvial é uma das principais características determinantes do clima amazônico (FISCH et al., 1998), sendo responsável pela distinção entre as estações chuvosas e secas. A Bacia Amazônica é um dos principais centros de atividades convectivas na região tropical do planeta, com uma área de cinco milhões de quilômetros quadrados (FERREIRA DA COSTA et al., 1998). Dessa forma, é de extrema importância entender a dinâmica pluviométrica desta região, bem como os mecanismos que organizam e promovem a precipitação e sua relação com o funcionamento da floresta (MOLION, 1987; MARENGO et al., 2008).

Também faz-se necessário, diante da crescente preocupação com as mudanças climáticas, monitorar a variabilidade das chuvas em relação à modificação antrópica da paisagem amazônica e ao aumento na temperatura global, pois seus efeitos podem ter sérias consequências para o ecossistema amazônico (ADAMS et al., 2009). Segundo Marengo e Betts (2011), o desmatamento e as mudanças climáticas podem prejudicar severamente o funcionamento da Amazônia como ecossistema florestal, resultando na perda de biodiversidade, redução de sua capacidade de reter carbono, enfraquecimento do ciclo hidrológico regional, aumento da temperatura do solo e, eventualmente, impelindo a Amazônia a um processo gradual de savanização.

O monitoramento pluviométrico de uma região requer uma grande densidade de pluviômetros ou telepluviômetros bem distribuídos espacialmente, uma vez que a escala de medição destes equipamentos é pontual (KIDDER e HAAR, 1995), não fornecendo valores representativos para grandes áreas. Por possuir grande extensão territorial e difícil acesso em densas áreas de floresta, a região Amazônica apresenta baixa densidade de estações meteorológicas convencionais e automáticas, o que pode causar incertezas significativas no entendimento dos diferentes processos relativos aos mecanismos dinâmicos do clima e sua variabilidade espacial (NOBRE et al., 2009). Além disso, a grande quantidade de falhas existentes nos dados dessas estações meteorológicas também prejudica uma análise temporal da variabilidade climática da região.

Devido ao elevado custo e à dificuldade na obtenção de medidas em áreas de difícil acesso, simulações numéricas e dados de satélite têm sido utilizados para estudos climatológicos e hidrológicos (LONGO et al., 2004; ADAMS et al., 2009). Os dados provindos de satélites são uma alternativa para suprir as deficiências dos dados de superfície na estimativa da precipitação pluvial, pois estes são fornecidos em alta densidade espacial e temporal (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2014). O satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) foi lançado em 1997 pela NASA e pela JAXA com o objetivo de monitorar a precipitação sobre os trópicos (KUMMEROW et al., 2000). Para garantir que esse satélite forneça estimativas consistentes é necessário validar essas informações com as medidas de superfície, visando quantificar sua precisão e exatidão.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi comparar as estimativas de precipitação pluvial do satélite TRMM (produto 3B43) com dados pluviométricos de superfície provenientes de estações meteorológicas convencionais no estado do Amazonas, no período de 2004 a 2008.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O Amazonas é o maior estado brasileiro, com uma área de 1.559.159,148 km² e uma população de 3.483.985 habitantes (IBGE, 2012b). Ao todo possui 62 municípios e a capital

Manaus é a cidade mais populosa da região Norte e o sétimo município mais populoso do Brasil (IBGE, 2011). O estado do Amazonas possui a maior área de floresta conservada no Brasil, uma vez que 98% de sua área ainda mantém sua cobertura de floresta tropical (FAS, 2014). Cerca de 50% de sua área é protegida por unidades de conservação, tais como reservas extrativistas, parques nacionais, estaduais e federais, e também terras indígenas (AMAZONAS, 2009).

De acordo com a classificação de Köppen, a região Amazônica apresenta o clima do tipo “A”, com três subclimas: o equatorial chuvoso (“Af”), o tropical de monção (“Am”) e o tropical seco e úmido (“Aw”), sendo que o tropical de monção abrange a maior parte da região. Em escalas de tempo sazonais, a temperatura média do ar não apresenta muita variação, o que se deve aos altos valores de radiação solar incidente ao longo do ano. Os valores da temperatura média do ar estão entre 24 °C e 26 °C com amplitude anual de 1 °C a 2 °C. A precipitação média da região Amazônica é de aproximadamente 2.300 mm.ano⁻¹. A estação chuvosa é compreendida entre novembro e março, e a estação seca, entre maio e setembro. Os meses de abril e outubro são meses de transição entre um regime e outro (FIGUEROA e NOBRE, 1990).

2.2. Dados de superfície e de satélite

Os dados diários de precipitação pluvial foram obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) (INMET, 2014), referentes a sete Estações Meteorológicas Convencionais (EMC) no estado do Amazonas, localizadas nos seguintes municípios: Barcelos, Codajás, Eirunepé, Fonte Boa, Manaus, Manicoré e São Gabriel da Cachoeira. Essas estações foram escolhidas devido à qualidade dos dados para o período de 2004 a 2008, com porcentagem de falhas inferior a 3%. Os dados de precipitação pluvial diários foram convertidos em dados acumulados mensais. Estes foram calculados somente para os meses que possuíam ao menos 90% dos dados de precipitação.

Os dados de precipitação pluvial do satélite TRMM produto 3B43 foram obtidos no formato NetCDF (TRMM, 2014). Esse produto fornece dados com resolução espacial de aproximadamente 30 km e resolução temporal mensal. Utilizou-se o programa ArcGIS versão 10.2® para a conversão dos dados, originalmente em mm.h⁻¹ para mm.mês⁻¹, e para a seleção dos pontos TRMM mais próximos das EMCs, cujos dados foram utilizados para a comparação com os provindos das EMCs, para os anos de 2004 a 2008. No caso da EMC de São Gabriel da Cachoeira, consideraram-se dois pontos TRMM, devido à distância similar entre estes e a EMC. Foi calculada a média aritmética da precipitação mensal dos dois pontos TRMM como medida representativa dessa localidade. A localização das EMCs e dos pontos selecionados do TRMM encontra-se na Figura 4.

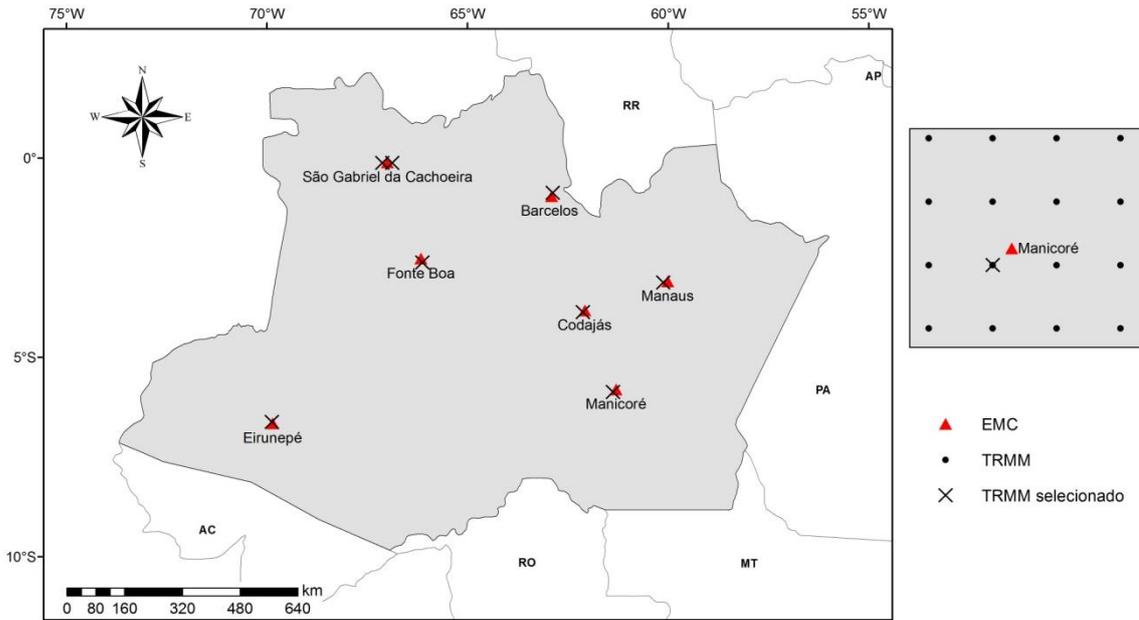


Figura 4. Localização das EMC's e dos pontos do TRMM mais próximos a estas.

2.3. Validação das estimativas do satélite

Para a comparação da precipitação pluvial estimada pelo produto 3B43 do TRMM, em relação aos valores obtidos em superfície pelas EMCs, foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos: Erro Médio (EM, Equação 4), Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ, Equação 5), coeficiente de correlação linear de Pearson (r , Equação 6) e índice de concordância (d , Equação 7) proposto por Willmott et al. (1985). As equações utilizadas são apresentadas abaixo:

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{n} \quad (4)$$

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}) * (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 * \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (6)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - O_i| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (7)$$

em que:

E_i = valor estimado pelo satélite no intervalo de tempo i ;

O_i = valor observado em superfície no intervalo de tempo i ;

n = número de dados analisados;

\bar{E} = valor médio estimado pelo satélite;

\bar{O} = valor médio observado em superfície.

O coeficiente de correlação foi avaliado pelo teste t-Student, ao nível de significância de 5%. Utilizou-se o software R, versão 3.1.0 para a realização das análises estatísticas do conjunto de dados no período de 2004-2008.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição temporal da precipitação pluvial mensal no período de 2004 a 2008 para ambas as fontes de dados (TRMM e EMC) nas sete localidades avaliadas (Figura 5) mostrou que as estimativas do satélite TRMM apresentaram similaridade aos dados obtidos das EMCs. O produto 3B43 também estimou corretamente a variabilidade sazonal da precipitação, o que permite a utilização desses dados para a identificação das estações secas e chuvosas no estado do Amazonas.

Os resultados também mostraram que os dados estimados pelo produto 3B43 do TRMM e observados nas EMCs apresentaram alta e significativa correlação em todos os municípios avaliados (Figura 6a-g), com o coeficiente r de 0,83 (intervalo de confiança a 95% de probabilidade de 0,80 a 0,86), significativo a 5% de significância (p -valor $< 2,2e-16$), considerando os dados de todas as localidades conjuntamente (Figura 6h). O índice d também apresentou altos valores (próximos de 1) para todas as EMCs (Figura 6).

Os municípios Manicoré, Fonte Boa e Manaus apresentaram os menores valores de REMQ (49,7 mm, 52,8 mm e 58,9 mm, respectivamente), com grande proximidade entre os dados do TRMM e os dados de superfície (Figuras 5e, 5d e 5f). Os municípios Manaus e Manicoré também apresentaram os maiores valores de coeficiente de correlação e índice de concordância que, juntamente com os baixos valores de REMQ, indicam que nessas localidades os dados do TRMM 3B43 apresentam boa precisão e exatidão, com ligeira superioridade para Manicoré.

Além disso, Manaus, Manicoré e Codajás, municípios localizados mais ao leste do estado, apresentaram erro médio negativo (Figuras 6b, 6e e 6f), indicando maior tendência do TRMM de subestimar a precipitação mensal nessas localidades. As demais localidades apresentaram EM positivo, mostrando que o TRMM apresentou maior tendência de superestimar a precipitação.

A variabilidade da precipitação pluvial na região Amazônica se deve à atuação de sistemas meteorológicos sinóticos (Zona de Convergência Intertropical do Atlântico – ZCIT, Alta da Bolívia – AB, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis – VCAN e Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS) e de mesoescala (Friagens, Cumulonimbus Isolados e Linhas de Instabilidade – LI), seguido dos modos de variabilidade climática (El Niño, Oscilação Sul – ENOS e Anomalias das Temperaturas da Superfície do Mar – TSM dos Oceanos Pacífico Equatorial e Atlântico), que influenciam os padrões de chuvas na região (ANANIAS et al., 2010; REBOITA et al., 2010). Variações espaciais desses sistemas meteorológicos sob o estado do Amazonas, bem como possíveis erros nos registros das EMCs, podem influenciar na super ou subestimação do TRMM.

Eirunepé foi a estação que apresentou maior valor de erro médio e de REMQ, pois os dados do TRMM foram superiores aos dados de superfície para a maioria dos meses nos anos 2005, 2006 e 2007 (Figura 5c), que foram anos de baixa precipitação de acordo com os valores registrados pela EMC. Eirunepé também apresentou os menores valores de coeficiente de correlação ($r = 0,71$) e índice de concordância ($d = 0,71$) (Figura 6c). O pior desempenho desta estação em relação às demais pode estar relacionado à sua localização mais ao sul do estado, sob influência de diversos sistemas meteorológicos, bem como pela sua menor pluviosidade, sendo mais influenciada pela maior abrangência do satélite. A baixa intensidade

das chuvas no ano de 2005 em Eirunepé pode ser explicada pelo aquecimento anômalo do Atlântico norte tropical, que resultou em um período de forte seca na região sudoeste da Amazônia (MARENGO et al., 2008).

Estudos da variabilidade interanual da precipitação na Amazônia também relacionam eventos de seca e de aumento no regime pluviométrico ao modo de variabilidade climática El Niño-Oscilação Sul (ENOS), devido a anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Oceano Pacífico (ANDREOLI et al., 2012; ARAÚJO et al., 2013). Considerando a média anual geral da precipitação total (Figura 7a), observou-se que o ano de 2008 apresentou maior média de chuva em comparação aos demais anos da série. Essa maior ocorrência coincidiu com a fase positiva do ENOS (La Niña) que, segundo o CPTEC (2014), teve a intensidade categorizada como forte neste ano. Decorrente dessa maior precipitação, o EM neste ano (Figura 7b) foi elevado, resultando na subestimativa da precipitação pluvial pelo TRMM. Vila et al. (2009) também observaram casos de subestimativa de chuvas mais intensas. Esses autores utilizaram o produto TRMM 3B42RT (dados de precipitação pluvial a cada 3 horas), combinando os dados de satélite com dados de superfície para detectar chuvas na América do Sul.

Assim como observado por outros autores (COLLISCHONN et al., 2007; COLLISCHONN et al., 2008; NÓBREGA et al., 2008, KARASEVA et al., 2012; OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2014), os resultados indicam que as estimativas de precipitação pluvial fornecidas pelo TRMM são consistentes, porém algumas diferenças foram verificadas em relação às EMCs. As diferenças existentes entre os dados derivados do satélite TRMM e obtidos pelas estações meteorológicas podem ser uma consequência da diferença de escala entre eles, pois o pluviômetro é uma estimativa pontual, enquanto que o satélite representa uma estimativa média no pixel.

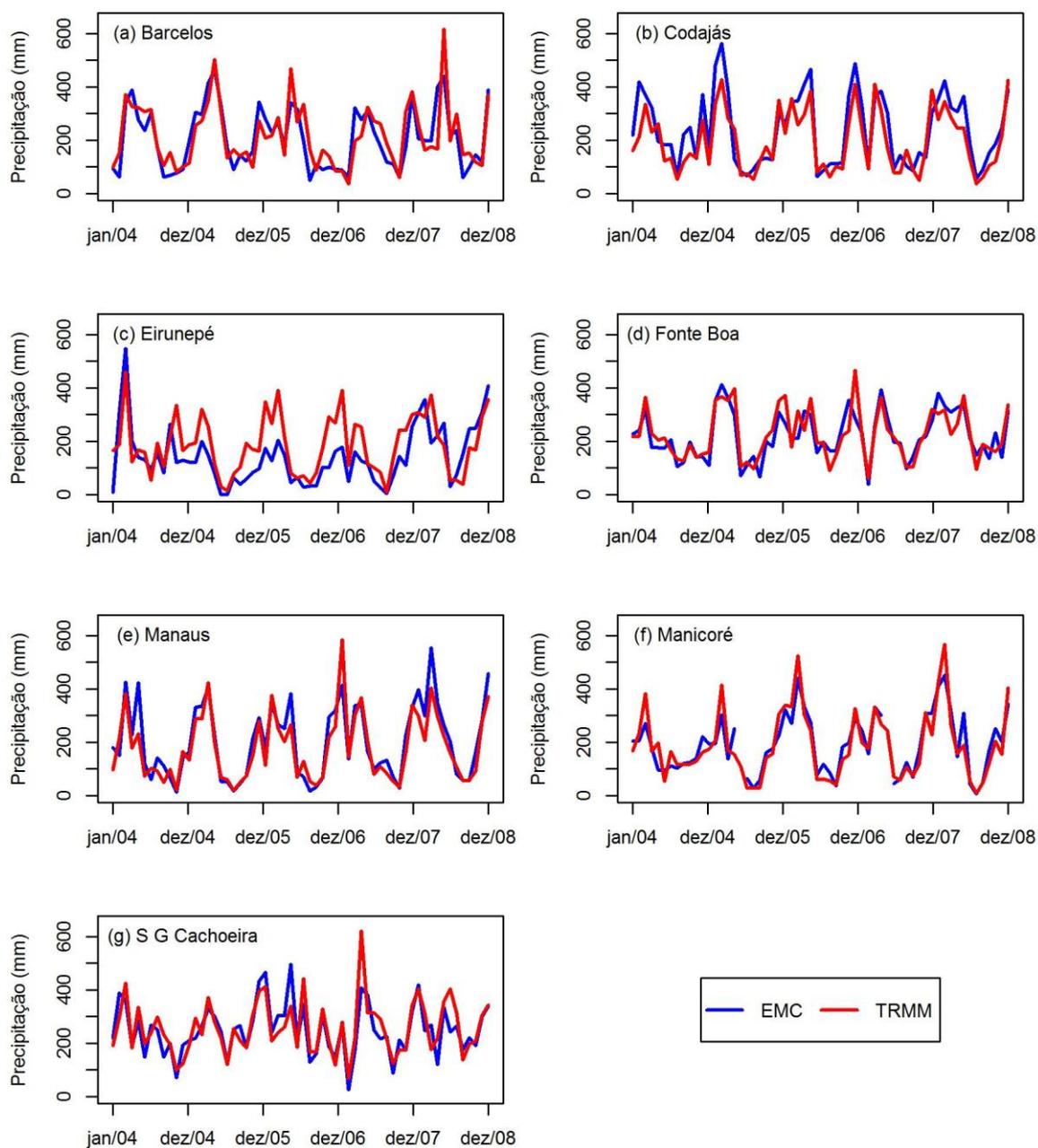


Figura 5. Precipitação pluvial mensal (mm) de janeiro de 2004 a dezembro de 2008: comparação entre TRMM e EMC's nos sete municípios avaliados.

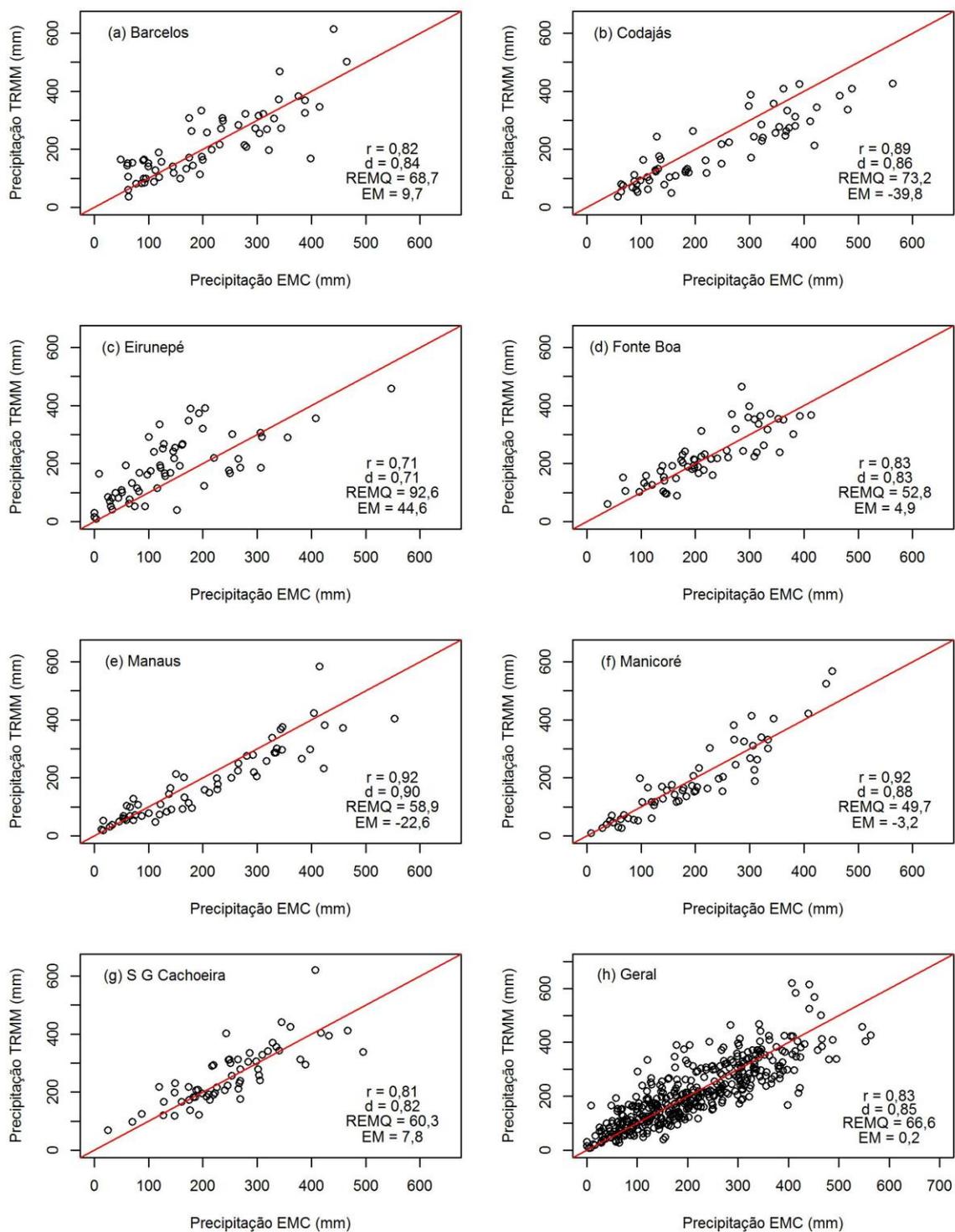


Figura 6. Diagrama de dispersão individual para cada localidade estudada (a-g) e geral, considerando todos os dados conjuntamente (h).

