



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/06.20.13.35-TDI

MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA NA AMAZÔNIA

Fabrício Brito Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Yosio Edemir Shimabukuro, e Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão aprovada em 24 de junho de 2013.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EB7HH5>

> INPE São José dos Campos 2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE Gabinete do Diretor (GB) Serviço de Informação e Documentação (SID) Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970 São José dos Campos - SP - Brasil Tel.:(012) 3208-6923/6921 Fax: (012) 3208-6919 E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT) **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID) Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID) EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID) Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)





sid.inpe.br/mtc-m19/2013/06.20.13.35-TDI

MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA NA AMAZÔNIA

Fabrício Brito Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Yosio Edemir Shimabukuro, e Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão aprovada em 24 de junho de 2013.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EB7HH5>

> INPE São José dos Campos 2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Fabrício Brito.

Si38m

Modelagem da produtividade primária bruta na Amazônia / Fabrício Brito Silva. – São José dos Campos : INPE, 2013. xx + 131 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/06.20.13.35-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Yosio Edemir Shimabukuro, e Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão.

1. sensoriamento remoto. 2. modelagem ambiental. 3. ciclo do carbono. 4 produtividade primária florestal. 5 sequestro de carbono. I.Título.

CDU 528.813(811)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Doutor(a)** em

Sensoriamento Remoto

Dra. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo

Presidente / IRPE / SJCampos - SP

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro

Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Luiz Eduardo Oliveira Cruz Aragão

Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SF

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Humberto Ribeiro da Rocha

Diógenes Salas Alves

Dr. Marcos Heil Costa

Dr.

IAG/USP / São Paulo - SP

Convidado(a) / UFV / Viçosa - MG

Este trabalho foi aprovado por:

() meiorie simples

() unenimidade

Aluno (a): Fabrício Brito Silva

"Tudo posso Naquele que me fortalece".

Filipenses:

AGRACIMENTOS

A Deus pela existência, força e providências em meu caminho.

À minha mãe e meu irmão pelo amor incondicional, fonte de força e determinação em minha vida.

À Thalita e Isadora pelo sentido maior que deram à minha vida.

Ao Dr. Yosio Shimabukuro pela confiança, oportunidade e orientação.

Ao Dr. Luiz Aragão pela orientação, oportunidades e amadurecimento profissional.

Aos amigos Gabriel Pereira e Franciele Cardozo pelas contribuições e amizade.

Aos colegas que direta ou indiretamente contribuíram ao longo do doutorado. Ao CNPq pela bolsa de doutorado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelas oportunidades concedidas.

RESUMO

A Produtividade Primária Bruta (PPB) é considerada uma propriedade fundamental dos ecossistemas florestais por seguestrar o carbono atmosférico e disponibilizar aos processos metabólicos ecofisiológicos. A Amazônia é uma região estratégica no Planeta. Representa 14% da Produtividade Primária Líquida (PPL) global e na última década foi responsável por 66% da variação da PPL global. As variáveis ambientais que controlam a PPB estão distribuídas espacialmente na Amazônia ao longo de gradientes e entender como ocorre essa integração foi o objetivo do presente estudo. Nesse sentido, um Modelo Agregado de Dossel (ACM) foi utilizado para estimar a PPB e dados de sensoriamento remoto e de uma base global de dados climáticos (GLDAS) permitiram a espacialização da PPB na Amazônia. A PPB foi estudada ao longo de uma série histórica composta por oito anos de dados mensais. A PPB foi avaliada em diferentes escalas espaço-temporais, desde a PPB total anual e mensal do bioma como um todo, até a PPB total mensal regionalizada por padrões espaciais fenológicos mapeados no bioma. Considerando o bioma como um todo, a PPB total anual variou entre 6,68 a 7.34 Pg C ano⁻¹, com média igual a 6,93 (± 0,18) Pg C ano⁻¹, sendo fortemente correlacionada à radiação e precipitação. Nessa escala, a radiação solar apresentou correlação positiva com a precipitação. Em escala temporal mensal, a PPB do bioma como um todo apresentou a sazonalidade controlada pela radiação solar, com picos de máximo valor no período seco. Em magnitude, a PPB apresentou maiores valores nas regiões noroeste, centro-norte, centro-sul e na costa do Suriname. Os menores valores de PBB ocorreram nas regiões sudoeste, no macico das Guianas, na borda da região norte e no extremo leste, assim como, nas savanas da Venezuela, Roraima e Bolívia e na região pré-andina. Considerando os gradientes estruturais da vegetação, a PPB apresentou menores valores em regiões de alta biomassa, área basal, taxa de crescimento e ciclagem de nutrientes. Maiores valores de PPB ocorreram em regiões de maior produção de liteira, maior sazonalidade climática e maior comprimento do período seco, assim como, em regiões onde predominam as leguminosas. A PPB apresentou o pico de máximo valor variando espacialmente em um ciclo anti-horário. A amplitude de variação mensal da PPB ocorre em um gradiente no sentido sudoeste-nordeste, onde a região nordeste é mais dinâmica do que a região sudeste da Amazônia. A PPB máxima ocorre em agosto na parte centro-norte, em outubro no extremo noroeste, em setembro na região nordeste e em janeiro no extremo noroeste. Os resultados obtidos neste trabalho sugerem uma alta variabilidade espacial tanto no desenvolvimento fenológico quanto no sequestro de carbono atmosférico. Essa variabilidade seguiu gradientes de variáveis ambientais no sentido de proporcionar a melhor adaptação da vegetação florestal à diversidade do ambiente, em escala de bioma.