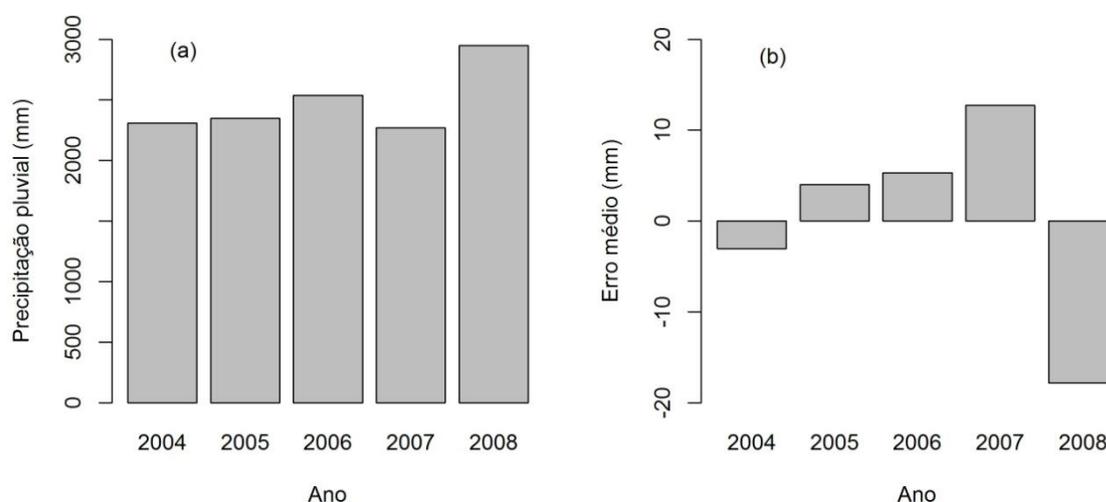


Figura 7. Média da precipitação pluvial total anual (mm) e do erro anual (mm) para todas as EMC's.

4. CONCLUSÃO

As estimativas de precipitação pluvial do produto 3B43 do satélite TRMM são uma boa fonte alternativa de dados para a região Amazônica segundo os parâmetros estatísticos, representando bem a variabilidade sazonal da precipitação pluvial no período de estudo. Dessa forma, esse produto pode auxiliar em estudos pluviométricos de regiões com baixa densidade de informações de superfície, assim como no preenchimento de falhas e homogeneização dos dados de precipitação em estações meteorológicas convencionais e na determinação do período seco e chuvoso na Amazônia.

CAPÍTULO II

Variabilidade da Produtividade Primária Bruta estimada pelo método de covariância de vórtices turbulentos e sua relação com o uso e cobertura do solo e variáveis meteorológicas

RESUMO

A Produtividade Primária Bruta (PPB) é a taxa na qual o CO₂ atmosférico é convertido pela atividade fotossintética em substâncias orgânicas e é uma medida do total de carbono fixado pelo ecossistema. No contexto das mudanças climáticas, o enfoque para a fixação de carbono pelos ecossistemas florestais é a base para mitigar as emissões de CO₂ antropogênico. Este trabalho teve como objetivo compreender a variabilidade da PPB derivada do método de covariância de vórtices turbulentos na Amazônia Legal e sua relação com o uso e cobertura do solo e variáveis meteorológicas. Para isso foram utilizados dados horários de sete torres micrometeorológicas, das quais quatro se encontram em cobertura florestal, uma em floresta de transição e duas em áreas antropizadas. Os dados incluíam as variáveis: PPB, temperatura do ar, chuva, radiação no topo da atmosfera, PAR, déficit de pressão de vapor d'água, calor sensível e calor latente. Calculou-se a razão de Bowen, um indicador de estresse hídrico que é a razão entre o calor sensível e o calor latente. Os dados horários foram convertidos para a escala de 8 em 8 dias e para a escala mensal. Também foram utilizados dados mensais de chuva do produto 3B43 do satélite TRMM para definir o período seco (chuva mensal inferior a 100 mm). A relação entre as variáveis foi avaliada através do coeficiente de correlação de Spearman e de um modelo de árvore de regressão. As análises estatísticas foram realizadas no software R, versão 3.1.0. Os resultados mostraram que as áreas antropizadas apresentaram menor produtividade em relação às áreas conservadas e tiveram seu balanço hídrico afetado, pois apresentaram altos valores da razão de Bowen. A sazonalidade da PPB foi predominantemente relacionada à radiação no topo da atmosfera nas áreas de floresta da Amazônia equatorial. Nas áreas ao sul, a PPB foi influenciada pela radiação no topo da atmosfera e também pela chuva e VPD, indicando limitação tanto pela radiação quanto pela disponibilidade de água.

Palavras-chave: Amazônia, fotossíntese, estoque de carbono, sazonalidade, uso e cobertura do solo.

ABSTRACT

The Gross Primary Productivity (GPP) is the rate at which atmospheric CO₂ is converted by photosynthetic activity in organic substances and is a measure of the total carbon fixed by the ecosystem. In the context of climate change, the focus for the fixation of carbon by forest ecosystems is the basis to mitigate emissions of anthropogenic CO₂. This work aims to understand the variability of GPP derived from eddy covariance method in the Legal Amazon and its relation to the land use/cover and meteorological variables. For this, we used hourly data from seven micrometeorological towers, of which four are in forest cover, one in transition forest and two in disturbed areas. The data included the following variables: GPP, air temperature, precipitation, radiation at the top of the atmosphere, PAR, vapor pressure deficit, sensible and latent heat. The Bowen ratio was calculated, a water stress indicator that is the ratio of sensible and latent heat. The hourly data were converted to the 8 day scale and monthly scale. We also used monthly rainfall data from the TRMM 3B43 product to set the dry period (monthly precipitation less than 100 mm). The relation between variables was assessed using Spearman's correlation coefficient and a regression tree model. Statistical analyzes were performed with R software, version 3.1.0. The results showed that the disturbed areas had lower productivity compared to the conserved areas and had their water balance affected, because higher values of Bowen ratio. The GPP seasonality was predominantly related to radiation at the top of the atmosphere in forest areas of the equatorial Amazon. In southern areas, the GPP was influenced by radiation at the top of the atmosphere and also by precipitation and VPD, indicating limitation both by radiation and by water availability.

Keywords: Amazon, photosynthesis, carbon storage, seasonality, land use and land cover.

1 INTRODUÇÃO

No funcionamento dos ecossistemas, as trocas entre a biosfera e a atmosfera ocorrem principalmente mediante a assimilação do carbono atmosférico no processo fotossintético e a perda de água absorvida pela vegetação no processo de transpiração (SELLERS et al., 1997). O processo fotossintético no nível de ecossistema, também chamado de PPB, é influenciado por fatores como a quantidade de nutrientes, água, luz e CO₂, fornecendo assim informações importantes quanto ao ambiente, o seu funcionamento e a resposta dos ecossistemas quanto às perturbações locais e globais (MALHI e WRIGHT, 2004).

No contexto das mudanças climáticas, a fixação de carbono pelos ecossistemas florestais é de suma importância para mitigar os danos e consequências das mudanças climáticas a nível regional e global. A quantidade de carbono nos ecossistemas terrestres é diretamente influenciada pelo uso do solo e mudanças em sua cobertura, que podem ser causadas em decorrência da atividade humana, como a conversão da vegetação natural em áreas agrícolas ou pastagens. Assim, mudanças no armazenamento de carbono na vegetação e no solo podem ter implicações significativas para a concentração atmosférica de CO₂ e outros GEE na atmosfera, em função da queima e/ou decomposição oriunda da retirada da floresta (SCHUMAN et al., 2002).

Nesse contexto, é fundamental o entendimento da dinâmica do carbono nos ecossistemas florestais, principalmente de florestas tropicais, em diversos estágios sucessionais, como em áreas em recomposição e em área degradadas, bem como, sua interação com a atmosfera, levando em consideração a sua influência nas emissões de GEE e no clima regional (MALHI e GRACE, 2000). Essas informações são importantes, pois subsidiam a tomada de decisões em políticas públicas e privadas na área de meio ambiente (manejo de bacias hidrográficas, recuperação de áreas degradadas, recomposição florestal e projetos de compensação de carbono), climática (clima regional, variabilidade e mudanças climáticas) e de defesa civil (risco de enchentes e deslizamentos).

Apesar de sua importância, os mecanismos, interações e impactos dos fatores ambientais e humanos sobre o funcionamento das florestas tropicais ainda são pouco compreendidos. Uma das razões para a falta de conhecimento da sazonalidade de florestas tropicais na escala de paisagem é a sua complexidade, pois sua alta diversidade de espécies arbóreas pode resultar em uma grande variedade de respostas fenológicas aos fatores ambientais (REICH et al., 2004; WRIGHT e SCHAIK, 1994). É necessário compreender melhor a dinâmica temporal e as heterogeneidades espaciais em florestas tropicais e como estes ecossistemas podem responder ou se adaptar às mudanças climáticas globais.

Diante do exposto, este capítulo teve como objetivo compreender a variabilidade da PPB derivada do método de covariância de vórtices turbulentos na Amazônia Legal e sua relação com o uso e cobertura do solo e variáveis meteorológicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área de Estudo

O estudo da PPB foi realizado na Amazônia Legal brasileira (Figura 8), área que foi definida pela lei nº 1.806 em 1953 pelo Governo Brasileiro (BRASIL, 1953), para tentar desenvolver e integrar a região. Esse território inclui os estados do Amazonas, Pará, Roraima, Rondônia, Acre, Amapá, Tocantins, Mato Grosso e grande parte do Maranhão, abrangendo uma área com cerca de 5 milhões de km² (dois terços do país). A Amazônia Legal brasileira é

caracterizada por um mosaico de habitats com grande variedade na ocorrência e quantidade de espécies. Além da Floresta Amazônica, compreende 37% do Bioma Cerrado, 40% do Bioma Pantanal e pequenos trechos de formações vegetais variadas (CARNEIRO FILHO, 2009).

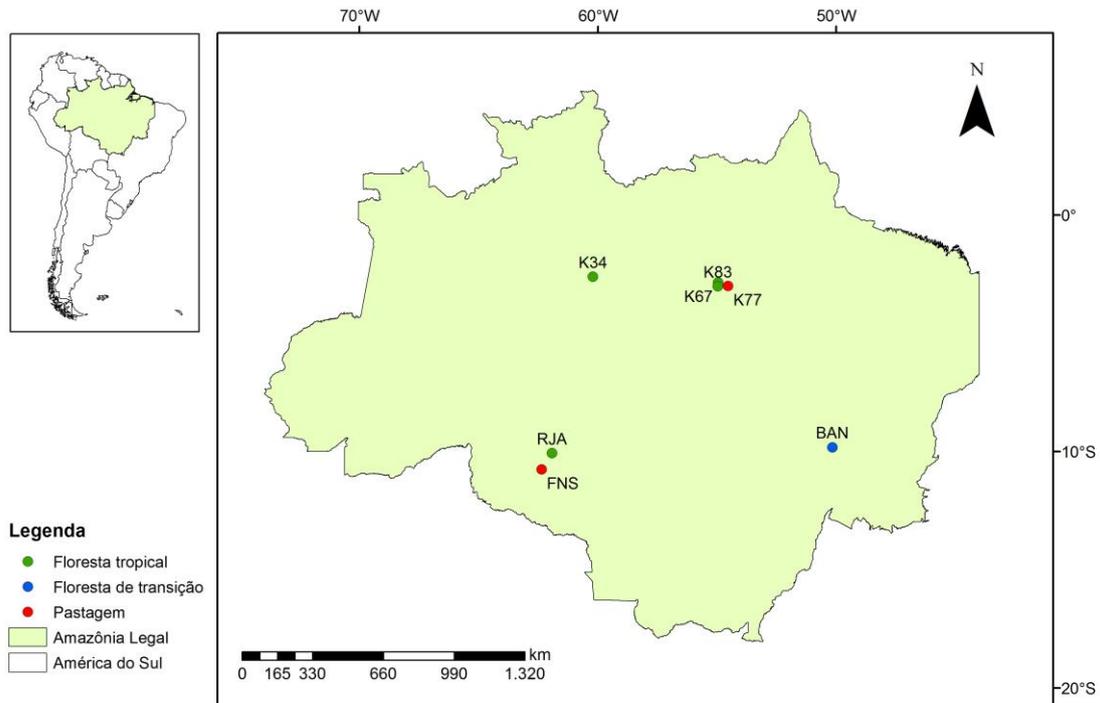


Figura 8. Área de estudo e localização das torres micrometeorológicas.

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região Amazônica apresenta apenas o clima do tipo "A", porém três subclimas podem ser identificados na região: o equatorial chuvoso ("Af"), o tropical de monção ("Am") e o tropical seco e úmido ("Aw"), sendo que o tropical de monção abrange a maior parte da região. Porém, segundo Cerqueira (2006), as fronteiras entre um subclima e outro não são bem definidas e podem variar de ano a ano, sendo o subclima "Am" uma transição entre o "Af", predominantemente equatorial, e o "Aw", mais próximo do clima tropical.

Conforme Figueroa e Nobre (1990), a temperatura do ar média não apresenta elevada amplitude na escala sazonal. Os valores da temperatura do ar média estão entre 24°C a 26°C, com amplitude anual de 1°C a 2°C. A chuva apresenta sazonalidade marcante, com uma estação chuvosa compreendida entre novembro e março, e a estação seca entre maio e setembro. Os meses de abril e outubro são meses de transição entre um regime e outro. No extremo norte da região há uma reversão dessa fase, e a estação chuvosa ocorre de maio a outubro e a estação mais seca, de dezembro a fevereiro. A chuva média da região Amazônica é de aproximadamente 2300 mm.ano⁻¹.

Para o estudo da PPB a nível de superfície em diferentes tipos de usos e coberturas do solo foram utilizados dados de sete torres micrometeorológicas de fluxo de carbono e energia do Projeto LBA, descritas na Tabela 1. A metodologia utilizada para o cálculo da PPB pelo método de covariância de vórtices turbulentos para as sete torres está descrito em Restrepo-Coupe et al. (2013).

Tabela 1. Descrição das torres de fluxo de carbono utilizadas neste trabalho.

ID	Nome do Local	Lat (°)	Lon (°)	Altura da torre (m)	Vegetação	Série temporal	Referência
K34	Manaus km34	-2.61	-60.21	50	Floresta tropical	Jan-2000 a Set-2006	ARAÚJO et al., 2002
K67	Santarém km67	-2.86	-54.96	63	Floresta tropical	Jan-2002 a Dez-2005	HUTYRA et al., 2007; SALESKA et al., 2003
K83	Santarém km83	-3.02	-54.97	64	Floresta tropical	Jun-2000 a Mar-2004	DA ROCHA et al., 2004; GOULDEN et al., 2004; MILLER et al., 2004
RJA	Rebio Jarú	-10.08	-61.93	60	Floresta tropical	Jan-2000 a Nov-2002	KRUIJT et al., 2004; VON RANDOW et al., 2004
BAN	Rio Javaes-Ilha Bananal	-9.82	-50.16	40	Ecótono floresta - savana	Out-2003 a Dez-2006	BORMA et al., 2009
K77	Santarém km77	-3.01	-54.54	18	Pastagem e agricultura (início em Dez-2001)	Jan-2000 a Dez-2005	SAKAI et al., 2004
FNS	Fazenda Nossa Senhora	-10.76	-62.36	8.5	Pastagem	Jan-2000 a Nov-2002	VON RANDOW et al., 2004

Quatro torres estão localizadas na Amazônia central, perto da linha do Equador e próximas ao Rio Amazonas, a uma latitude aproximada de 3°S: K34, K67, K83 e K77. As torres K34, K67 e K83 localizam-se em vegetação de floresta tropical, como pode-se ver na Figura 9, que mostra a classificação IGBP do uso e cobertura do solo de uma área com 7x7 km ao redor das torres. O quadrado ao centro da figura representa o pixel de 1km do MODIS onde se encontra a torre e cada pixel menor de 250 m mostra a classificação do tipo de uso e cobertura do solo. Para essas três áreas de floresta na Amazônia central, todos os pixels em uma área de 7x7 km ao redor da torre são classificados como floresta ombrófila sempre verde. A torre K83 possui vegetação similar à da K67, mas a primeira passou por um processo de corte seletivo de madeira em setembro de 2001. A área K77 era de floresta, sendo convertida para pastagem na década de 90 e mais tarde, em novembro de 2001, foi queimada e arada para dar lugar a um plantio de arroz não irrigado (SAKAI et al., 2004). Na Figura 10 observa-se que a torre encontra-se em área de agricultura, mas ao seu redor ainda existe área de floresta.

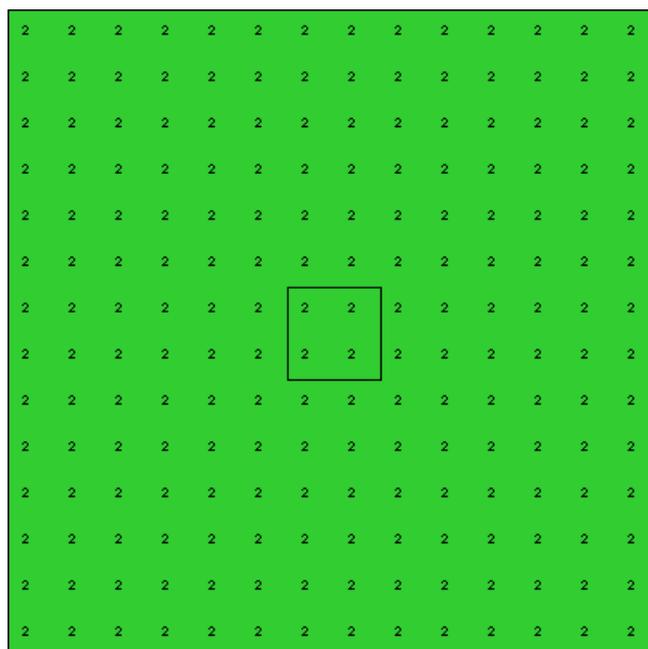


Figura 9. Classes de uso e cobertura do solo (ano 2005) do produto MODIS 500m Land Cover (IGBP Type 1) das áreas K34, K67 e K83. O número 2 representa a classe de floresta ombrófila sempre verde. Fonte: ORNL DAAC, 2012.

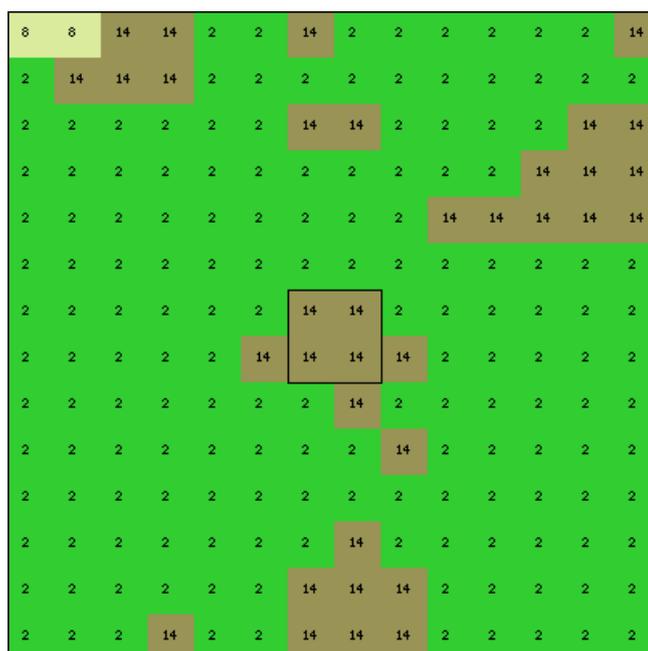


Figura 10. Classes de uso e cobertura do solo (ano 2005) do produto MODIS 500m Land Cover (IGBP Type 1) da área K77. O número 2 representa a classe de floresta ombrófila sempre verde; 8, savanas lenhosas e 14, área agrícola/mosaico de vegetação natural. Fonte: ORNL DAAC, 2012.

Outras três torres estão localizadas ao sul da Amazônia Legal, próximas à latitude 10°S, sendo que duas delas, RJA e FNS ocorrem a uma longitude de aproximadamente 62°W e a terceira, BAN, em longitude de cerca de 50°W. RJA se encontra em área de floresta tropical úmida e seca, porém o seu redor contém áreas de outros tipos de uso e cobertura do solo (Figura 11). FNS é uma área próxima de RJA que era coberta também por floresta, mas que foi queimada em 1977 e depois convertida em pastagem (VON RANDOW et al., 2004).

Na Figura 12 observa-se que o produto MODIS de uso e cobertura do solo classificou esta área de pastagem como savana, com alguns pixels ao redor classificados como um mosaico entre agricultura e vegetação natural. A torre BAN encontra-se em uma área de transição entre floresta inundada sazonalmente e savana. A classificação IGBP do MODIS para o ano 2005 (Figura 13) mostra essa área como uma transição entre floresta tropical e floresta mista.

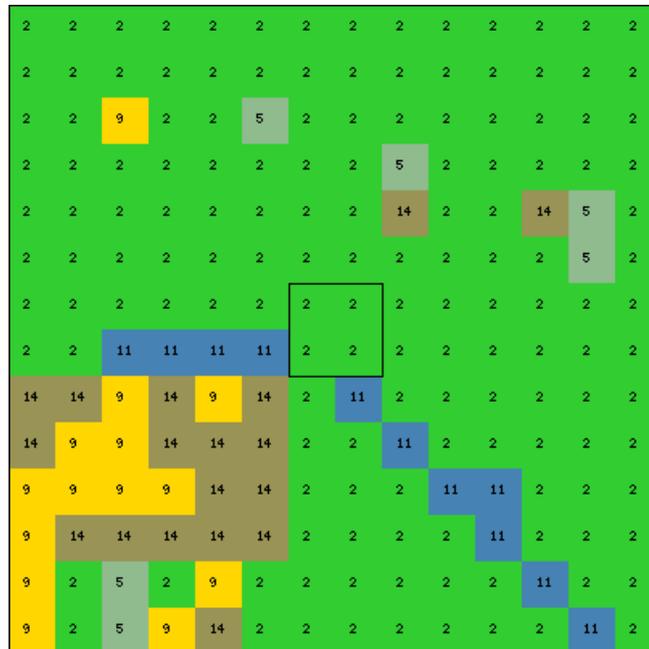


Figura 11. Classes de uso e cobertura do solo (ano 2005) do produto MODIS 500m Land Cover (IGBP Type 1) da área RJA. O número 2 representa a classe de floresta ombrófila sempre verde; 5, florestas mistas; 9, savanas; 11, zonas permanentemente úmidas e 14, área agrícola/mosaico de vegetação natural. Fonte: ORNL DAAC, 2012.

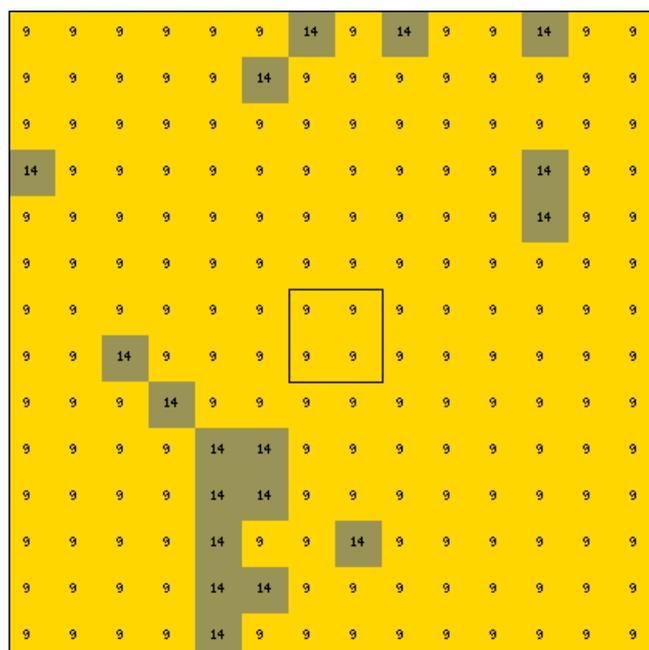


Figura 12. Classes de uso e cobertura do solo (ano 2005) do produto MODIS 500m Land Cover (IGBP Type 1) da área FNS. O número 9 representa a classe de savana e 14, de área agrícola/mosaico de vegetação natural. Fonte: ORNL DAAC, 2012.

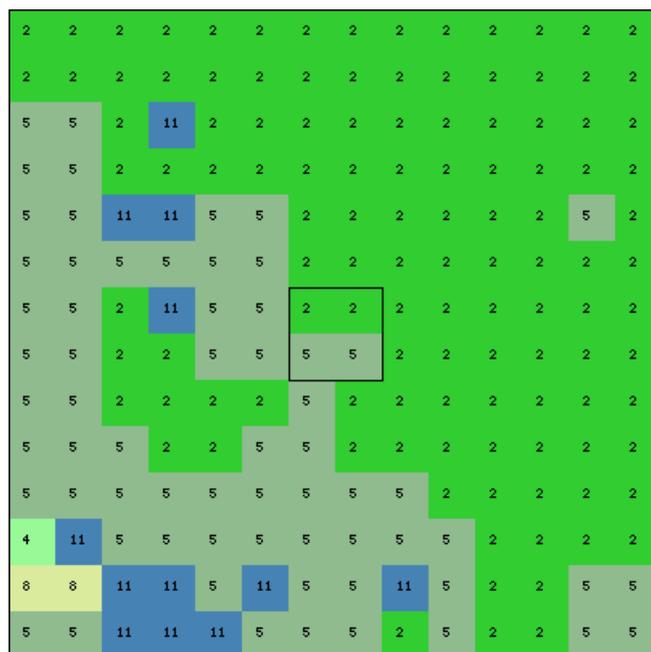


Figura 13. Classes de uso e cobertura do solo (ano 2005) do produto MODIS 500m Land Cover (IGBP Type 1) da área BAN. O número 2 representa a classe de floresta ombrófila sempre verde; 4, floresta ombrófila decídua; 5, florestas mistas; 8, savanas lenhosas e 11, zonas permanentemente úmidas. Fonte: ORNL DAAC, 2012.

2.2. Dados e análise estatística

Os dados horários das sete torres micrometeorológicas foram obtidos no site ftp://ftp.climatemodeling.org/pub/lba-mip/data/Brasil_flux/. Esses dados incluem as seguintes variáveis: PPB (em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), temperatura do ar (Temp, em $^{\circ}\text{C}$), chuva (Prec, em mm), radiação no topo da atmosfera (R_{TOA} , em W m^{-2}), PAR (em $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), d\u00e9ficit de press\u00e3o de vapor d' \u00e1gua (VPD, em KPa), calor sens\u00edvel (H, em W m^{-2}) e calor latente (LE, em W m^{-2}). A partir destas duas \u00faltimas vari\u00e1veis calculou-se a raz\u00e3o de Bowen, que \u00e9 a raz\u00e3o entre o calor sens\u00edvel e o calor latente e atua como um indicador de estresse h\u00eddrico.

Verificou-se se os dados hor\u00e1rios de PPB continham valores negativos que, quando presentes, foram exclu\u00eddos. Em seguida, os valores hor\u00e1rios foram convertidos em di\u00e1rios, calculando-se a chuva acumulada e a m\u00e9dia di\u00e1ria para as demais vari\u00e1veis. Os dados di\u00e1rios tamb\u00e9m foram convertidos para a escala de 8 em 8 dias, que corresponde ao intervalo utilizado pelo produto de PPB MOD17A2, e para a escala mensal. A unidade da PPB foi convertida de $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para $\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, multiplicando a PPB pelo fator de convers\u00e3o 1,03775.

Devido a presen\u00e7a de falhas na s\u00e9rie de chuva derivada das torres, tamb\u00e9m foram utilizados dados de chuva do produto 3B43 do TRMM. Os dados de chuva do TRMM foram obtidos para o per\u00edodo de 2000 a 2006, no site <http://mirador.gsfc.nasa.gov> (TRMM, 2014). Considerou-se o valor de chuva do pixel em que a torre estava contida. Os dados, originalmente mm.h^{-1} , foram convertidos para mm.m\u00eas^{-1} no ArcGis 10.2\u2122. Considerou-se como per\u00edodo seco os meses que possuir\u00e1m precipita\u00e7\u00e3o mensal do produto 3B43 inferior a 100 mm e os demais meses como per\u00edodo \u00famido.

Todas as vari\u00e1veis foram submetidas ao teste de normalidade de Shapiro-Wilks, considerando os dados de todas as torres conjuntamente e de cada torre separadamente, para verificar se a pressuposi\u00e7\u00e3o de distribui\u00e7\u00e3o normal era suportada. Como a maioria das vari\u00e1veis n\u00e3o apresentaram distribui\u00e7\u00e3o aproximadamente normal ($p\text{-valor} < 0,05$), optou-se

por estudar a relação entre a PPB e as variáveis ambientais através do coeficiente de correlação não-paramétrico de Spearman.

Adicionalmente, para melhor compreender a relação entre as variáveis, foi ajustado um modelo de árvore de regressão, utilizando como variável dependente a PPB e como variáveis independentes as seguintes variáveis na escala de 8 em 8 dias: temperatura do ar, chuva acumulada mensal do produto 3B43 do TRMM, R_{TOA} , PAR, calor latente, calor sensível, razão de Bowen, VPD, umidade específica do ar e as variáveis categóricas “torre”, que identifica a torre-fonte dos dados (K67, K77, K83, K34, RJA, FNS ou BAN) e “estação” (seca ou úmida). Os modelos de classificação e regressão por árvores baseiam-se na execução de sucessivas partições binárias de uma amostra, com base nos resultados das covariáveis, buscando a constituição de subamostras internamente homogêneas. Técnicas de regressão por árvores destacam-se por sua flexibilidade, não impondo quaisquer restrições quanto à natureza e à distribuição das variáveis, e por sua simplicidade, tanto em relação à construção do modelo quanto à interpretação dos resultados (DE'ATH e FABRICIUS, 2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das sete localidades estudadas, K34 foi a que apresentou maiores valores de PPB_{EC} (PPB derivada do método de covariância de vórtices turbulentos) (Figura 14), com média de $9,90 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no período 2000-2006. A PPB_{EC} variou entre $6,22 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, valor mínimo observado no ano 2000, e $14,38 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, máxima verificada em 2005. Os anos de 2003 e 2004 apresentaram maior PPB média nessa localidade. RJA foi a área com segunda maior produtividade, em média de $9,10 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (2000-2002), variando de $4,98$ a $13,59 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Tabela 2). Essas duas áreas de maior produtividade são referentes à cobertura de floresta tropical e localizam-se nas longitudes mais à oeste em relação às demais torres.

Das demais áreas em floresta tropical, K67 apresentou produtividade maior que K83 (PPB_{EC} média de $8,62 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para K67 e $7,53 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para K83). Como as duas áreas são muito próximas, esta menor produtividade em K83 provavelmente é um efeito do corte seletivo realizado no final de 2001, pois o ano de 2002 foi o que apresentou menor produtividade média ($7,06 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Segundo Figueira et al. (2008), a diminuição na PPB nos 24 meses após o corte seletivo em K83 foi de apenas 10%, consistente com a quantidade perdida de dossel. Na Figura 14 observa-se que a distribuição da PPB_{EC} da área K83 é similar a distribuição de BAN, um ecótono entre floresta e savana, que apresenta PPB_{EC} média de $7,69 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (2003-2006).

A região de pastagem em Rondônia, FNS, apresentou uma média somente um pouco inferior que K83 e BAN, de $7,00 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, porém a PPB_{EC} apresentou maior variação, indo de $2,74$ a $10,77 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A torre K77, localizada em pastagem/agricultura, foi a que apresentou menor produtividade, com média de $3,10 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (2001-2005), variando de $0,09$ a $8,62 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A baixa ou quase nula produtividade em algumas épocas do ano pode estar relacionada às épocas de colheita dos plantios agrícolas ou pelo manejo do solo para plantio agrícola, como as práticas de queimadas e aragem do solo.

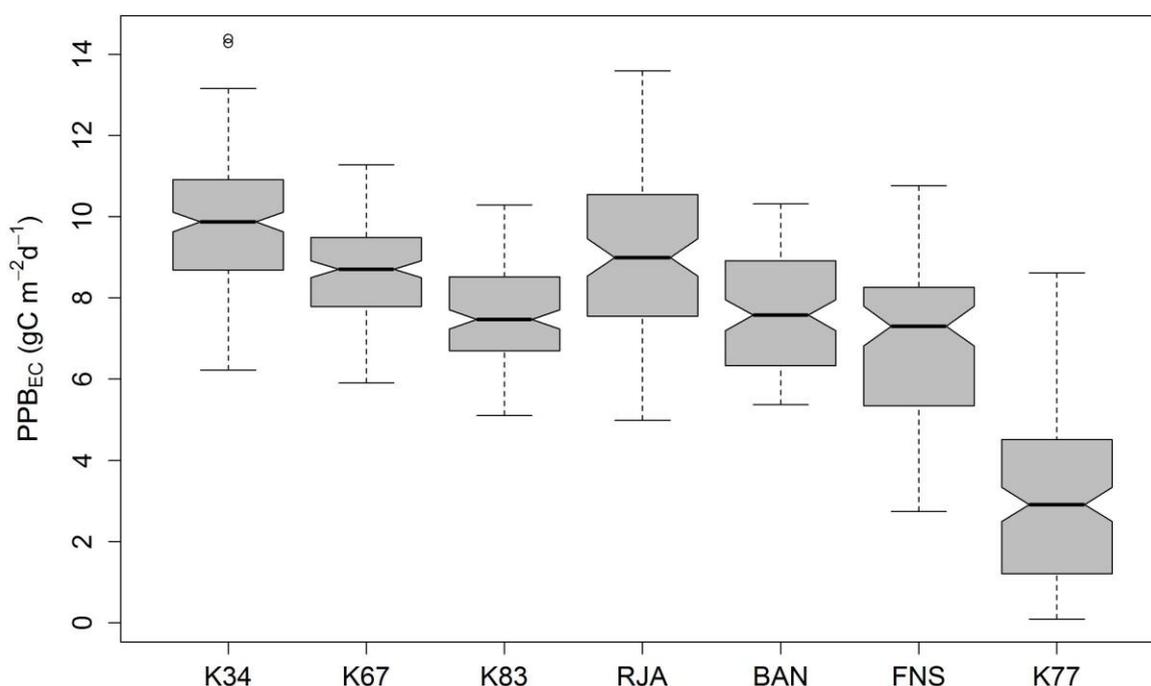


Figura 14. Distribuição dos dados de PPB_{EC} para cada torre.

Tabela 2. Estatísticas descritivas da PPB (g C m⁻² d⁻¹) de cada torre

Local	Período	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
K34	2000-2006	9,90	6,22	14,38	1,56
K67	2002-2005	8,62	5,91	11,27	1,15
K83	2000-2004	7,53	5,10	10,29	1,14
RJA	2000-2002	9,10	4,98	13,59	1,94
BAN	2003-2006	7,69	5,38	10,32	1,36
FNS	2000-2002	7,00	2,74	10,77	1,89
K77	2001-2005	3,10	0,09	8,62	2,13

As Figuras 15 a 21 mostram a variabilidade da PPB_{EC} e das variáveis meteorológicas em escala mensal para cada torre. As Figuras 22 a 28 mostram a matriz de correlação de Spearman para cada torre, apresentando o diagrama de dispersão entre as variáveis na parte inferior à diagonal e o coeficiente de correlação na parte superior à diagonal. A diagonal da matriz apresenta os histogramas das variáveis. A Tabela 3 resume as correlações entre PPB_{EC} e variáveis meteorológicas apresentadas na última coluna das matrizes de correlação. A PPB_{EC} apresentou alta e significativa correlação com a radiação no topo da atmosfera (R_{TOA}) para as torres avaliadas, exceto a K77. Essa correlação positiva pode ser observada nas Figuras 15-17 e 19-21, que mostram a época de maior produtividade sincronizada com a época de maior R_{TOA}.

Apesar da PPB_{EC} da maioria das torres apresentar correlação positiva com a R_{TOA}, ela apresentou correlação fraca e negativa com a PAR em K34, K67, K83, K77 e RJA e não apresentou correlação significativa ao nível de 95% de confiança em BAN e FNS. A sazonalidade da PAR está relacionada à cobertura de nuvens, pois no período seco a redução da cobertura de nuvens aumenta a transmitância atmosférica. Com isso, a PAR aumenta no

período seco e diminui no período úmido. Como na Amazônia equatorial (K34, K67, K83, K77) o período seco coincide com o equinócio de setembro, que produz o segundo máximo da radiação no topo da atmosfera, a sazonalidade da PAR nesta região é mais pronunciada. Já em RJA, BAN e FNS, que são as torres localizadas em maiores latitudes, a variação da R_{TOA} é sincronizada com a variação da chuva, com maior incidência de radiação no período úmido, quando a cobertura de nuvens é maior. Em virtude disso, a PAR apresenta menor variabilidade sazonal (Figuras 19 a 21). Nessas localidades a correlação entre R_{TOA} e chuva é alta e significativa (Figuras 26 a 28).

Beer et al. (2010) verificaram correlação negativa da PPB com a radiação de onda curta incidente (SWR_i) em diferentes biomas. Considerando que a SWR_i é altamente relacionada à PAR, estes resultados são compatíveis com os encontrados neste trabalho. Os autores justificaram que essa correlação negativa pode indicar um efeito indireto da radiação ou da temperatura na PPB por meio de mudanças no balanço hídrico. Isso ocorre porque níveis mais elevados de temperatura ou radiação estão geralmente associados a taxas de evapotranspiração mais elevadas, com consequentes efeitos negativos sobre a produtividade primária. A relação entre temperatura do ar, PAR e VPD foi verificada neste estudo, pois todas as localidades apresentaram altos valores de correlação entre estas três variáveis.

Outra interpretação possível para a correlação negativa entre PAR e PPB levantada por Beer et al. (2010) é o aumento dos níveis de radiação difusa associada com níveis globais mais baixos de radiação. A radiação difusa provoca um aumento na eficiência fotossintética do dossel, produzindo maiores níveis de fotossíntese quando comparado à radiação direta. Decorrente disto, alguns estudos (GU et al., 1999; MERCADO et al., 2009; RODERICK et al., 2001) têm mostrado que a produtividade da vegetação é influenciada por mudanças de radiação associadas com o aumento na cobertura de nuvens ou concentração de aerossóis. Sendo assim, o efeito da cobertura de nuvens e aerossóis sob a radiação pode explicar a correlação negativa encontrada entre a PAR e a PPB, pois a PAR direta diminui em períodos nebulosos, porém a sua fração difusa produz maior produtividade nestes períodos. Como a R_{TOA} não é influenciada pela cobertura de nuvens, sua correlação positiva com a PPB pode ser um indicativo de que a produtividade responde à radiação, seja em períodos nebulosos ou não, em resposta ao equilíbrio entre o aumento da fração direta e difusa da PAR. Oliveira et al. (2007) avaliaram o efeito de aerossóis e nuvens no fluxo de carbono em K83 e RJA e verificaram uma maior eficiência fotossintética em dias nublados e com carga de aerossóis, em comparação com dias de céu claro.

Nas áreas de floresta da Amazônia equatorial (K34, K67 e K83) a sazonalidade da PPB foi mais relacionada com a R_{TOA} . Em K34, a PPB não apresentou correlação significativa com a precipitação, VPD ou razão de Bowen, indicando que a PPB da região não é influenciada pela disponibilidade de água, sendo mais influenciada pela variação da radiação incidente no topo da atmosfera. Dentre as sete localidades avaliadas, K34 é a que possui maior precipitação anual média e o período seco mais curto, portanto, é a que possui menos condições de falta de água. Ademais, observações de raízes de árvores excepcionalmente profundas (NEPSTAD et al., 1994) sugerem mecanismos pelos quais as florestas tropicais mantêm o acesso a água do solo profundo, mesmo quando a superfície se torna suficientemente seca para limitar a atividade biológica.

Em K67 e K83, a PPB apresentou correlação negativa com a razão de Bowen, sendo que em K83 também apresentou fraca correlação positiva com a precipitação. Isso pode indicar uma pequena influência do estresse hídrico na fotossíntese, bem como uma relação indireta do aumento dos níveis de radiação na época seca. Esses resultados coincidem com os de Saleska et al. (2009), que encontraram pouca ou nenhuma evidência de limitação sazonal do metabolismo fotossintético em resposta à falta d'água, já que esses locais sustentaram altos níveis de PPB na estação seca. Em K77 e FNS, a PPB_{EC} foi mais fortemente correlacionada

com a razão de Bowen (correlação de -0,74 e -0,55, respectivamente). Isso evidencia que as áreas antropizadas apresentaram modificações no balanço de energia, com maior alocação da energia na forma de calor sensível e menos como calor latente, diminuindo a umidade do ar. Dessa forma, a produtividade da vegetação é limitada pela disponibilidade de água, diminuindo nos períodos de seca. Sendo assim, a vegetação (pasto e plantio agrícola) não responde ao aumento na radiação devido ao estresse hídrico. Além disso, esses tipos de uso e cobertura do solo são menos influenciados pela radiação difusa, pois não há o impedimento do dossel para produção de sombra e diminuição da eficiência fotossintética sob radiação direta. Em RJÁ e BAN, localidades em maiores latitudes, a PPB, além de apresentar correlação positiva com a R_{TOA} , também foi positivamente correlacionada com a precipitação e negativamente correlacionada com a VPD. Isso indica que a produtividade primária bruta nessas áreas é limitada tanto pela radiação (R_{TOA}) como pela disponibilidade de água.

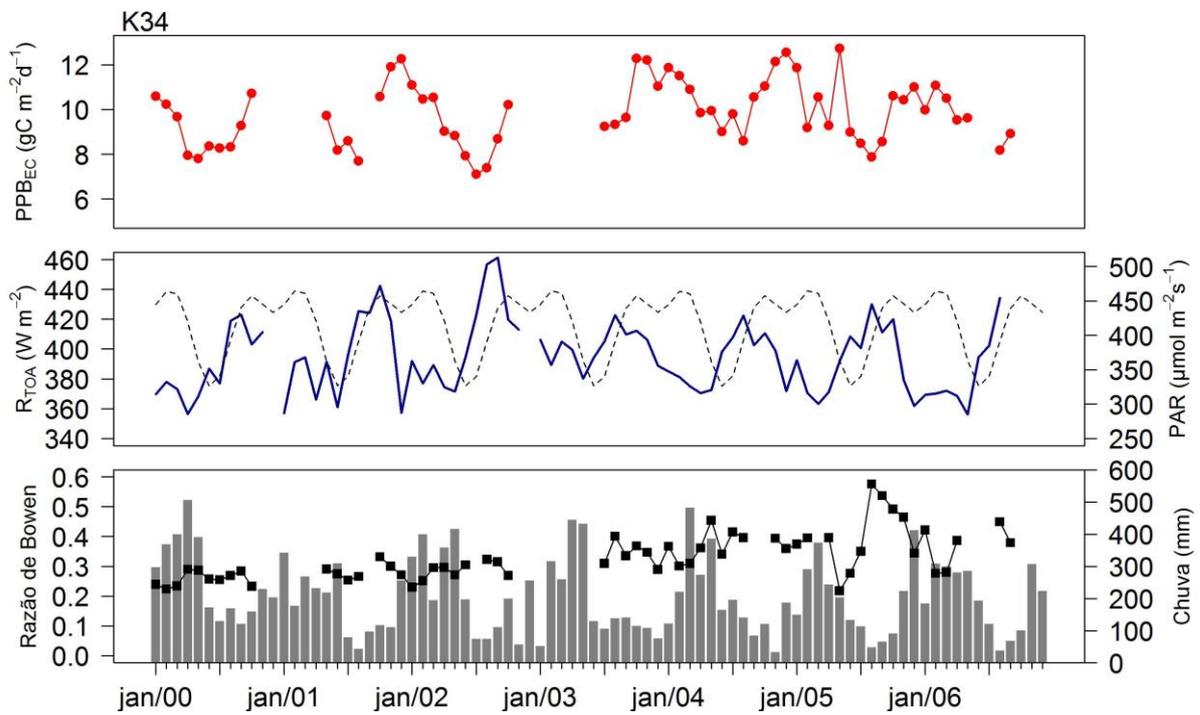


Figura 15. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em K34.

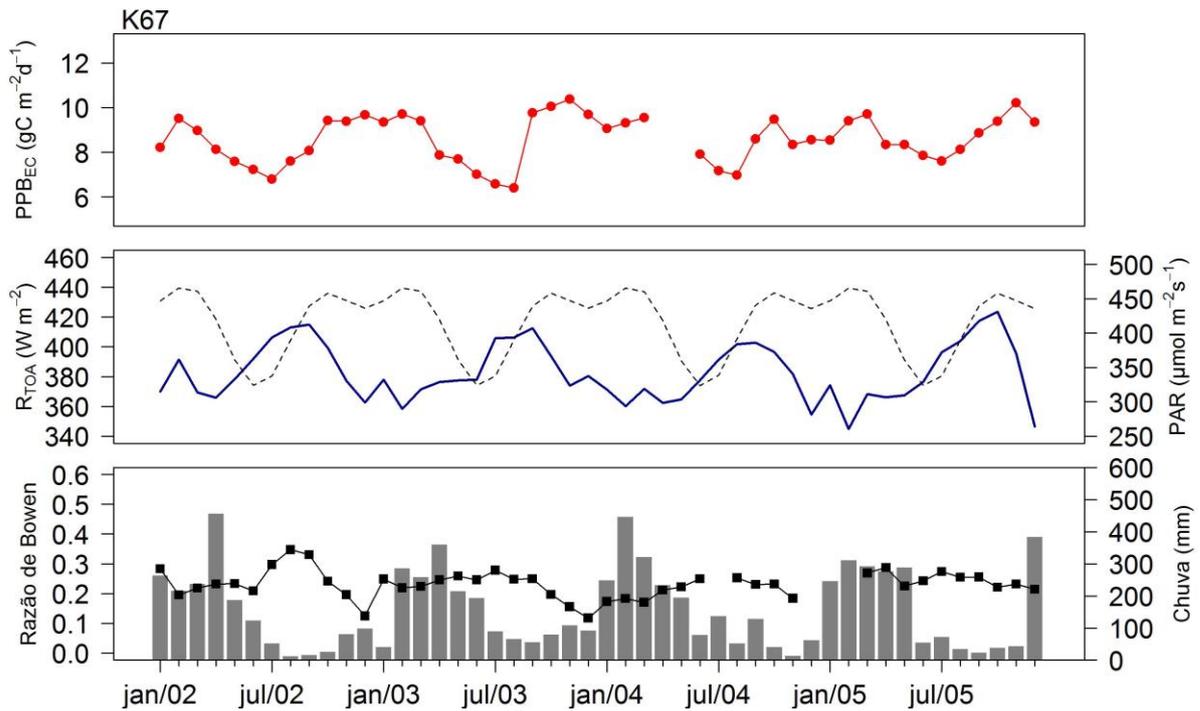


Figura 16. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em K67.