PRIMARY PRODUCTION MODELLING IN THE AMAZON

ABSTRACT

Gross Primary Production (GPP) is an important property of forest ecosystems because this is the process in which plants capture carbon dioxide from the atmosphere and make it available to forest ecophysiological process. The Amazon is a strategic region on Earth, explaining 14% of the global Net Primary Production (NPP) and 66% of the global NPP seasonal variation in the last decade. Environmental variables that drive GPP are spatially distributed in gradients across the Amazon. Therefore the objective of this study was to understand how interactions among environmental variables, driving GPP, occur. For this, the Aggregate Canopy Model (ACM) was used to estimate the GPP and Remote Sensing (RS) data and global climatic database was used to extrapolate the model to the whole Amazon biome. GPP was studied based on a monthly time series composed by eight years of data. GPP was evaluated at different spatio-temporal scales, including monthly and annual whole basin GPP, as well as monthly GPP regionalized by phenological clusters in the biome. Considering the biome as a whole, the annual total GPP ranged from 6.68 to 7.34 Pg C yr⁻¹, with a mean of 6.93 (± 0.18) Pg C yr⁻¹, strongly correlated with radiation and precipitation. At this scale, solar radiation was positively correlated with precipitation. At the monthly time scale, biome GPP, showed a seasonality controlled by solar radiation with the peak of maximum value centered in the dry period. GPP showed higher values in the northwest, north-central and south-central coast of Suriname. The lowest values of GPP occurred in southwest regions, the Guyana Basin, on the edge of the northern and the eastern extreme, as well as in the savannas of Venezuela, Bolivia and Roraima and pre-Andean region. Considering vegetation structural gradients, GPP showed lower values in regions of high biomass, basal area, growth rate and nutrient cycling. Greatest values occurred in less fertile regions with higher litter production, greater climatic seasonality and greater length of the dry period, as well as in regions dominated by legumes. These results suggest that GPP patterns are associated to largest investment in leaf mass in less fertile regions, where growth rates are lower, which favors the retention of nutrients in the canopy. This mechanism may have favored the adaptation of this vigorous vegetation in less fertile areas, which are heavily affected by seasonal climate. GPP showed a maximum peak value in a spatially varying cycle counterclockwise. The range of variation of monthly GPP occurs in a southwestnortheast gradient, where the Northeast is more dynamic than the southeastern part of the biome. Maximum GPP occurs in August in the north central part, in October in the northwest, in September in the northeast and in January in the northwest. These results of this study suggest also a high spatial variability of phenological development and atmospheric carbon sequestration. This variability clearly followed environmental gradients, which are potentially linked

to long-term adaptation of Amazonian forests to the environmental diversity, at the biome scale.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 - Distribuição das torres de fluxo pertencentes ao programa FLUXNET (2002)
Figura 3.1 - Formação da bacia Amazônica18
Fonte: Nogueira (2008)
Figura 3.2 - Distribuição dos tipos de solos na Amazônia de acordo com Quesada et al. (2010), com a legenda de solos correspondente à nomenclatura utilizada pela FAO (<i>Food and Agriculture Organization of the United</i> <i>Nations</i>)
Figura 3.3 - Gradientes de fertilidade dos solos de acordo com Quesada et al. (2010): (a) Soma de bases (<i>Sum of bases</i>) e (b) Fósforo Total (<i>Total P</i>) 20
Figura 3.4 - Distribuição espacial de uma série climatológica (30 anos) referente a precipitação anual de acordo com Sombroek (2001)
Figura 3.5 - Distribuição espacial de uma série climatológica (30 anos) referente ao comprimento do período seco, considerando a quantidade de meses onde a precipitação foi menor que 100mm
Figura 3.6 - Distribuição geográfica das características de árvores do ecossistema amazônico e os valores em cada região representados pelo tamanho dos círculos abertos: a) comunidade ponderada pela massa de sementes; b) comunidade ponderada pela densidade lenhosa; c) abundância de leguminosas (<i>Fabaceae</i>); e d) diversidade de árvores (ìndice α – Fisher)
Figura 4.1 - Fluxograma metodológico27
Figura 4.2 - Fluxograma da análise de sazonalidade da PPB
Figura 4.3 - Média mensal do CO ₂ atmosférico global para o ano de 2008
Figura 4.4 - Localização das torres de fluxo na Amazônia
Figura 4.5 - Localização dos sítios de coleta de dados fenológicos
Figura 4.5 - Localização dos sítios de coleta de dados de produtividade de madeira (MALHI et al., 2004), biomassa acima do solo e área basal (MALHI et al., 2006) e produção de liteira reunidos por (CHAVE et al., 2009) 34
Figura 5.1 – Comparação entre a PPB estimada a partir da torre de fluxo da FLONA do Tapajós – km 67, a PPB modelada com parametrização otimizada neste