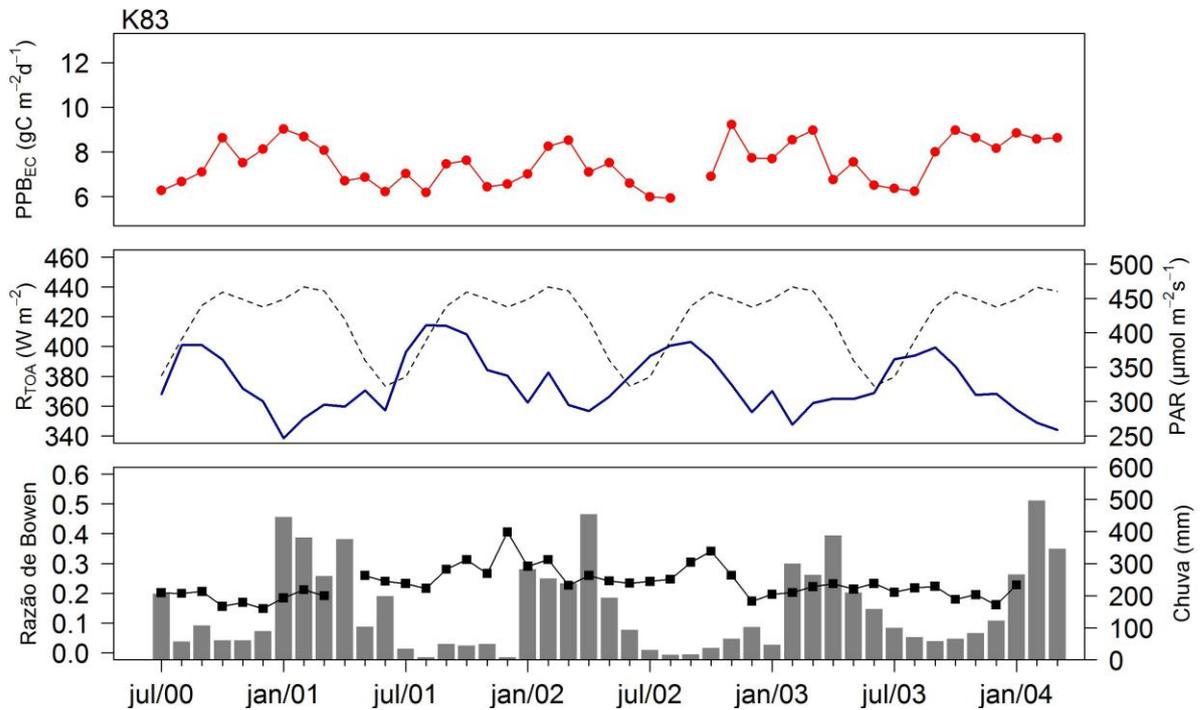


Figura 17. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em K83.

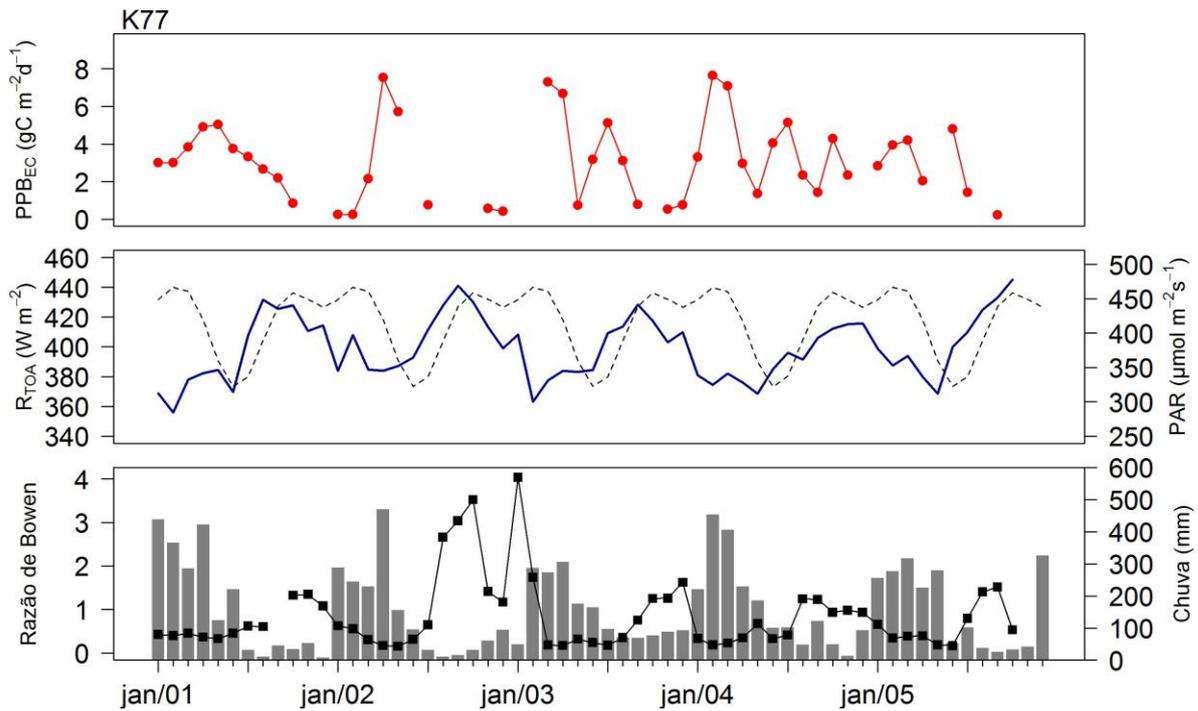


Figura 18. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em K77.

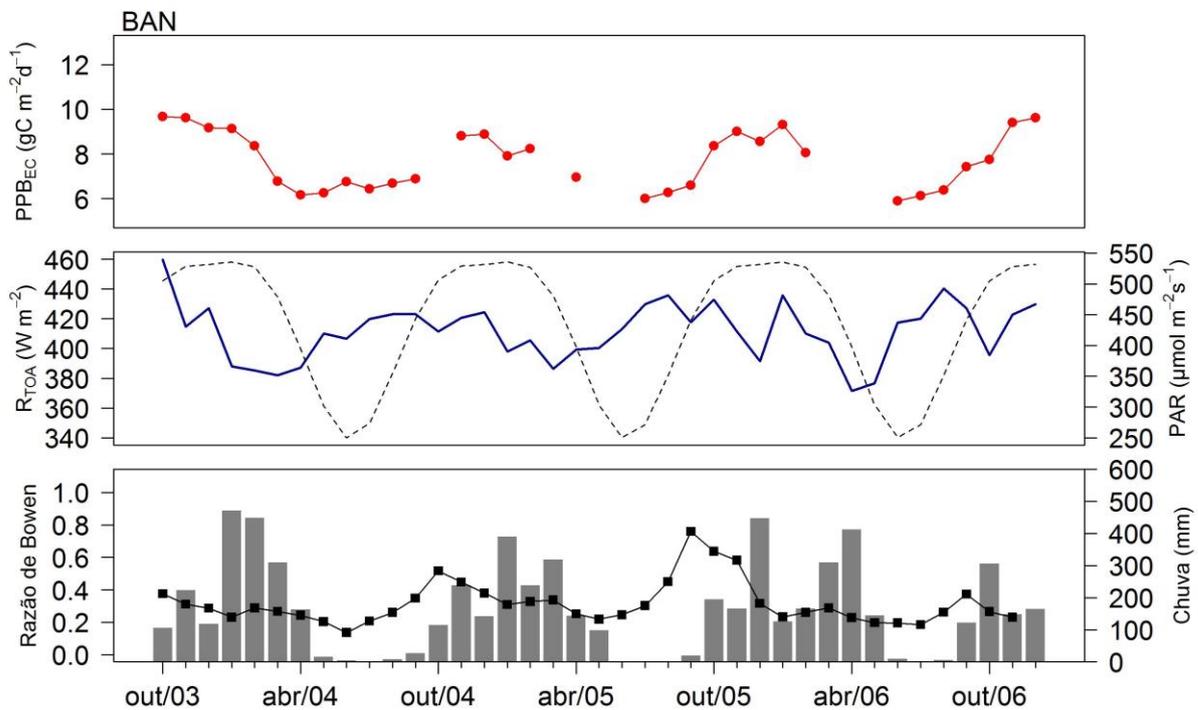


Figura 19. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em BAN.

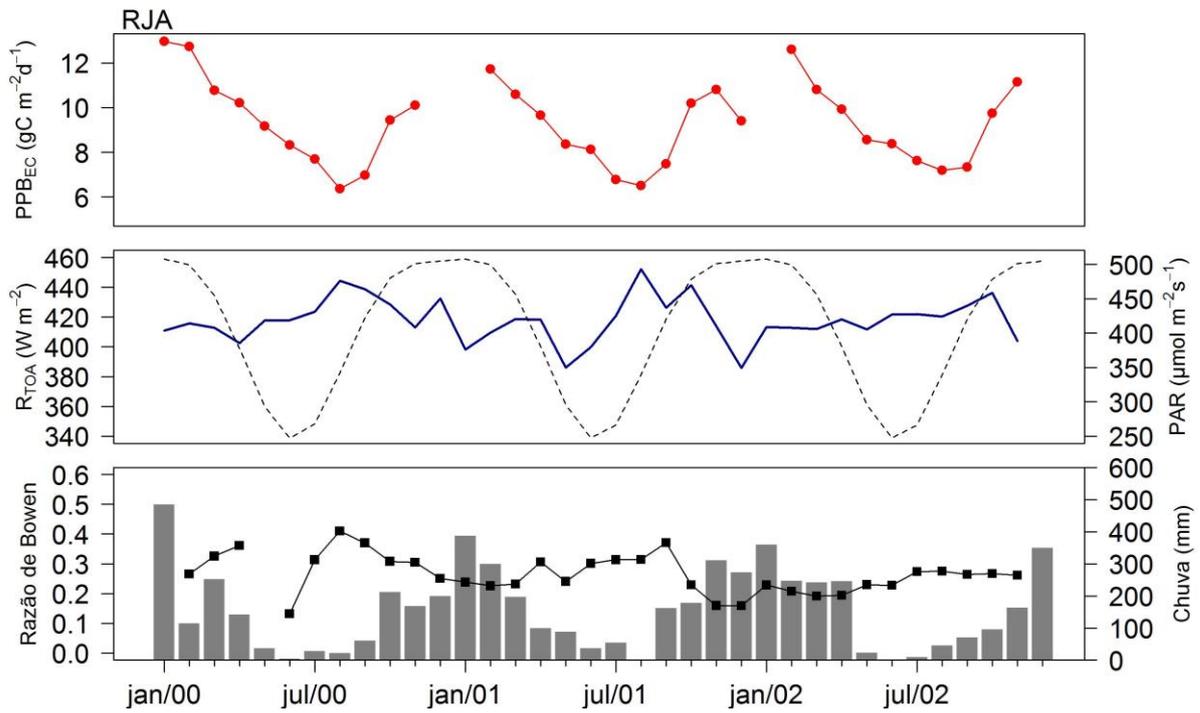


Figura 20. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em RJA.

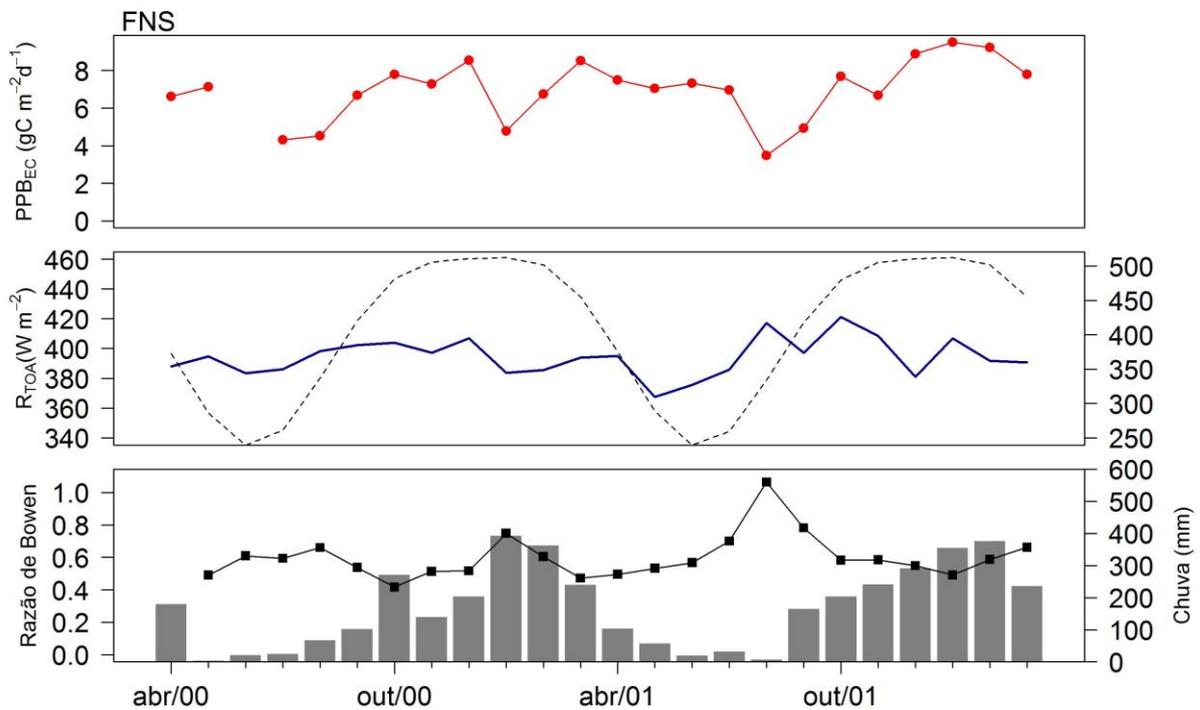


Figura 21. Variabilidade mensal da PPB (linha vermelha), radiação total TOA (linha tracejada), PAR na superfície (linha azul), razão de Bowen (linha preta) e chuva (barras cinzas) em FNS.

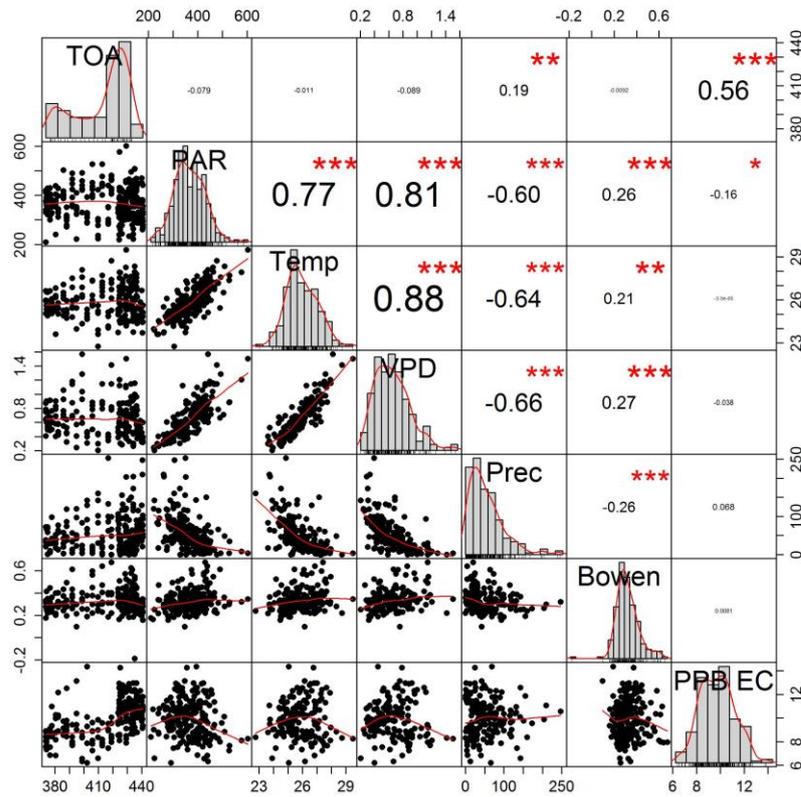


Figura 22. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre K34.¹

¹ Os símbolos em vermelho da parte acima da diagonal da matriz representam os níveis de significância da seguinte forma: símbolos (“***”, “**”, “*”, “.”, “”) <=> (0, 0.001, 0.01, 0.05, 0.1, 1)

Variáveis: TOA- radiação no topo da atmosfera, PAR- radiação fotossinteticamente ativa, Temp- temperatura do ar, VPD- Déficit de pressão de vapor, Prec- precipitação pluvial, Bowen- razão de Bowen, PPP EC- PPB obtida do método de covariância de vórtices turbulentos.

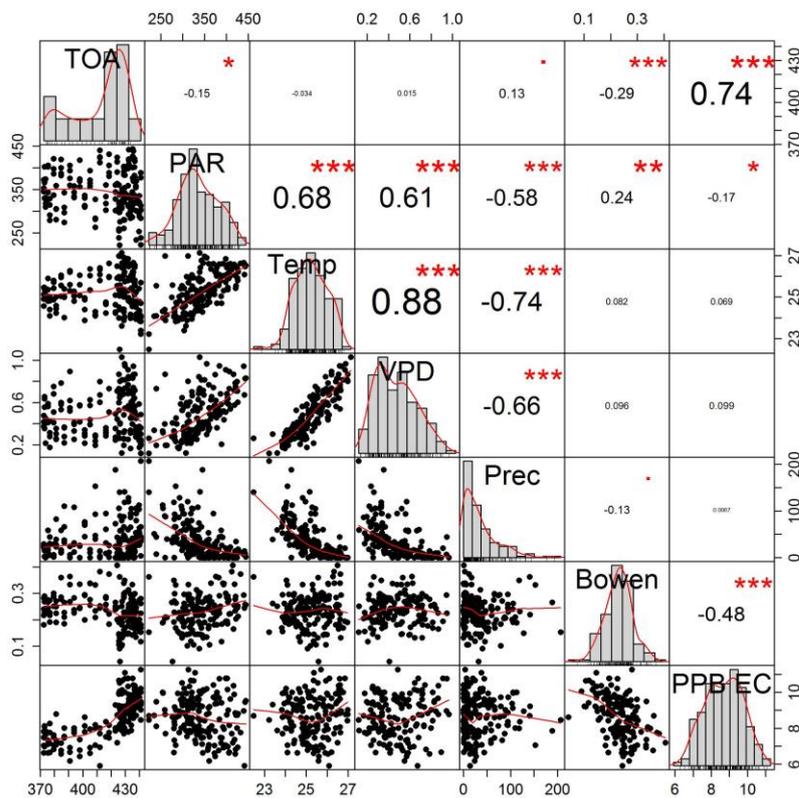


Figura 23. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre K67.¹

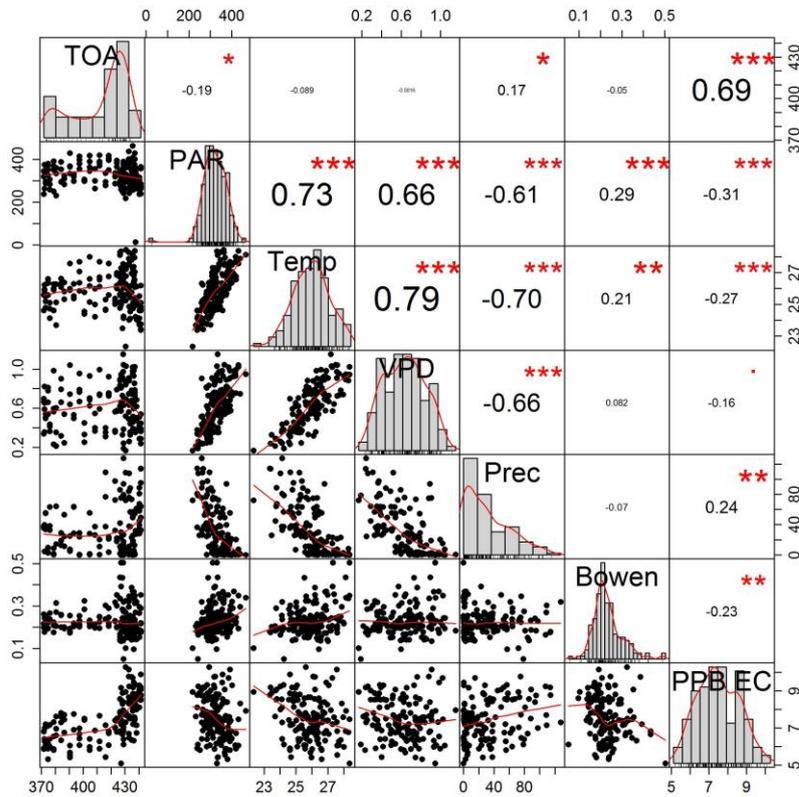


Figura 24. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre K83.¹

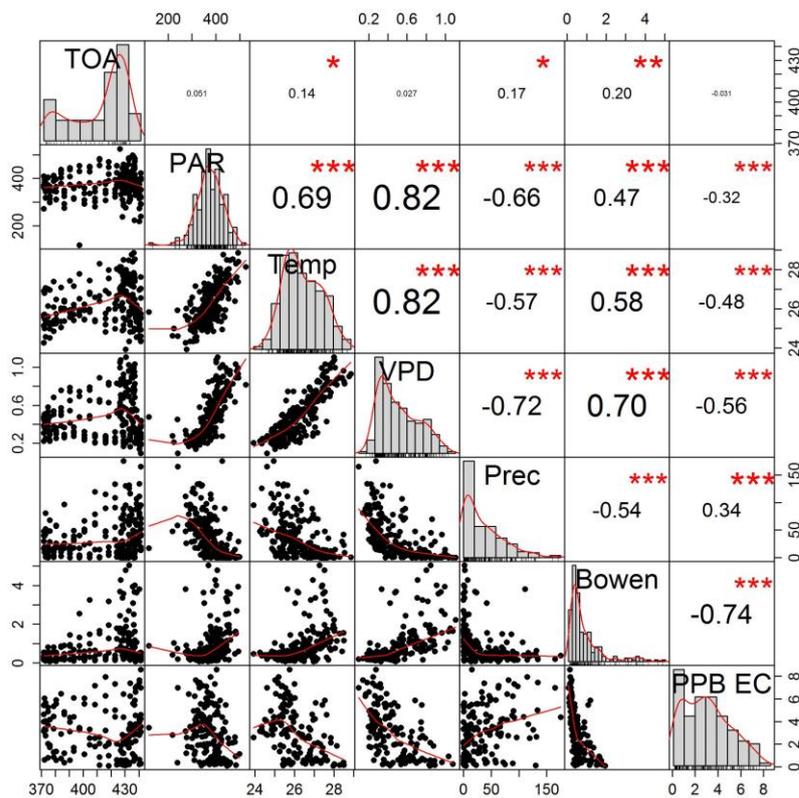


Figura 25. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre K77. ¹

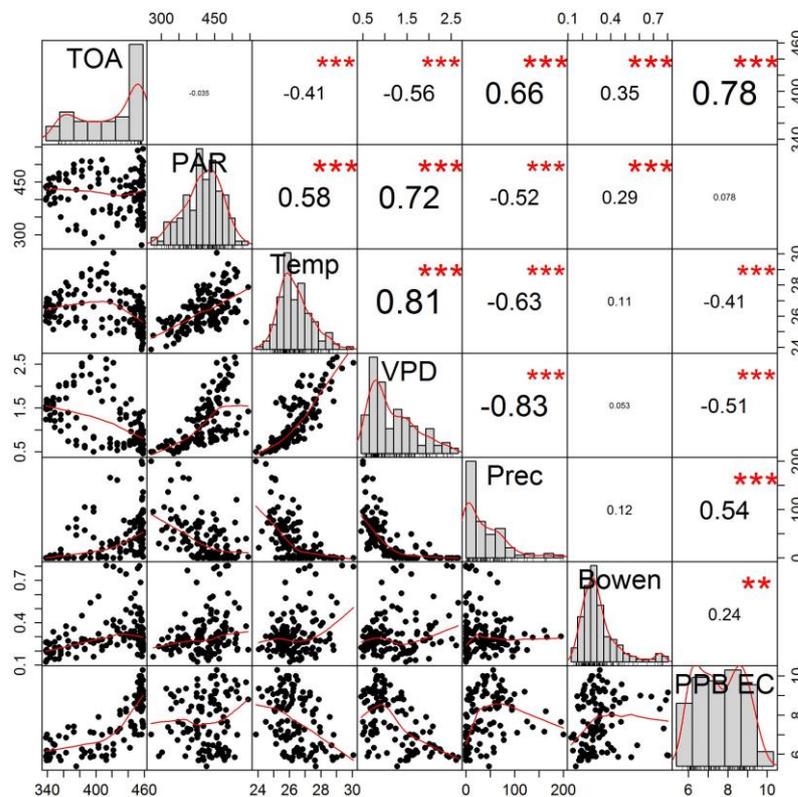


Figura 26. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre BAN. ¹

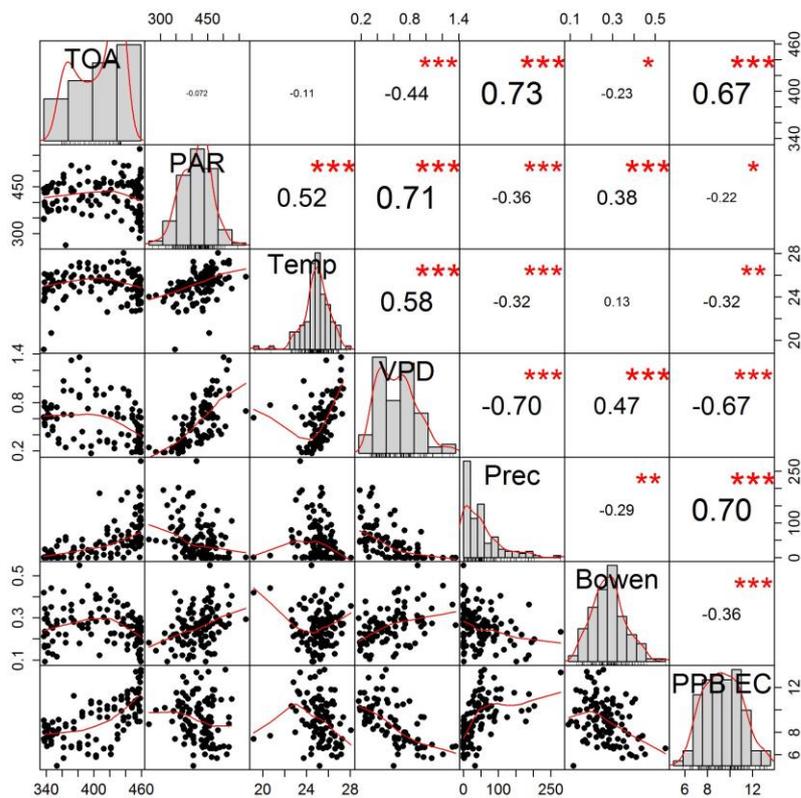


Figura 27. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre RJA. ¹

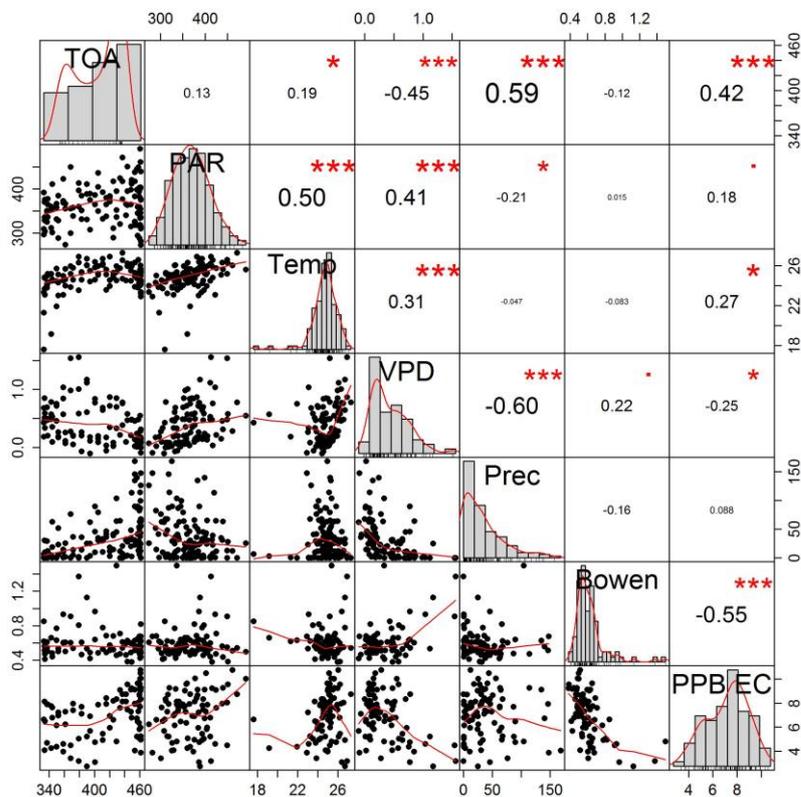


Figura 28. Matriz de correlação de Spearman das variáveis da torre FNS. ¹

Tabela 3. Correlação de Spearman entre PPB_{EC} e variáveis meteorológicas.¹

Variáveis Meteorológicas	K34	K67	K83	K77	BAN	RJA	FNS
R_{TOA}	0,56***	0,74***	0,69***	-0,03	0,78***	0,67***	0,42***
PAR	-0,16*	-0,17*	-0,31***	-0,32***	0,08	-0,22*	0,18
Temperatura do ar	0,00	0,07	-0,27***	-0,48***	-0,41***	-0,32**	0,27*
VPD	-0,04	0,10	-0,16	-0,56***	-0,51***	-0,67***	-0,25*
Chuva	0,07	0,01	0,24**	0,34***	0,54***	0,70***	0,09
Razão de Bowen	0,01	-0,48***	-0,23**	-0,74***	0,24**	-0,36***	-0,55***

Essas diferentes respostas à radiação e à água podem ser melhor visualizadas na Figura 29, que mostra, para cada torre, o diagrama de dispersão entre a PPB_{EC} e a R_{TOA} em duas situações: na estação seca, definida como sendo os meses com precipitação acumulada inferior a 100 mm, e na estação úmida, que são os demais meses. As áreas K34, K67 e K83, tiveram maior PPB com maiores níveis de R_{TOA} , tanto no período seco como no úmido. Isso indica que a PPB é limitada pela radiação, mas é pouco ou não é influenciada pelo regime hídrico. As áreas RJA e BAN tiveram maior PPB conforme aumentaram os níveis de R_{TOA} na estação úmida, no entanto, na estação seca a PPB não foi muito influenciada pela radiação. Já em K77 e FNS, as áreas antropizadas, a PPB aumentou pouco com a R_{TOA} na estação úmida e diminuiu na estação seca.

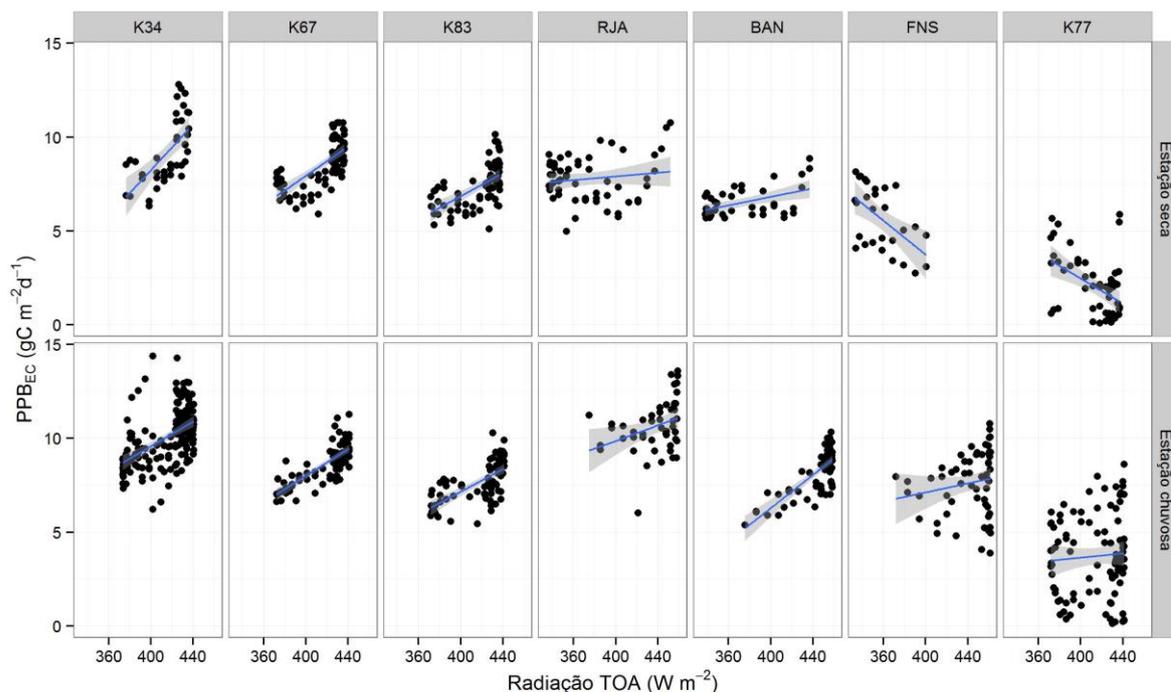


Figura 29. Diagrama de dispersão entre R_{TOA} e PPB_{EC} para a estação seca (acima) e chuvosa (abaixo) das torres em estudo.

A árvore de regressão (Figura 30) estimou a PPB em função da localização (qual torre que gerou os dados), da R_{TOA} , da razão de Bowen e da chuva derivada do TRMM

(pcp_trmm). A relação da PPB com o local da fonte dos dados (torre) é provavelmente influenciada pelo tipo de uso e cobertura do solo em que se encontra a torre, pois as menores produtividades foram estimadas para os locais com alguma interferência antrópica (K77, FNS e K83) ou de vegetação de transição (BAN). A localidade de plantio agrícola (K77) apresentou a PPB_{EC} influenciada pela razão de Bowen, com PPB média de $2,3 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para os períodos com razão de Bowen maior ou igual a 0,27, quando o calor sensível é maior que o calor latente, acarretando na geração de pouco vapor d'água, representando, portanto, períodos de baixa umidade. Os períodos mais úmidos, com razão de Bowen inferior a 0,27, apresentaram maior PPB_{EC} , de $5,9 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Para as outras seis torres, a R_{TOA} mostrou influenciar a magnitude da PPB . Quando a R_{TOA} foi menor que 423 W m^{-2} , as torres K83, BAN e FNS apresentaram PPB de $6,4 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Para estas mesmas localidades, a R_{TOA} superior ou igual a 423 W m^{-2} acarretou em $8,2 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. As demais torres (K34, RJA e K67), no período de menor radiação no topo da atmosfera, apresentaram a PPB limitada pela precipitação derivada do TRMM. Quando a precipitação mensal era inferior a 94 mm (período seco), a PPB era em média $7,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Para os períodos de maior precipitação mensal, a PPB era de $8,8 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Nos casos em que a R_{TOA} era maior, a PPB foi um pouco menor para K67 ($9,3 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e maior para K34 e RJA ($11 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Esse resultado confirma que a radiação no topo da atmosfera, a chuva, a razão de Bowen e o tipo de uso e cobertura do solo são variáveis importantes na determinação da produtividade primária bruta na região Amazônica.

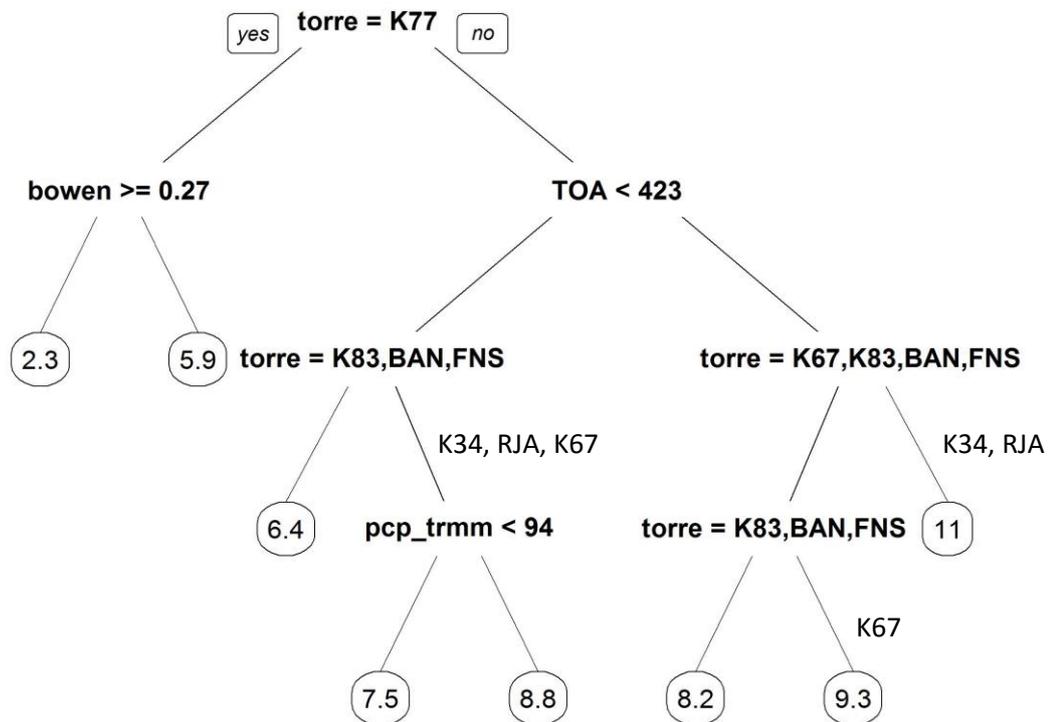


Figura 30. Árvore de regressão para estimativa da PPB média a partir das variáveis ambientais.

Os resultados encontrados neste trabalho coincidem com os de Restrepo-Coupe et al. (2013), que evidenciaram três padrões da sazonalidade da PPB na Amazônia, utilizando dados de torres de fluxo. O primeiro padrão é caracterizado pela manutenção ou aumento da PPB

durante o período seco nas áreas de floresta da Amazônia equatorial. O segundo padrão é caracterizado por uma diminuição modesta da PPB no período seco em RJA, sendo um indício do estresse hídrico. O terceiro padrão é associado a mudanças no uso e cobertura do solo, pois as áreas K77 e FNS apresentaram redução da PPB no período seco, padrão diferente do observado em áreas de floresta próximas. Os autores também relataram correlação negativa ou ausência de correlação entre PAR e PPB. Segundo os autores, a capacidade fotossintética do dossel é determinada predominantemente pela sua fenologia (queda de folhas e surgimento de novas folhas), que seria somente indiretamente relacionada à luz solar e com lapso no tempo. No entanto, não foi considerada a PAR difusa nem a relação entre a PPB e a R_{TOA} . O enfoque na fração direta da PAR, que possui menor eficiência fotossintética pode resultar numa aparente ausência de relação entre a PAR e a produtividade. No entanto, a correlação significativa com a R_{TOA} indica que a radiação está fortemente relacionada à fotossíntese. Provavelmente, a quantidade de radiação perdida pela reflexão em nuvens é compensada pelo aumento da eficiência fotossintética devido à maior fração de radiação difusa em dias nublados. Outros estudos são necessários para determinar a influência da radiação difusa na produtividade primária bruta da Amazônia.

4. CONCLUSÃO

A análise da produtividade primária bruta derivada do método de covariância de vórtices turbulentos evidenciou uma relação entre o uso e cobertura do solo e a PPB, mostrando que áreas de floresta tropical convertidas em pastagem ou plantio agrícola ou que sofreram corte seletivo apresentaram menor produtividade em relação a áreas conservadas. Áreas de pastagem e agricultura, cuja vegetação apresenta raízes superficiais, que perderam a capacidade das florestas de captar águas profundas, tiveram seu balanço hídrico afetado, com a diminuição da umidade do ar, verificada pelos altos valores da razão de Bowen. A sazonalidade da PPB foi predominantemente relacionada à radiação no topo da atmosfera nas áreas de floresta da Amazônia equatorial. Nas áreas mais ao sul, a PPB foi influenciada pelo R_{TOA} e também pela chuva e VPD, indicando limitação tanto pela radiação quanto pela disponibilidade de água. Os resultados apresentados neste estudo são importantes para esclarecer a interação entre as variáveis meteorológicas, o uso e cobertura do solo e a produtividade primária e a utilização dessas variáveis em modelos da PPB.

CAPÍTULO III

Validação do produto MOD17A2 para a Amazônia Legal com base em dados de torres micrometeorológicas

RESUMO

A Produtividade Primária Bruta (PPB) é comumente analisada a nível de superfície com dados providos de torres, com destaque para a técnica de covariância de vórtices turbulentos. Porém, esta técnica possui um custo alto e abrange uma pequena extensão. Nesse sentido, os métodos que empregam o sensoriamento remoto têm a vantagem de fornecer estimativas de produtividade primária para grandes áreas, onde os métodos ao nível do terreno não são viáveis. Este trabalho teve como objetivo validar a PPB estimada pelo produto MOD17A2 para a Amazônia Legal. Para tanto, duas versões desse produto foram comparadas com estimativas de PPB obtidas pelo método de covariância de vórtices turbulentos, derivadas de dados de sete torres de fluxo do Projeto LBA. A comparação foi baseada no Erro Médio, na Raiz do Erro Médio Quadrático e no coeficiente de correlação de Spearman. O MOD17A2 não apresentou boa estimativa de PPB comparado ao método de vórtices turbulentos, subestimando a produtividade para a maioria das localidades estudadas. A sazonalidade da PPB derivada do algoritmo MODIS somente foi similar à sazonalidade da PPB pelo método de vórtices turbulentos para as localidades ao sul da Amazônia Legal. As áreas na Amazônia central apresentaram padrão sazonal da PPB do MOD17A2 distinto do verificado pelos dados das torres micrometeorológicas. Diante disto, é necessário melhorar o algoritmo MOD17A2 para que este possa estimar PPB em função das diferentes respostas da vegetação à seca e à radiação. Esse melhor entendimento poderá contribuir para produzir melhores estimativas da PPB para a Amazônia e o uso do sensoriamento remoto em conjunto com os dados de superfície pode contribuir para gerar uma visão geral da PPB nesse bioma.

Palavras-chave: Amazônia, sensoriamento remoto, validação.

ABSTRACT

Gross primary productivity is often considered at the surface level with data coming from towers, especially the eddy covariance technique. However, this technique has a high cost and has a small footprint. Accordingly, the methods that employ remote sensing has the advantage of providing primary productivity estimates for large areas where the methods at the field level are not feasible. This study aims to validate the GPP estimated by MOD17A2 product for Legal Amazon. To this end, two versions of this product were compared with eddy covariance estimates, derived from seven LBA's flux towers data. The comparison was based on the Average Error, the Root Mean Square Error and the Spearman correlation coefficient. MOD17A2 had no good GPP estimate compared to the eddy covariance method, underestimating productivity for most locations studied. The seasonality derived from the MODIS GPP was only similar to the seasonality of eddy flux GPP in southern Amazon. The areas in central Amazonia showed distinct seasonal pattern in MOD17A2 GPP verified by data from the micrometeorological towers. Given this, it is necessary to improve the MOD17A2 algorithm to enable it to estimate GPP depending on the different vegetation responses to drought and radiation. This improved understanding may help to produce better estimates of GPP in Amazon and the use of remote sensing in conjunction with the surface data can contribute to generate an overview of GPP in this biome.

Keywords: Amazon, remote sensing, validation.

1. INTRODUÇÃO

A PPB refere-se ao processo fotossintético ao nível do ecossistema. No que diz respeito ao debate do aquecimento global, a PPB é reconhecida como um dos principais processos que controlam a troca de dióxido de carbono entre a terra e a atmosfera, sendo importante para compensar as emissões antropogênicas de CO₂ (BEER et al., 2010). As florestas tropicais, como a floresta Amazônica, possuem um potencial para estocar carbono, pois possuem alta produtividade. No entanto, se queimadas ou degradadas, esses ecossistemas podem atuar como importantes fontes de carbono para a atmosfera, agravando ainda mais a problemática das mudanças climáticas.

A PPB a nível de superfície é comumente estimada através do método de covariância de vórtices turbulentos, que utiliza dados de torres micrometeorológicas de fluxo (FALGE et al., 2002). No entanto, esse método possui abrangência espacial limitada, que depende da altura da torre, das características físicas do dossel e da velocidade do vento (OSMOND et al., 2004). Sendo assim, para que seja representativo em áreas extensas, como a Amazônia, seria necessário um grande número de torres micrometeorológicas, o que acarretaria em um alto custo de implementação e manutenção.

Dados de sensoriamento remoto podem ser utilizados para caracterizar a estrutura da vegetação e estimar a PPB em escala regional e global, suprimindo os déficits na representação espacial das metodologias de superfície (RUNNING et al., 2004). Duas vertentes tem utilizado dados de sensoriamento remoto para estimar a variabilidade da PPB (VERMA et al., 2014). A primeira utiliza índices de vegetação como indicadores de PPB, partindo do princípio de que esses índices refletem a variabilidade da PPB. No entanto, resultados controversos foram obtidos por estudos na região Amazônica que utilizaram esse princípio, por apresentarem diferentes respostas da vegetação à variações climáticas, principalmente em períodos de seca (HUETE et al., 2006; SALESKA et al., 2007; SAMANTA et al., 2010; XU et al., 2011).