- Figura 5.4 Comparação entre a PPB modelada (Md_MODIS-PF), Folhas em liteira e Folhas novas na localidade da FLONA do Tapajós km67.......52
- Figura 5.6 Comparação entre a PPB modelada (Md_MODIS-PF) e folhas em liteira na nos sítios de (a) Sinop-MT e (b) Tambopata – Peru.......53

- Figura 5.10 Comparação entre os dados climáticos de torres de fluxo e das bases globais de dados climáticos GLDAS/AIRS. Gráficos de regressão (coluna 1) e comparação mensal (coluna 2) da Radiação (a), Calor Latente (b), Temperatura (c), Pressão Atmosférica (d), Umidade Relativa (e) e CO₂ atmosférico (f)......60

- Figura 5.13 Incremento da PPB em resposta ao incremento da temperatura (a), radiação solar (b), CO2 atmosférico (c) e condutância do dossel (d)...63

- Figura 5.16 Série temporal da Produtividade Primária Bruta e precipitação (a) e Produtividade Primária Bruta e radiação solar incidente (b)......66
- Figura 5.17 PPB média anual de 2003 a 2010 (a) e desvio padrão da média (b). 67

- Figura 5.20 Localização dos sítios de coleta de dados estruturais do dossel florestal de biomassa acima do solo e área basal (MALHI et al., 2006) (a) e produtividade de madeira (MALHI et al., 2004) (b)......70

- Figura 5.25 Comparação entre as series temporais de NDVI das fenoregiões (→), período de pico na produção de liteira (sombreado), o coeficiente de variação do NDVI em cada fenoregião e o período chuvoso (linha pontilhada). (a) Pheno-10 (JUSTINIANO e FREDERICKSEN, 2000); (b) Pheno-11 (RAINFOR – Tambopata); (c) Pheno-13 (BARBOSA e FEARNSIDE, 1996); (d) Pheno-14 (NEBEL et al., 2001); (e) Pheno-17 (SELVA et al., 2007); e (f) Pheno-26 (BRIENEN e ZUIDEMA. 2005)...84

LISTA DE TABELAS

<u>Pág.</u>

- Tabela 5.2. Erro médio absoluto das estimativas de PPB (Mg C ha⁻¹) a partir da modelagem utilizando dados climáticos e índice de área foliar da torre (Md_DadosTorre), dados MODIS parametrizados neste trabalho (Md_MODIS_PF) e dados MODIS parametrizados de acordo com Aragão (2004) (Md_MODIS_PA), em diferentes escalas temporais....47
- Tabela 5.4 Medidas de PPB (Mg C ha⁻¹ ano⁻¹) observadas em campo (PPB_Obs), modeladas com parametrização otimizada neste trabalho (PPB_MODIS) e erros absoluto e relativo para as estimativas de PPB.......48
- Tabela 5.6. Coeficientes de correlação de Pearson entre a condutância estomática
modelada, radiação, umidade específica e déficit de pressão de vapor
em oito sítios de validação na Amazônia.58

- Tabela 5.13 Coeficientes de correlação de Pearson, valor-p e número amostral (n)entre a PPB e as variáveis relacionadas à produção de liteira estudadaspor Chave et al. (2009).72
- Tabela 5.14 Descrição dos tipos vegetacionais, período seco, pico máximo do NDVI e variação percentual do NDVI para cada fenoregião.......81