A segunda vertente utiliza dados derivados de SR como variáveis de entrada em modelos que estimam PPB. Dentre os modelos existentes, o modelo baseado no conceito de eficiência de uso da luz (LUE ou ϵ) é provavelmente o de maior potencial para estimar adequadamente a dinâmica espacial e temporal da PPB (WU et al., 2010). Esse modelo propõe uma relação proporcional entre a produtividade e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa que é absorvida pelo dossel da vegetação (MONTEITH, 1972; 1977).

Desde 2000, a NASA fornece o produto MOD17A2, baseado no conceito de LUE, que estima PPB de 8 em 8 dias em uma resolução espacial de 1 km (HEINSCH et al., 2003). Os dados necessários ao algoritmo utilizado nesse produto constituem-se de dados do sensor MODIS (FAPAR e classificação da cobertura do solo), dados meteorológicos (PAR, T_{min} e VPD) e parâmetros tabelados de acordo com o tipo de bioma (BPLUT). Desde seu lançamento, várias versões do MOD17A2 já foram criadas com o propósito de trazer melhorias às estimativas de PPB. Duas versões estão disponíveis atualmente, a versão 5.0 e a 5.1, que receberam melhorias no produto de FAPAR (MOD15A2) em relação a versões anteriores. A versão 5.0 utiliza os dados meteorológicos de reanálise do GMAO, enquanto que a versão 5.1 usa dados meteorológicos de reanálise II do NCEP-DOE (ZHAO et al., 2005).

É necessário validar as estimativas do produto MOD17A2 com dados de superfície para determinar sua acurácia. Vários trabalhos já foram realizados com o objetivo de validar esse produto, porém a maior parte deles está concentrada em ecossistemas de clima não tropical (CANDELA et al., 2013; HEINSCH et al., 2006; SCHUBERT et al., 2012; TURNER

et al., 2003; TURNER et al., 2005; TURNER et al., 2006a; WU et al., 2010; YAN et al., 2015). Poucos estudos de validação foram realizados em áreas de clima tropical. Kanniah et al. (2009) avaliaram o algoritmo de PPB do MODIS (versões 4.5, 4.8 e 5.0) em um local de savana tropical no norte da Austrália. Os resultados desse estudo indicaram que os produtos MODIS capturaram bem a variação sazonal na PPB. Propastin et al. (2012) avaliaram o efeito da saturação fotossintética do dossel na estimativa da PPB do MOD17A2 em um local de floresta tropical na Indonésia, demonstrando a necessidade de melhorias no algoritmo para florestas tropicais.

Turner et al. (2006b) e Verma et al. (2014) avaliaram o desempenho do MOD17A2 em diferentes biomas, comparando com dados de torres micrometeorológicas. Dentre as localidades avaliadas por esses autores, algumas são localizadas na Amazônia. No entanto, a comparação entre a PPB do MOD17A2 e das torres tem foco na variabilidade interanual da PPB, com poucas considerações sobre as implicações da sazonalidade das variáveis de entrada do algoritmo MODIS em Turner et al. (2006b).

Por outro lado, diferentes padrões sazonais da PPB foram relatados na Amazônia em função do tipo do uso e cobertura do solo, da limitação da vegetação à água ou à radiação e dos padrões fenológicos do dossel (RESTREPO-COUBE et al., 2013). Diante das peculiaridades da variabilidade da PPB na região Amazônica, é importante avaliar se o produto MOD17A2 é eficiente para estimar PPB nessa região em diferentes escalas temporais e se consegue distinguir os distintos padrões de variabilidade espacial. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo validar a PPB estimada pelo produto MOD17A2 para a Amazônia Legal, com dados de sete torres micrometeorológicas de fluxo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar a eficácia dos dados do sensor MODIS para a estimativa da PPB, o produto MOD17A2 foi validado por meio da comparação com dados de superfície de torres micrometeorológicas de fluxo. O produto MOD17A2 foi obtido no site https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool para a Amazônia Legal no período de 2000 a 2006 em duas versões: 5.0 e 5.1. As imagens foram transformadas no software MRT (USGS, 2014) do formato HDF para GEOTIFF e da projeção Sinusoidal para o sistema geográfico de coordenadas em *datum* WGS 84. Os valores dos pixels referentes aos números digitais das imagens MODIS foram convertidos em valores biofísicos (Kg C m^{-2}) através da multiplicação pelo fator de escala (0,0001) (HEINSCH et al., 2003). Os valores de PPB também foram transformados do valor acumulado de 8 em 8 dias para média de 8 em 8 dias e convertidos de $\text{Kg C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para $\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Os dados de PPB do produto MOD17A2 utilizados para a validação foram os referentes à média dos pixels num raio de 2,5 km da torre, para evitar erros devido à correção geométrica da imagem do satélite, bem como erros devido à presença de pixels contaminados por nuvens ou outras interferências. Somente foram utilizados os pixels com boa qualidade, obtida pelo MODIS Quality Control (QC). Nesse caso, um pixel foi considerado apenas quando o QC atendia as seguintes exigências:

- categoria "MODLAND_QC" é igual a 0 (o melhor possível) ou 1 (OK, mas não o melhor);
- categoria "CLOUDSTATE" é igual a 0 (nuvens significativas não presentes) ou 3 (estado de cobertura de nuvens não definido, assumi-se estado de céu claro);
- categoria "SCF_QC" igual a 0 (método utilizado com melhores resultados possíveis) ou 1 (método usado com saturação).

Foram utilizados dados de PPB na escala de 8 em 8 dias de sete torres micrometeorológicas de fluxo de carbono e energia do Projeto LBA, cuja descrição e características encontram-se no capítulo 2. Os dados horários foram obtidos no site ftp://ftp.climatemodeling.org/pub/lba-mip/data/Brasil_flux/ para o período 2000-2006 e convertidos para a escala de 8 em 8 dias.

Para a comparação dos dados derivados dos satélites com os valores obtidos em superfície foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos: Erro Médio (EM), Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) e coeficiente de correlação de Spearman (ρ). A significância do ρ foi avaliada pelo teste t de Student, com α de 0,05. Todas as análises foram realizadas no software R, versão 3.1.0.

Para determinar o período seco e úmido das localidades avaliadas utilizaram-se dados de chuva provenientes do produto 3B43 do satélite TRMM. Os dados de chuva do TRMM foram obtidos para o período de 2000 a 2006, no formato NetCDF, no site <http://mirador.gsfc.nasa.gov> (TRMM, 2014). Esse produto fornece dados com resolução espacial de aproximadamente 30 km e resolução temporal mensal. Considerou-se o valor de chuva do pixel em que a torre estava contida. Os dados, originalmente $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, foram convertidos para $\text{mm}\cdot\text{mês}^{-1}$. Considerou-se como período seco os meses que possuíam chuva mensal acumulada inferior a 100 mm e os demais meses como período úmido.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta as estatísticas descritivas da PPB derivada do método de covariância de vórtices turbulentos (PPB_{EC}) e das versões 5.0 e 5.1 do algoritmo MOD17A2 ($\text{PPB}_{\text{MOD5.0}}$ e $\text{PPB}_{\text{MOD5.1}}$, respectivamente), de cada ano com dados disponíveis para cada área avaliada. Os dados na escala de 8 em 8 dias somente foram considerados para o cálculo das estatísticas descritivas quando a PPB derivada dos três métodos (torre e duas versões MODIS) estava presente. Observa-se na Tabela 4 e na Figura 31 que a PPB média anual estimada pelas duas versões do algoritmo MODIS foi inferior a média da PPB_{EC} para quase todos os anos avaliados nas localidades K34, K67, K83, RJA, BAN e FNS. A área K77 foi a única na qual o MOD17A2 superestimou a PPB média de todos os anos. Esta superestimativa pode ser decorrente de influência do entorno da área na estimativa da produtividade, já que a área de pastagem em K77 é rodeada por cobertura de floresta tropical. Além disso, as intervenções agrícolas, tais como queimadas, aragens e colheitas afetam a produtividade, no entanto o algoritmo MOD17A2 não leva em consideração a ocorrência dessas intervenções.

Também pode-se observar a tendência de subestimativa ou superestimativa nos valores de erro médio da Tabela 5. Observa-se que o erro médio é negativo para K34, K67, K83, RJA, BAN e FNS, variando de $-0,48$ a $-2,64 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para a versão 5.0 e de $-0,67$ a $-2,93 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para a versão 5.1. K77 apresentou valores altos e positivos de erro médio, de $3,93 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para a versão 5.0 e $4,29 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para a versão 5.1.

Outros trabalhos também verificaram a subestimativa da PPB do MOD17A2 para a maioria dos locais avaliados. Em um estudo realizado por Sjöström et al. (2013) na África, que utilizou dados de 12 torres de fluxo, o MOD17A2 (versão 5.1) subestimou a PPB para a maioria dos casos, com um erro médio de $-0,70 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Kanniah et al. (2009) verificaram erros negativos para a estimativa da PPB da versão 5.0 em um local de savana tropical no norte da Austrália, que foram associados a erros nos valores de ϵ_{max} e VPD.

Tabela 4. Variabilidade interanual da PPB_{EC} e da PPB estimada pelo MOD17A2 (g C m⁻² d⁻¹)

Local	Ano	n	PPB _{EC}				PPB _{MOD 5.0}				PPB _{MOD 5.1}			
			média	sd	máx	mín	média	sd	máx	mín	média	sd	máx	mín
K34	2000	24	8.99	1.22	11.13	6.22	6.82	2.61	10.37	1.71	6.50	1.94	10.02	2.00
	2001	20	9.60	1.56	12.38	6.58	8.23	1.88	11.00	4.45	7.13	1.14	9.15	5.14
	2002	24	8.72	1.33	11.10	6.33	8.49	1.57	10.95	5.01	6.86	1.21	8.59	4.14
	2003	21	10.52	1.47	12.96	8.42	7.31	2.53	9.89	0.41	7.31	1.34	8.64	3.04
	2004	27	10.73	1.48	14.27	8.60	7.14	1.52	9.33	3.01	7.16	1.19	8.85	4.10
	2005	26	9.69	1.87	14.38	7.59	6.93	2.05	9.87	3.16	6.69	1.45	8.70	3.45
	2006	12	9.61	1.29	12.33	7.84	6.77	1.27	8.66	4.99	6.02	1.03	7.93	4.50
K67	2002	36	8.27	1.05	10.13	6.64	7.34	2.00	10.75	1.64	6.14	1.54	9.49	2.85
	2003	32	8.45	1.54	11.08	5.91	6.78	1.89	9.98	1.22	6.74	1.59	10.11	2.09
	2004	32	8.39	1.03	10.20	6.66	6.98	2.38	10.21	2.06	6.34	1.76	8.99	2.38
	2005	30	8.74	0.92	10.75	7.07	5.98	2.34	9.89	0.99	5.77	1.90	10.39	1.09
K83	2000	17	7.48	0.93	9.30	5.56	8.29	1.38	9.76	5.51	7.48	1.15	9.20	4.67
	2001	29	7.19	0.97	9.25	5.10	6.92	2.19	10.08	2.68	6.70	1.81	9.91	2.21
	2002	26	7.06	0.95	9.75	5.32	6.87	2.25	10.55	1.83	6.19	1.83	9.52	2.41
	2003	28	7.57	1.28	10.14	5.43	7.21	1.41	9.44	4.56	7.31	1.34	9.73	4.34
	2004	7	8.97	0.85	10.29	7.99	3.85	1.56	6.14	1.60	5.99	1.49	8.23	3.73
RJA	2000	24	8.67	1.73	11.85	5.75	8.22	2.46	16.10	3.24	8.05	0.95	9.21	5.79
	2001	28	8.63	1.96	11.79	4.98	7.77	2.55	11.09	1.73	7.53	1.27	9.34	4.65
	2002	28	8.77	1.70	13.59	6.64	8.30	1.98	11.64	4.87	7.74	1.21	10.07	4.90
BAN	2003	9	9.40	0.54	10.01	8.27	9.45	1.58	10.67	6.14	5.90	1.56	8.54	3.81
	2004	36	7.20	1.23	9.33	5.38	5.36	2.99	10.25	0.10	4.84	2.77	8.59	0.09
	2005	30	7.37	1.24	9.90	5.85	5.09	3.23	10.46	0.12	4.17	2.42	7.74	0.00
	2006	22	7.35	1.21	9.55	5.68	3.95	3.29	9.71	0.00	5.46	2.74	10.46	0.20
FNS	2000	21	6.77	2.07	10.48	3.98	3.90	1.58	9.29	1.83	5.55	1.24	7.58	2.29
	2001	30	6.51	1.68	9.10	2.74	4.35	1.65	8.01	0.19	5.49	1.34	7.32	2.27
	2002	6	9.18	0.88	10.77	8.13	4.61	0.91	5.58	3.58	6.57	0.59	7.51	5.91
K77	2001	22	3.05	1.32	5.58	0.84	7.64	1.58	9.96	4.69	7.36	1.40	10.83	4.58
	2002	11	2.24	2.91	7.96	0.20	6.86	1.74	9.21	3.06	6.71	1.99	9.28	3.54
	2003	22	2.45	2.05	7.32	0.32	6.99	1.56	9.28	2.66	7.61	1.38	10.27	5.07
	2004	34	3.52	2.19	8.62	0.60	6.78	2.24	9.77	0.13	6.95	1.55	9.13	3.06
	2005	15	1.92	1.83	5.67	0.09	6.49	1.90	9.07	2.89	7.17	1.72	10.50	4.18

n- Tamanho da amostra de dados em um ano, na escala de 8 em 8 dias, de um total de 46 dias.
sd- Desvio-padrão. máx- Valor máximo. mín- Valor mínimo.

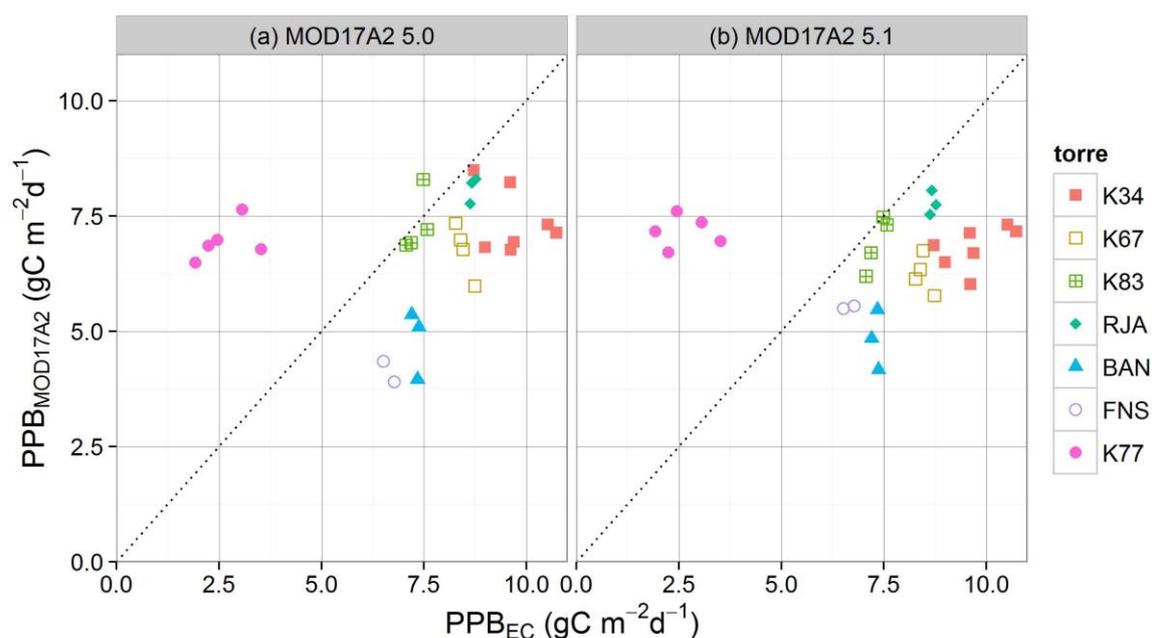


Figura 31. Comparação entre a média anual da PPB da torre e das versões 5.0 (a) e 5.1 (b) do MOD17A2.

Tabela 5. Erro médio ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$), REMQ ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e coeficiente de correlação de Spearman entre a PPB das torres e das duas versões do MOD17A2.

Local	Versão do MOD17A2	EM	REMQ	rho
K34	5.0	-2.38	3.75	-0.16*
	5.1	-2.93	3.72	-0.24*
K67	5.0	-1.68	3.04	0.02
	5.1	-2.21	3.30	-0.49*
K83	5.0	-0.48	2.55	-0.15
	5.1	-0.67	2.36	-0.36*
RJA	5.0	-0.64	2.40	0.46*
	5.1	-1.05	2.25	0.20
BAN	5.0	-2.15	3.43	0.62*
	5.1	-2.62	3.71	0.18
FNS	5.0	-2.64	3.24	0.44*
	5.1	-1.26	2.12	0.43*
K77	5.0	3.93	5.13	-0.21*
	5.1	4.29	4.99	0.10

* p-valor < 0,05

As áreas localizadas na Amazônia equatorial (K34, K67, K83 e K77) apresentaram distribuição similar dos dados de PPB do MODIS em ambas as versões (Figura 32b e 32c), não condizendo com o gradiente de produtividade verificado nos dados das torres para essas quatro localidades (Figura 32a). Sendo assim, para esses locais próximos as Equador, não foi possível distinguir o tipo de uso e cobertura do solo pela análise da produtividade derivada do

produto MOD17A2, ou seja, distinguir as áreas de floresta de alta produtividade das áreas antropizadas com baixa produtividade.

Já a PPB estimada pelas duas versões do MOD17A2 das áreas RJ, FNS e BAN apresentou um gradiente de produtividade condizente com os dados das torres, com maior PPB na área de floresta em RJ (Figura 32). A PPB estimada pela versão 5.1 em FNS apresentou melhor estimativa em relação à versão 5.0, apresentando uma distribuição mais próxima aos dados da torre. Com isso, somente FNS apresentou menor erro médio para a versão 5.1.

Apesar de não representar bem a variabilidade anual da PPB dentro as localidades de floresta, o MOD17A2 foi capaz de distinguir, de modo geral, as gradações de PPB anual entre floresta tropical, floresta de transição e pastagem (Figuras 31 e 32), mas não capturou bem a PPB anual da localidade K77, cujo uso do solo era de pastagem até final de 2001 e depois, plantio agrícola. Esse resultado é compatível com o encontrado por Verma et al. (2014) que, em um estudo comparando a PPB_{EC} anual com dados de modelos baseados em sensoriamento remoto (dentre eles o MOD17A2), verificaram que os modelos derivados do sensoriamento remoto foram capazes de capturar as variações espaciais da PPB média anual em diferentes biomas, com exceção dos plantios agrícolas.

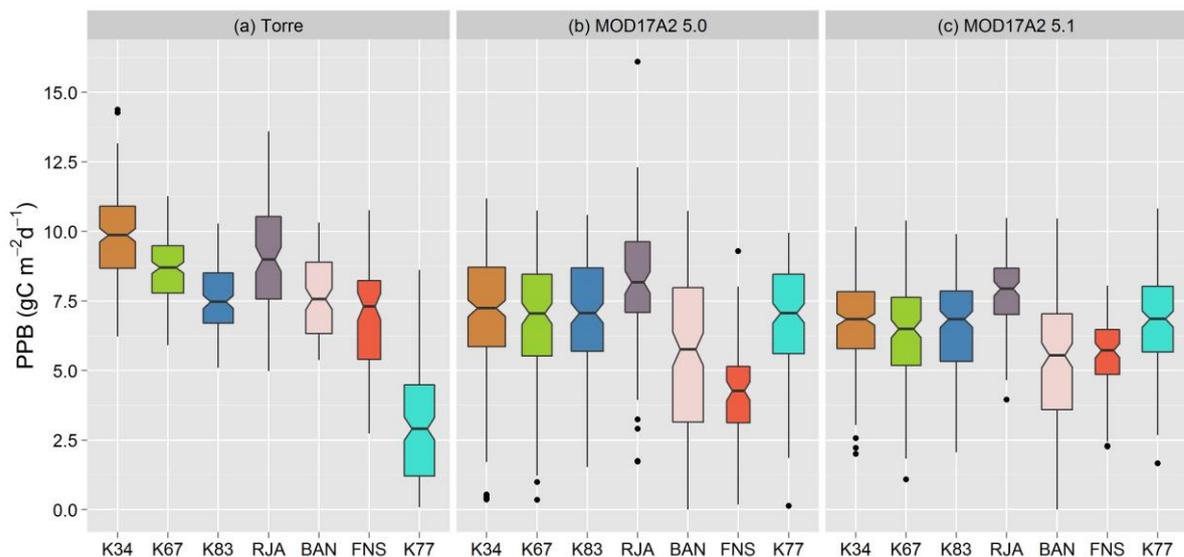


Figura 32. Boxplot da PPB derivada da torre (a) e das duas versões do MODIS (b-c) para cada localidade estudada.

Em ambas as versões, observa-se que a PPB média anual foi melhor estimada em K83 e RJ (Figuras 31 e 32), que foram as áreas que apresentaram menor erro médio. Essas áreas também apresentaram baixos valores de REMQ (Tabela 5). A REMQ mostra que a magnitude dos erros de estimativa da PPB na Amazônia Legal varia de 2,12 a 5,13 $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$, com maior REMQ em K77. Apesar dos baixos valores de erro verificados em K83, esta área não apresentou coeficiente de correlação significativo entre a PPB_{EC} e a $PPB_{MOD5.0}$ e apresentou coeficiente de correlação negativo para a versão 5.1. Sendo assim, a boa estimativa da média anual se justifica pela subestimativa da PPB em alguns meses (dezembro, janeiro, fevereiro e março) e superestimativa em outros (julho e agosto), o que compensa o erro médio anual (Figuras 33 e 34).

A sazonalidade da PPB estimada pelo MODIS foi similar a sazonalidade da PPB estimada pelo método de covariância de vórtices turbulentos nas localidades BAN, RJ e FNS (Figura 33). Estes locais encontram-se em zonas onde o período seco é mais

pronunciado, de forma que a estiagem atua como limitante da PPB. Já as regiões localizadas na Amazônia central (K34, K67, K77 e K83) apresentaram sazonalidade conflitante entre o MOD17A2 e o dados das torres. Este padrão regional também é observado nos valores do coeficiente de correlação de Spearman (Tabela 5), que evidenciam a ausência de correlação ou correlação negativa para a região central da Amazônia Legal, devido a diferença sazonal entre os dados de superfície e os dados oriundos de sensoriamento remoto. Já as localidades BAN, RJA e FNS apresentaram correlação positiva significativa para a versão 5.0, sendo que a versão 5.1 somente apresentou correlação positiva significativa para a torre FNS.

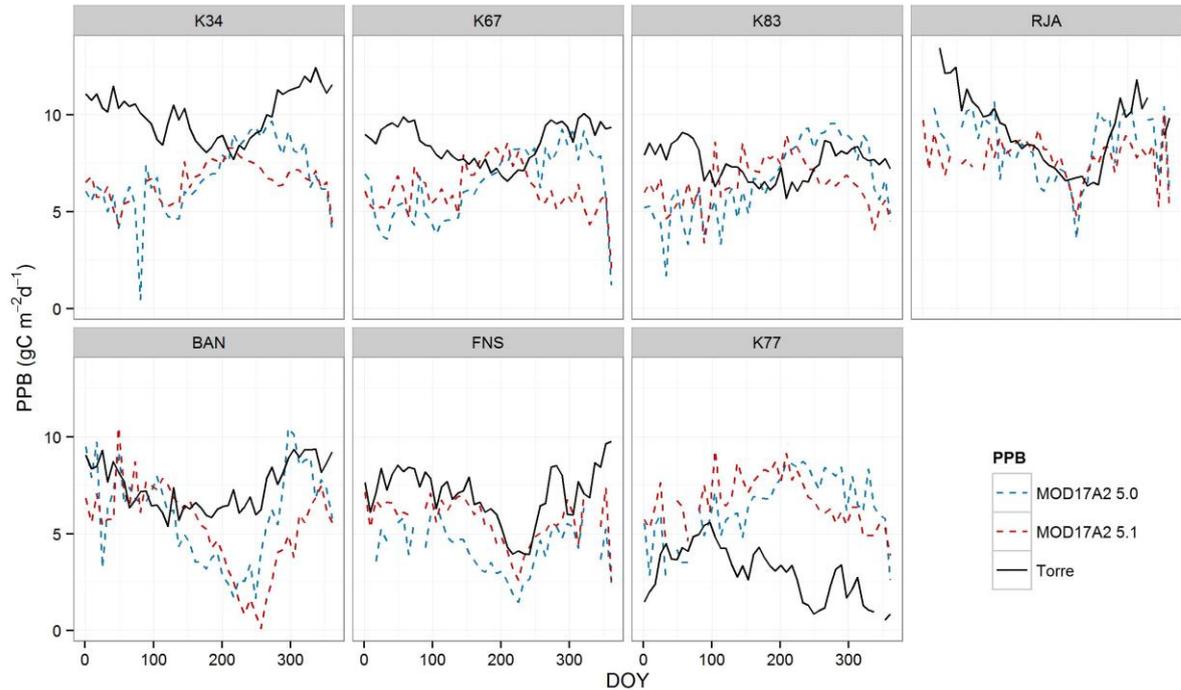


Figura 33. PPB média ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) das torres (linha contínua preta), do MOD17A2 versão 5.0 (linha tracejada azul) e do MOD17A2 versão 5.1 (linha tracejada vermelha).

A ausência de correlação ou correlação negativa entre a PPB_{EC} e a PPB derivada do MOD17A2 para as áreas da Amazônia equatorial está provavelmente relacionada ao mesmo padrão de correlação observado entre a PAR e a PPB_{EC} na região Amazônica, já que a PAR é variável de entrada do algoritmo MODIS e, portanto, influencia no valor estimado da PPB. Como a PAR não está diretamente relacionada à produtividade primária bruta da Amazônia Legal, seu uso na estimativa da PPB pelo MOD17A2 produz erros relacionados à sua sazonalidade. Na Figura 34 observa-se que os menores valores de erro mensal em K34, K67 e K83 estão associados ao período com maiores níveis de PAR (julho, agosto e setembro), que coincide com a estação seca. Em alguns meses da estação seca percebe-se inclusive uma superestimativa da PPB do MOD17A2, principalmente em K83. Já no período úmido, com baixos níveis de PAR, o MOD17A2 subestimou a PPB, com maiores valores de erro médio.

Nas áreas localizadas ao sul (RJA, FNS e BAN), a correlação positiva entre o MOD17A2 e a PPB_{EC} , está provavelmente relacionada à menor sazonalidade da PAR na região e a limitação da PPB à água, que é levada em conta pelo MOD17A2 através do controle da eficiência de uso da luz pelo VPD. Com isso, mesmo com mais PAR disponível, a vegetação produz menos no período seco devido à limitação a água existente nessas regiões. Sendo assim, o período do ano com menor PPB do MOD17A2 coincide com o período de menor PPB_{EC} . No entanto, em BAN a PPB foi mais subestimada pelo MOD17A2 (Figura 34)

no período seco. Essa área é sazonalmente inundada e o período seco apresenta menor evapotranspiração (BORMA et al., 2009), diferentemente das outras regiões, onde a evapotranspiração aumenta em virtude da maior radiação recebida. Devido a essa menor evapotranspiração, os valores de VPD são maiores na estação seca, diminuindo muito a PPB do MOD17A2.

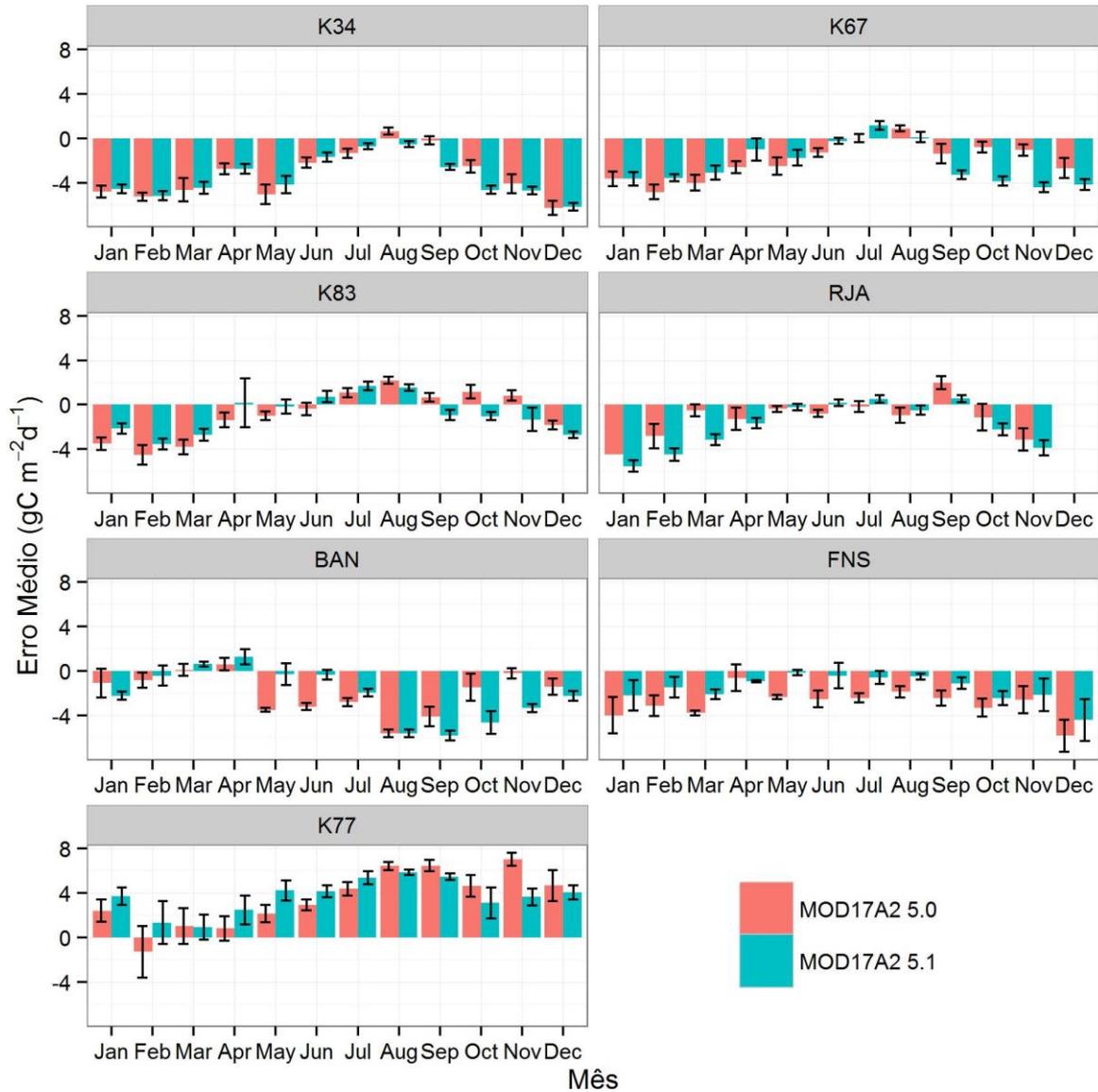


Figura 34. Erro médio mensal com desvio-padrão da estimativa das duas versões do MOD17A2 para as sete áreas avaliadas.

A Figura 35 mostra uma relação negativa entre o erro existente nas duas versões do MOD17A2 e a produtividade estimada pelo método de covariância de vórtices turbulentos no período seco e úmido para a maioria das áreas estudadas (com exceção da versão 5.0 em BAN). Observa-se uma tendência de superestimativa dos menores valores de PPB e subestimativa para os valores mais altos de PPB. Em BAN, observa-se que os maiores erros negativos estão associados ao período seco, provavelmente devido à elevada VPD, como discutido acima. Turner et al. (2006b) também verificaram subestimativas do produto MOD17A2 (versão 4.5) em relação à PPB_{EC} para áreas de alta produtividade e

superestimativas para áreas de baixa produtividade. Esses resultados indicam uma saturação da PPB para altos níveis de radiação ou altos valores de índice de área foliar, como verificado por outros autores (IBROM et al., 2008; PROPASTIN et al., 2012; TURNER et al., 2003).

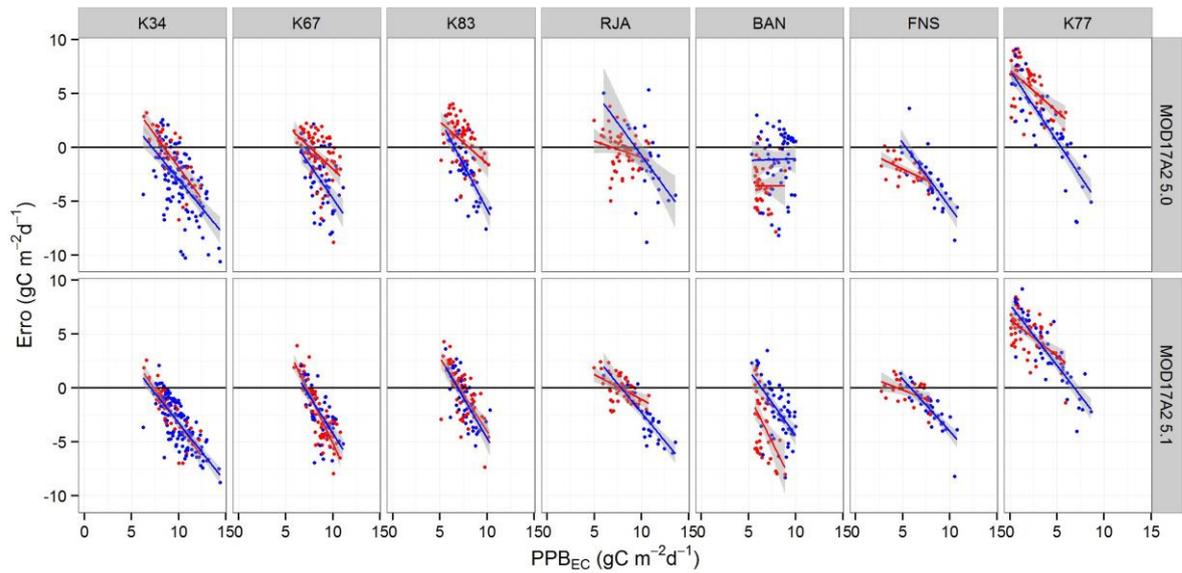


Figura 35. Relação do erro com a PPB_{EC} para as sete áreas na estação seca (em vermelho) e chuvosa (em azul).

4 CONCLUSÃO

O MOD17A2 não apresentou boa estimativa de PPB comparado ao método de vórtices turbulentos, subestimando a produtividade para a maioria das localidades estudadas. A versão 5.1 do MOD17A2 somente apresentou melhorias em relação à versão 5.0 para a área FNS. A sazonalidade da PPB derivada do algoritmo MODIS somente foi similar à sazonalidade da PPB pelo método de vórtices turbulentos para as localidades ao sul da Amazônia Legal, onde o período seco é mais definido e age como um limitante da PPB. As áreas na Amazônia central apresentaram padrão sazonal da PPB do MOD17A2 distinto do verificado pelos dados das torres micrometeorológicas. Esse padrão indica que o atual algoritmo de PPB do MODIS apresenta limitações sistemáticas para estimar produtividade na Amazônia Legal. Diante disto, é necessário melhorar o algoritmo MOD17A2 para que este possa estimar PPB em função das diferentes respostas da vegetação à seca e à radiação.

CONCLUSÕES GERAIS

A Produtividade Primária Bruta é influenciada pelas condições ambientais, tais como níveis de radiação solar e água disponível à vegetação, bem como pelas modificações no uso e cobertura do solo. Conhecer a relação entre a produtividade e essas variáveis é de extrema importância para compreender como a estrutura e a função dos ecossistemas florestais podem ser afetadas pelas mudanças climáticas e por modificações antrópicas. No entanto, ainda não está claro quais são os fatores preponderantes para determinar a variabilidade da PPB em toda a Amazônia Legal. Este trabalho indica que a interação entre os fatores radiação solar, chuva e tipo de uso e cobertura do solo é responsável pela variação da PPB na Amazônia Legal. No entanto, é necessário investigar melhor o papel da radiação e de suas frações difusa e direta sob a fotossíntese da região tropical. Esse melhor entendimento poderá contribuir para produzir melhores estimativas da PPB para a Amazônia e o uso do sensoriamento remoto em conjunto com os dados de superfície pode contribuir para gerar uma visão geral da PPB nesse bioma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, D. K.; SOUZA, E. P.; COSTA, A. A. Convecção Úmida na Amazônia: Implicações para Modelagem Numérica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, p.168-178, 2009.

AGUIAR, R. G.; RANDOW, C. V.; PRIANTE FILHO, N.; MANZI, A. O.; AGUIAR, L. J. G.; CARDOSO, F. L. Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, p.248-257, 2006.

AMAZONAS, Governo do Estado. **A Floresta Amazônica e seu Papel nas Mudanças Climáticas**. Manaus: SDS/CECLIMA; 2009.

ANANIAS, D. S.; SOUZA, E. B.; SOUZA, P. F. S.; SOUZA, A. M. L.; VITORINO, M. I.; TEIXEIRA, G. M.; FERREIRA, D. B. S. Climatologia da estrutura vertical da atmosfera em novembro para Belém-PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, p.218-226, 2010.

ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F.; KAYANO, M. T.; CANDIDO, L. A. Seasonal anomalous rainfall in the central and eastern Amazon and associated anomalous oceanic and atmospheric patterns. **International Journal of Climatology**, v.32, n.8, p.1193-1205, 2012.

ARAÚJO, A. C.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; DALLAROSA, R.; STEFANI, P.; VON RANDOW, C.; MANZI, A. O.; CULF, A. D.; GASH, J. H. C.; VALENTINI, R.; KABAT, P. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: the Manaus LBA site. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n.D20, 2002.

ARAÚJO, R. G.; ANDREOLI, R. V.; CANDIDO, L. A.; KAYANO, M.T.; SOUZA, R. A. F. A influência do evento El Niño-Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, v.43, n.4, p.469-480, 2013.

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

BEER, C.; REICHSTEIN, M.; TOMELLERI, E.; CIAIS, P.; JUNG, M.; CARVALHAIS, N.; RÖDENBECK, C.; ARAIN, M. A.; BALDOCCHI, D.; BONAN, G. B.; BONDEAU, A.; CESCATTI, A.; LASSLOP, G.; LINDROTH, A.; LOMAS, M.; LUYSSAERT, S.; MARGOLIS, H.; OLESON, K. W.; ROUPSARD, O.; VEENENDAAL, E.; VIOVY, N.; WILLIAMS, C.; WOODWARD, F. I.; PAPALE, D. Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate. **Science**, v.329, n.5993, p.834-838, 2010.

BORMA, L. S.; ROCHA, H. R.; CABRAL, O. M.; VON RANDOW, C.; COLLICCHIO, E.; KURZATKOWSKI, D.; BRUGGER, P. J.; FREITAS, H.; TUNNUS, R.; OLIVEIRA, L.; RENNÓ, C. D.; ARTAXO, P. Atmosphere and hydrological controls of the evapotranspiration over a floodplain forest in the Bananal Island region, Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v.114, n.12, 2009.

BRANDO, P. M.; BALCH, J. K.; NEPSTAD, D. C.; MORTON, D. C.; PUTZ, F. E.; COE, M. T.; SILVÉRIO, D.; MACEDO, M. N.; DAVIDSON, E. A.; NÓBREGA, C. C.;

ALENCAR, A.; SOARES-FILHO, B. S. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Science**, v.111, n.17, p.6347-6352, 2014. doi: 10.1073/pnas.1305499111

BRASIL. Lei nº **1.806**, de 06 de janeiro de 1953. Dispõe sobre o Plano de Valorização Econômica da Amazônia, cria a superintendência da sua execução e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 07 jan. 1953. Seção 1, p. 276.

CABRAL, O. M. R.; GASH, J. H.C.; ROCHA, HUMBERTO R.; MARSDEN, C.; LIGO, M. A.V.; FREITAS, H. C.; TATSCH, J. D.; GOMES, E. Fluxes of CO₂ above a plantation of Eucalyptus in southeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, n.1, p.49-59, 2011.

CANDELA, E. D.; GONZÁLEZ, G. M.; LABRADOR, J. P.; ISABEL, M. P. M.; RIAÑO, D.; GARCÍA, M. I.; CÓLERA, C. G.; CARRARA, A. Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa. **GeoFocus**, v.13, n.1, p. 291-310, 2013.

CAÚLA, R. H.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; LYRA, G. B.; DELGADO, R. C.; HEILBRON FILHO, P. F. L. Overview of fire foci causes and locations in Brazil based on meteorological satellite data from 1998 to 2011. **Environmental Earth Sciences (Print)**, v.74, p.1497-1508, 2015. doi: 10.1007%2Fs12665-015-4142-z

CARNEIRO FILHO, A. **Atlas de pressões e ameaças às terras indígenas na Amazônia brasileira**. São Paulo : Instituto Socioambiental, 2009. 48p.

CERQUEIRA, J. L. R. P. **Estudo radiometeorológico da Região Amazônica**. 2006. 261 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro.

CHANG, M. Sequestro de Carbono Florestal: oportunidades e riscos para o Brasil. **Revista paranaense de Desenvolvimento**, Curitiba, n. 102, p. 85-101, 2002.

CHAPIN III, F. S.; MATSON, P. A.; MOONEY, H. A. **Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology**. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002. 436 p.

CIAIS P.; SABINE, C.; BALA, G.; BOPP, L.; BROVKIN, V.; CANADELL, J.; CHHABRA, A.; DEFRIES, R.; GALLOWAY, J.; HEIMANN, M.; JONES, C.; LE QUÉRE, C.; MYNENI, R. B.; PIAO, S.; THORNTON, P. **Carbon and Other Biogeochemical Cycles**. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

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.

COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. **Journal of Hydrology**, v.360, n.1, p.207-216, 2008.

CONRADO, D.; MUNHOZ, D. E. A.; SANTOS, M. C.; MELLO, R. F. L.; SILVA, V. B. Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas. In: SANQUETTA, C. R.; ZILLOTTO, M. A. B.; CORTE, A. P. **Carbono: desenvolvimento tecnológico, aplicação e mercado global**. Curitiba: UFPR/Ecoplan, 2006. p. 80-92.

COUTINHO, L. M. O conceito de bioma. **Acta Botanica Brasilica**. v.20, n.1, p.1-11, 2006.

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **El Niño e La Niña**. 2014. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 22 jul. 2014.

DA ROCHA, H. R.; GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D.; MENTON, M. C.; PINTO, L. D. V. O.; FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. M. S. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in Eastern Amazonia. **Ecological Applications**, v.14, n.sp4, p.22-32, 2004.

DE'ATH, G.; FABRICIUS, K. E. Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis. **Ecology**. v.81, n.11, p.3178–3192, 2000.

EMBRAPA. **Aspectos Ecológicos**. 2014. Disponível em: <<http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/aspec.htm>>. Acesso em: 21 jun. 2014.

FAS - Fundação Amazonas Sustentável. **Relatório de Gestão 2011**. Disponível em: fas-amazonas.org/versao/.../RELATÓRIO-DE-GESTÃO-2011-FAS.pdf. Acesso em: 18 fev. 2014.

FALGE, E.; BALDOCCHI, D.; TENHUNEN, J.; AUBINET, M.; BAKWIN, P.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; BURBA, G.; CLEMENT, R.; DAVIS, K. J.; ELBERS, J. A.; GOLDSTEIN, A. H.; GRELLE, A.; GRANIER, A.; GUÐMUNDSSON, J.; HOLLINGER, D.; KOWALSKI, A. S.; KATUL, G.; LAW, B. E.; MALHI, Y.; MEYERS, T.; MONSON, R. K.; MUNGER, J. W.; OECHEL, W.; PAW U, K. T.; PILEGAARD, K.; RANNIK, Ü.; REBMANN, C.; SUYKER, A.; VALENTINI, R.; WILSON, K.; WOFSY, S. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.113, n.1-4, p.53-74, 2002.

FERREIRA DA COSTA, R.; FEITOSA, J. R. P.; FISCH, G.; SOUZA, S. S.; NOBRE, C. A. Variabilidade Diária da Precipitação em Regiões de Floresta e Pastagem na Amazônia. **Acta Amazonica**, v.28, n.4, p.395-408, 1998.

FIELD, C. B.; RANDERSON, J.T.; MALMSTROM, C.M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of the Environment**. v.281, n.1, p.237-240, 1995.

FIGUEIRA, A. M. S.; MILLER, S. D.; SOUSA, C. A. D.; MENTON, M. C.; MAIA, A. R.; DA ROCHA, H. R.; GOULDEN, M. L. Effects of selective logging on tropical forest tree growth. **Journal of Geophysical Research**, v.113, n. G00B05, p.1-11, 2008.

FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitations distribution over Central and Western Tropical South America. **Climanálise** - Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.5, n.6, p. 36 - 45, 1990.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma Revisão Geral sobre o Clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, v.28, n.2, p.101-126, 1998.

FROUZ, J.; PIZL, V.; CIENCIALA, E.; KALCIK, J. Carbon storage in post-mining forest, the role of tree biomass and soil bioturbation. **Biogeochemistry**, v.94, n.2, p.111-121, 2009.

GANJEGUNTE, G. K.; WICK, A. F.; STAHL, P. D.; VANCE, G. F. Accumulation and composition of total organic carbon in reclaimed coal mine lands. **Land Degradation & Development**, v.20, n.2, p.156-175, 2009.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; MASEK, J. G.; VERMA, S. B.; SUYKER, A.E. Synoptic Monitoring of Gross Primary Productivity of Maize Using Landsat Data. **IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters**, v.5, n.2, p.133-137, 2008.

GOUGH, C. M. Terrestrial Primary Production: Fuel for Life. **Nature Education Knowledge**, v.3, n.10, p.28, 2012.

GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D.; DA ROCHA, H. R.; MENTON, M. C.; FREITAS, H. C.; SILVA FIGUEIRA, A. M.; SOUSA, C. A. D. Diel and seasonal patterns of tropical forest CO₂ exchange. **Ecological Applications**, v.14, n.sp4, p.42-54, 2004.

GUENTHER, B.; XIONG, X.; SALOMONSON, V. V.; BARNES, W. L.; YOUNG, J. On-orbit performance of the earth observing system moderate resolution imaging spectroradiometer; first year of data. **Remote Sensing of Environment**. v.83, n.1-2, p.16-30, 2002.

GU, L.; FUENTES, J. D.; SHUGART, H. H.; STAEBLER, R. M.; BLACK, T. A. Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: results from two North American deciduous forests. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n.D24, p.31421-31434, 1999.

HEINSCH, F. A.; REEVES, M.; VOTAVA, P.; KANG, S.Y.; MILESI, C.; ZHAO, M.S.; GLASSY, J.; JOLLY, W.M.; LOEHMAN, R.; BOWKER, C.F.; KIMBALL, J.S.; NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W. **User's guide, GPP and NPP (MOD17A2/A3) products**, NASA MODIS land algorithm [online]. 2003. Disponível em: <http://www.ntsug.umd.edu/modis/MOD17UsersGuide.pdf> Acesso em: 27 mar 2014.

HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W.; KIMBALL, J. S.; NEMANI, R. R.; DAVIS, K. J.; BOLSTAD, P. V.; COOK, B. D.; DESAI, A. R.; RICCIUTO, D. M.; LAW, B. E.; OECHEL, W. C.; KWON, H.; LUO, H.; WOFSY, S. C.; DUNN, A. L.; MUNGER, J. W.; BALDOCCHI, D. D.; XU, L.; HOLLINGER, D. Y.; RICHARDSON, A. D.; STOY, P. C.; SIQUEIRA, M. B. S.; MONSON, R. K.; BURNS, S. P.; FLANAGAN, L. B. Evaluation of Remote Sensing Based Terrestrial Productivity from MODIS Using Regional Tower Eddy Flux Network Observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.44, n.7, p.1908-1924, 2006.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQÜESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, p. 125-145, 1994.

HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; PINTO, A. C. M.; SILVA, R. P.; ROCHA, R. M.; TRIBUZY, E. S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Revista Floresta**, v.34, n.3, p.295-304, 2004.

HOUGHTON, R. A.; GLOOR, M.; LLOYD, J.; POTTER, C. **O Balanço do Carbono Regional**. Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Series 186, American Geophysical Union. p. 409-428, 2009.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y. E.; RATANA, P.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. R.; YANG, W.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v.33, n.6, pp. 2–5, 2006.

HUTYRA, L. R., MUNGER, J. W.; SALESKA, S. R.; GOTTLIEB, E.; DAUBE, B. C.; DUNN, A. L.; AMARAL, D. F.; CAMARGO, P. B.; WOFSEY, S. C. Seasonal controls on the exchange of carbon and water in an Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v.112, n.G3, pp.1-16, 2007.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE; 2011.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. 2a ed. IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2012a, 275p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de Dados Agregados**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15 out. 2012b.

IBROM, A. et al. Variation in photosynthetic light-use efficiency in a mountainous tropical rainforest in Indonesia. **Tree Physiology**, v.28, n.4, p.499-508, 2008.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2014. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 22 out. 2014.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélites**. São José dos Campos: INPE, 2008.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 pp.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v.83, n.1-2, p.3-15, 2002.

KANNIAH, K. D.; BERINGER, J.; HUTLEY, L. B.; TAPPER, N. J.; ZHU, X. Evaluation of collections 4 and 5 of the MODIS Gross Primary Productivity product and algorithm improvement at a tropical savanna site in northern Australia. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p.1808-1822, 2009.

KARASEVA, M. O.; PRAKASH, S.; GAIROLA, R. M. Validation of high-resolution TRMM-3B43 precipitation product using rain gauge measurements over Kyrgyzstan. **Theoretical and Applied Climatology**, v.108, n.1-2, p.147-157, 2012.

KIDDER, S. Q.; HAAR, T. H. V. **Satellite Meteorology: An Introduction**. San Diego: Academic Press; 1995.

KITAMOTO, T.; UEYAMA, M.; HARAZONO, Y.; IWATA, T.; YAMAMOTO, S. Applications of NOAA/AVHRR and observed fluxes to estimate 3 regional carbon fluxes over black spruce forests in Alaska. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.63, n.4, p.171-183, 2007.

KIRSCHBAUM, M. U. F.; KEITH, H.; LEUNING, R.; CLEUGH, H. A.; JACOBSEN, K. L.; VAN GORSEL, E.; RAISON, R. J. Modeling net ecosystem carbon and water exchange of a temperate Eucalyptus delegatensis forest using multiple constraints. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.145, n.1-2, p.48-68, 2007.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETA, C. R. et al. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [S.l.: s.n.], p. 251-264, 2002.

KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; VON RANDOW, C.; ARAÚJO, A. C.; OLIVEIRA, P. J.; CULF, A.; MANZI, A. O.; NOBRE, A. D.; KABAT, P.; MOORS, E. J. The robustness of eddy correlation fluxes for Amazon rain forest conditions. **Ecological Applications**, v.14, n.sp4, p.101-113, 2004.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT, P.; KOZU, T.; HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; FERRIER, B.; OLSON, W. S.; ZIPSER, E.; SMITH, E. A.; WILHEIT, T. T.; NORTH, G.; KRISHNAMURTI, T.; NAKAMURA, K. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. **Journal of Applied Meteorology**, v.39, n.1, p.1965-1982, 2000.

LAFFERTY, K. D. The ecology of climate change and infectious diseases. **Ecology**, v.90, n.4, p.888-900, 2009. doi: 10.1890/08-0079.1

LEITÃO FILHO, H. F. Considerações sobre a florística de florestas tropicais e subtropicais do Brasil. **IPEF**, v.45, p.41-46, 1987.

LEJEUNE, Q.; EDOUARD, L. D.; BENOIT, P. G.; SONIA, I. S. Influence of Amazonian deforestation on the future evolution of regional surface fluxes, circulation, surface temperature and precipitation. **Climate Dynamic**, v.44, n.9-10, p.2769-2786, 2015.

LI, W.; ZHANG, P.; YE, J.; LI, L.; BAKER, P. A. Impact of two different types of El Niño events on the Amazon climate and ecosystem productivity. **Journal of Plant Ecology**, v.4, n.1-2, p.91-99, 2011.

LONGO, M.; CAMARGO, R.; SILVA DIAS, M. A. F. Análise das Características Dinâmicas e Sinóticas de um Evento de Friagem durante a Estação Chuvosa no Sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.1, p.59-72, 2004.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p.329-334, 2005.

MACLEAN, I. M. D.; WILSON, R. J. Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk. **Proceedings of the National Academy of Science**, v.108, p.12337-12342, n.30, 2011.

MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 15, n. 8, p. 332-337, 2000.

MALHI, Y.; WRIGHT, J. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B**, v.359, n.1443, p.311-329, 2004.

MALHI, Y.; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. **Science**. v.319, n.5860, p.169-172, 2008.

MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; GALBRAITH, D.; HUNTINGFORD, C.; FISHER, R.; ZELAZOWSKI, P.; SITCH, S.; MCSWEENEY, C.; MEIR, P. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. **Proceedings of the National Academy of Science**, v.106, n.49, p.20610-20615, 2009a.

MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; METCALFE, D. B.; PAIVA, R.; QUESADA, C. A.; ALMEIDA, S.; ANDERSON, L.; BRANDO, P.; CHAMBERS, J. Q.; Da COSTA, A. C. L.; HUTYRA, L. R.; OLIVEIRA, P.; PATIÑO, S.; PYLE, E. H.; ROBERTSON, A. L.; TEIXEIRA, L. M. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. **Global Change Biology**, v.15, n.5, p.1255-1274, 2009b.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.16, n.1, p. 01-18, 2001.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S.; OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, I. F. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v.21, n.1, p.495-516, 2008.

MARENGO, J. A.; BETTS, R. (coordenadores). **Riscos das mudanças climáticas no Brasil**. Análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia. CCST-INPE, São Paulo, Brasil, 2011.

MARTHEWS, T. R.; MALHI, Y.; GIRARDIN, C. A. J.; SILVA ESPEJO, J. E.; ARAGÃO, L. E. O. C.; METCALFE, D. B.; RAPP, J. M.; MERCADO, L. M.; FISHER, R. A.; GALBRAITH, D. R.; FISHER, J. B.; SALINAS-REVILLA, N.; FRIEND, A. D.; RESTREPO-COUBE, N.; WILLIAMS, R. J. Simulating forest productivity along a neotropical elevational transect: temperature variation and carbon use efficiency. **Global Change Biology**, v.18, n.9, p.2882–2898, 2012.

MARTINS, C. R.; PEREIRA, P. A.; LOPES, W. A.; ANDRADE, J. B. Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: A importância da Química da Atmosfera. **Química Nova na Escola**, São Paulo, nº 5, p.28-41, 2003.

MERCADO, L. M.; BELLOUIN, N.; SITCH, S.; BOUCHER, O.; HUNTINGFORD, C.; WILD, M.; COX, P. M. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. **Nature**, v.458, n. 7241, p.1014-1018, 2009.

MERCADO, L. M.; PATIÑO, S.; DOMINGUES, T. F.; FYLLAS, N. M.; WEEDON, G. P.; SITCH, S.; QUESADA, C. A.; PHILLIPS, O. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; DOLMAN, A. J.; RESTREPO-COUBE, N.; SALESKA, S. R.; BAKER, T. R.; ALMEIDA, S.; HIGUCHI, N.; LLOYD, J. Variations in Amazon forest productivity correlated with foliar nutrients and modelled rates of photosynthetic carbon supply. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B**, v.366, p.3316-3329, 2011.

MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; MENTON, M. C.; DA ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. M. S.; DIAS DE SOUSA, C. A. Biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance. **Ecological Applications**, v.14, n.sp4, p.S114–S126, 2004.

MILES, L.; GRAINGER, A.; PHILLIPS, O. The impact of global climate change on tropical forest biodiversity in Amazonia. **Global Ecology and Biogeography**, v.13, n.6, p.553–565, 2004. doi: 10.1111/j.1466-822X.2004.00105.x

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Mapa de Cobertura Vegetal**. 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/amaz%C3%B4nia/mapa-de-cobertura-vegetal>> Acesso em: 27 jun. 2014.

MOLION, L. C. B. Climatologia Dinâmica da Região Amazônica: Mecanismos de Precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.2, n.12, p.107-117, 1987.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v.9, n.3, p.747-766, 1972.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B**, v.281, n.980, p.277-294, 1977.

NELSON, G. C.; ROSEGRANT, M. W.; KOO, J.; ROBERTSON, R.; SULSER, T.; ZHU, T.; RINGLER, C.; MSANGI, S.; PALAZZO, A.; BATKA, M.; MAGALHAES, M.;

VALMONTE-SANTOS, R.; EWING, M.; LEE, D. **Climate Change: Impact on Agriculture and Costs of Adaptation**. IFPRI: Washington, D.C, 2009.

NEPSTAD, D. C.; CARVALHO, C. R.; DAVIDSON, E. A.; JIPP, P. H.; LEFEBVRE, P. A.; NEGREIROS, G. H.; SILVA, E. D.; STONE, T. A.; TRUMBORE, S. E.; VIEIRA, S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature**, v.372, n.6507, p.666-669, 1994.

NOBRE, C. A.; NOBRE, A. D. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**. v.16, n.45, 2002.

NOBRE, C.A.; OBREGÓN, G. O.; MARENGO, J. A.; FU, R.; POVEDA, G. Characteristics of Amazonian climate: Main features. In: Keller M, Bustamante M, Gash J, Dias PS, editors. **Amazonia and Global Change**. Washington: American Geophysical Union; 2009.

NÓBREGA, R. S.; SOUZA, E. P.; GALVÍNCIO, J. D. Análise da Estimativa de Precipitação do TRMM na Sub- Bacia da Amazônia Ocidental. **Revista de Geografia (Recife)**, v.25, n.1, p.06-20, 2008.

ODUM, E. P. **Ecologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1983. 434 p.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de Caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, p. 378-386, 2006.

OLIVEIRA, P. H. F.; ARTAXO, P.; PIRES, C.; DE LUCCA, S.; PROCÓPIO, A.; HOLBEN, B.; SCHAFFER, J.; CARDOSO, L. F.; WOFSY, S. C.; ROCHA, H. R. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. **Tellus**, v.59B, n.3, p.338-349, 2007.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DELGADO, R. C.; GOIS, G.; LANNES, A.; DIAS, F. O.; SOUZA, J. C.; SOUZA, M. Análise da precipitação e sua relação com sistemas meteorológicos em Seropédica, Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.2, p.140-149, 2014.

ORNL DAAC. **Modis Land Subsets**. 2012. Disponível em: <http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GR_col5_1/mod_viz.html> Acesso em: 23 ago. 2015.

OSMOND, B.; ANANYEV, G.; BERRY, J.; LANGDON, C.; KOLBER, Z.; LIN, G.; MONSON, R.; NICHOL, C.; RASCHER, U.; SCHURR, U.; SMITH, S.; YAKIR, D. Changing the way we think about global change research: Scaling up in experimental ecosystem science. **Global Change Biology**, v.10, n.4, p.393-407, 2004.

PARMESAN, C.; YOHE, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. **Nature**, v.421, n.6918, p.37-42, 2003.

PATZ, J.A.; CAMPBELL-LENDRUM, D.; HOLLOWAY, T.; FOLEY, J. A. Impact of regional climate change on human health. **Nature**, v.438, n.7066, p.310–317, 2005. doi: 10.1038/nature04188

PIRES, J. M. **Estudos dos principais tipos de vegetação do estuário amazônico**. Piracicaba, 1972, 183p. (Tese - Doutorado-ESALQ).

POST, W. M.; PENG, T.H.; EMANUEL, W. R.; KING, A. W.; DALE, V. H.; DEANGELIS, D. L. The Global Carbon Cycle. **American Scientist**, v.78, p.310-326, 1990.

PROPASTIN, P.; IBROM, A.; KNOHL, A.; ERASMI, S. Effects of canopy photosynthesis saturation on the estimation of gross primary productivity from MODIS data in a tropical forest. **Remote Sensing of Environment**, v.121, p.252–260, 2012.

RAMPELOTTO, H. P. A química da vida como nós não conhecemos. **Química Nova**, v.35, n. 8, p.1619-1627, 2012.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, p.185-204, 2010.

REICH, P. B.; REICH, P. B.; UHL, C.; WALTERS, M. B.; PRUGH, L.; ELLSWORTH, D. S. Leaf demography and phenology in Amazonian rain forest: A census of 40,000 leaves of 23 tree species. **Ecological Monographs**, v.74, n.1, p.3-23, 2004.

RESTREPO-COUBE, N.; DA ROCHA, H. R.; HUTYRA, L. R.; ARAUJO, A. C.; BORMA, L. S.; CHRISTOFFERSEN, B.; CABRAL, O. M. R.; CAMARGO, P. B.; CARDOSO, F. L.; COSTA, A. C. L.; FITZJARRALD, D. R.; GOULDEN, M. L.; KRUIJT, B.; MAIA, J. M. F.; MALHI, Y. S.; MANZI, A. O.; MILLER, S. D.; NOBRE, A. D.; VON RANDOW, C.; SÁ, L. D. A.; SAKAI, R. K.; TOTA, J.; WOFSY, S. C.; ZANCHI, F. B. What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.182-183, p.128-144, 2013.

RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D.; BERRY, S. L.; NOBLE, I. R. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. **Oecologia**, v.129, n.1, p.21–30, 2001.

RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; HEINSCH, F. N.; ZHAO, M.; REEVES, M.; HASHIMOTO, H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. **Bioscience**, v.54, n.6, p. 547–560, 2004.

SAKAI, R. K.; FITZJARRALD, D. R.; MORAES, O. L.L.; STAEBLER, R. M.; ACEVEDO, O. C.; CZIKOWSKY, M. J.; SILVA, R. D.; BRAIT, E.; MIRANDA, V. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. **Global Change Biology**, v.10, n.5, p.895-907, 2004.

SAKAMOTO, T.; GITELSON, A.; WARDLOW, B. D.; VERMA, S. B.; SUYKER, A. E. Estimating daily gross primary production of maize only on MODIS WDRVI and shortwave radiation data. **Remote Sensing of Environment**, v.115, n.12, p.3091-3101, 2011.

SALESKA, S. R.; MILLER, S. D.; MATROSS, D. M. Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**. v.302, n.5650, p.1554-1557, 2003.

SALESKA, S. R.; DIDAN, K.; HUETE, A. R.; DA ROCHA, H. R. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v.318, n.5850, p.612, 2007.

SALESKA, S.; ROCHA, H.; KRUIJT, B.; NOBRE, A. Fluxos de Carbono do Ecossistema e Metabolismo da Floresta Amazônica. **Amazonia and Global Change**. American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series 186, 2009.

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

SCHUMAN, G. E.; JANZEN, H. H.; HERRICK, J. E. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. **Environmental Pollution**, v.116, n.3, p.391-396, 2002.

SELLERS, P. J.; HALL, F. G.; KELLY, R. D.; BLACK, A.; BALDOCCHI, D.; BERRY, J.; RYAN, M.; RANSON, K. J.; CRILL, P. M.; LETTENMAIER, D. P.; MARGOLIS, H.; CIHLAR, J.; NEWCOMER, J.; FITZJARRALD, D.; JARVIS, P. G.; GOWER, S. T.; HALLIWELL, D.; WILLIAMS, D.; GOODISON, B.; WICKLAND, D. E.; GUERTIN, F. E. BOREAS in 1997: Experiment overview, scientific results, and future directions. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n.D24, p.28731–28759, 1997.

SFB - Serviço Florestal Brasileiro. **Florestas do Brasil em resumo - 2010**: dados de 2005-2010. Serviço Florestal Brasileiro: Brasília: SFB, 2010. 152 p.

SCHUBERT, P.; LAGERGREN, F.; AURELA, M.; CHRISTENSEN, T.; GRELE, A.; HELIASZ, M. Modeling GPP in the Nordic forest landscape with MODIS time series data - Comparison with the MODIS GPP product. **Remote Sensing of Environment**, v.126, p.136-147, 2012.

SILVA, B. B.; SILVA, B. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; MOURA, M. S. B. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, p.57-64, 2013.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, PR, v.38, n.1, p.185-206, 2008.

SJÖSTRÖM, M.; ZHAO, M.; ARCHIBALD, S.; ARNETH, A. et al. Evaluation of MODIS gross primary productivity for Africa using eddy covariance data. **Remote Sensing of Environment**, v.131, p.275–286, 2013.

SPEROW, M. Carbon sequestration potential em reclaimed mine sites in seven East-Central States. **Journal of Environmental Quality**, v.35, n.4, p.1428-1438, 2006.

SWETNAM, T. W.; ANDERSON, R. S. Fire climatology in the western United States: introduction to special issue. **International Journal Wildland Fire**, v.17, p.1–7, 2008. doi: 10.1071/WF08016

TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission. 2014. Disponível em: <http://www.mirador.gsfc.nasa.gov/collections/TRMM_3B43_007.shtml>. Acesso em: 12 abr. 2014.

TURNER, D. P.; RITTS, W. D.; COHEN, W. B.; GOWER, S. T.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W.; WOFSY, S. C.; URBANSKI, S.; DUNN, A. L.; MUNGER, J. W. Scaling gross primary production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation. **Remote Sensing of Environment**, v.88, n.3, p. 256-270, 2003.

TURNER, D. P.; RITTS, W. D.; COHEN, W. B.; MAIERSPERGER, T. K.; GOWER, S. T.; KIRSCHBAUM, A.; RUNNING, S. W.; ZHAO, M.; WOFSY, S. C.; DUNN, A. L.; LAW, B. E.; CAMPBELL, J. C.; OECHEL, W. C.; KWON, H. J.; MEYERS, T. P.; SMALL, E. E.; KURC, S. A.; GAMON, J. A. Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. **Global Change Biology**, v.11, n.4, p.666-684, 2005.

TURNER, D. P.; RITTS, W. D. ; MAOSHENG ZHAO ; KURC, S. A. ; DUNN, A. L. ; WOFSY, S. C. ; SMALL, E. E. ; RUNNING, S. W. Assessing interannual variation in MODIS-based estimates of gross primary production. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.44, n.7, p.1899-1907, 2006a.

TURNER, D. P.; RITTS, W. D.; COHEN, W. B.; GOWER, S. T.; RUNNING, S. W.; ZHAO, M.; COSTA, M. H.; KIRSCHBAUM, A. A.; HAM, J. M.; SALESKA, S. R.; AHL, D. E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. **Remote Sensing of Environment**, v.102, n.3-4, p.282-292, 2006b.

USGS - U. S. Geological Survey. 2014. Disponível em: <<http://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

VERMA, M. Remote sensing of annual terrestrial gross primary productivity from MODIS: an assessment using the FLUXNET La Thuile data set. **Biogeosciences**, v.11, n.8, p.2185–2200, 2014.

VILA, D. A.; GONÇALVES, L. G. G.; TOLL, D. L.; ROZANTE, J. R. Statistical Evaluation of Combined Daily Gauge Observations and Rainfall Satellite Estimates over Continental South America. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.10, n.2, p.533-542, 2009.

VOLDOIRE, A.; ROYER, J. F. Tropical deforestation and climate variability. **Climate Dynamic**, v.22, n.8, p.857-874, 2004. doi: 10.1007/s00382-004-0423-z

VON RANDOW, C.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M. G.; GASH, J. H. C.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. J.; CARDOSO, F. L.; KABAT, P. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v.78, n.1, p.5-26, 2004.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geography Research**, v.90, n.5, p.8995-9005, 1985.

WOLFE, R. E.; NISHIHAMA, M.; FLEIG, A. J.; KUYPER, J. A.; ROY, D. P.; STOREY, J. C.; PATT, F. S. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. **Remote Sensing of Environment**, v.83, n.1-2, p.31-49, 2002.

WRIGHT, S. J.; SCHAIK, C. P. Light and the phenology of tropical trees. **American Naturalist**, v.143, n.1, p.192-199, 1994.

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

XU, L.; SAMANTA, A.; COSTA, M. H.; GANGULY, S.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. **Geophysical Research Letters**, v.38, n.7, L07402, pp.1-4, 2011.

YAN, H.; WANG, S. Q.; BILLESBACH, D.; OECHEL, W.; BOHRER, G.; MEYERS, T.; MARTIN, T. A.; MATAMALA, R.; PHILLIPS, R. P.; RAHMAN, F.; YU, Q.; SHUGART, H. H. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants. **Ecological Modelling**, v.297, p.42-59, 2015.

ZHAO, M.; HEINSCH, F. A.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**. v.95, n.2, p.164–176, 2005.