SUMÁRIO

	<u> Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipóteses	2
1.2 Objetivo Geral	2
1.3 Objetivos específicos	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Produtividade Primária Bruta (PPB) em Ecossistemas Florestais	5
2.2 Modelagem da produtividade primária	8
2.3 Sensoriamento remoto no estudo da produtividade primária	
2.3.1 Balanço de radiação	11
2.3.2 Estrutura e fenologia de ecossistemas florestais	
3 ÁREA ESTUDADA	17
3.1 Origens e influências geotectônicas nos gradientes ambientais	17
3.2 Gradientes ambientais	19
3.2.1 Gradiente de fertilidade	19
3.2.2 Gradiente Climático da Precipitação	21
3.2.3 Gradiente das variáveis estruturais do dossel florestal	
3.2.4 Gradiente de distribuição de espécies vegetais	
4 MATERIAL E MÉTODOS	
4.1 Fluxograma Metodológico	27
4.2 Aquisição dos dados	
4.3 Dados climáticos GLDAS	
4.4 Carbono atmosférico AIRS	
4.5 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)	
4.6 Dados coletados em campo	
4.7 Modelagem da Produtividade Primária Bruta (PPB)	
4.8 O Modelo Agregado de Dossel (ACM)	
4.9 Modelo de condutância estomática – Penman-Monteith	
4.10 Mapeamento das fenoregiões	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	
5.1 Validação da PPB para a Amazônia	
5.1.1 Validação da PPB modelada	
5.1.2 Comparação das PPB medida e modelada com as variáveis de entrada do modelo	53
5.1.3 Validação do modelo de condutância estomática	
5.1.4 Exatidão dos dados climáticos	
5.1.5 Análise de sensibilidade do modelo	
5.2 PPB em escala espacial de bioma	63

5.2.1 Análise em escala temporal anual	63
5.2.2 Análise em escala temporal mensal	65
5.3 Distribuição espacial da PPB na Amazônia	67
5.3.1 PPB anual e gradientes estruturais do dossel florestal	68
5.3.2 Série temporal anual da PPB anual	77
5.4 Sazonalidade da PPB	
5.4.1 Mapeamento das fenoregiões	79
5.4.2 Gradientes fenológicos e climáticos	
5.4.3 Sazonalidade da PPB de acordo com as fenoregiões	
5.4.4 Forçante Fenológica (NDVI)	
5.4.5 Forçantes climáticas da PPB	94
5 CONCLUSÕES	
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXO A – Artigo Publicado	

1 INTRODUÇÃO

A Produtividade Primária Bruta (PPB) é a fotossíntese em escala ecossistêmica e consiste na propriedade do dossel florestal responsável pela captação do carbono atmosférico. Esse é o maior fluxo global de carbono e influencia diversas funções ecossistêmicas, como a respiração e o crescimento vegetal (BEER et al., 2010).

Devido à importância da PPB no balanço global de carbono e da Amazônia enquanto região estratégica nesse processo, estudos tem sido realizados na tentativa de compreender a dinâmica espaço-temporal da PPB na Amazônia (BAKER et al., 2004; NEMANI et al., 2003).

Utilizando um modelo baseado em dados climáticos e de sensoriamento remoto, Nemani et al. (2003) mostraram que no período de 1982 a 1999, apenas a Amazônia contabilizou 42% do aumento da PPL global, com uma taxa de 1% de aumento por ano. A justificativa desse aumento poderia estar relacionada ao aumento de CO₂ atmosférico (fertilização de CO₂) e da radiação solar incidente em razão da diminuição da quantidade de nuvens.

Baker et al. (2004), utilizando dados provenientes de medidas em campo da biomassa acima do solo, mostraram uma tendência de aumento da biomassa em uma taxa de $1,22 \pm 0,43$ Mg ha⁻¹ano⁻¹.

As contradições de estimativas provenientes dos modelos de produtividade primária estão relacionadas à existência de diferentes modelos conceituais que consideram diferentes processos na interação biosfera-atmosfera no ciclo do carbono. Mesmo sendo alta a magnitude das diferenças de estimativa da PPB entre os modelos, não significa necessariamente que estejam conceitualmente errados, mas que possuem diferentes abordagens (HOUGHTON, 2003).

Apesar de crescente os trabalhos que estimam a produtividade primária na Amazônia, ainda permanecem perguntas em ampla escala:

- 1. Como a PPB se distribui espacialmente na Amazônia?
- 2. Qual a magnitude deste fluxo nas diferentes regiões da Amazônia?
- 3. Como a sazonalidade da PPB varia espacialmente e temporalmente?

4. Qual a influência das variáveis estruturais da vegetação e das climáticas na dinâmica da PPB?

Este trabalho aborda essa temática propondo a utilização de dados de sensoriamento remoto e dados climáticos, integrados em um modelo de PPB espacialmente explícito na Amazônia.

1.1 Hipóteses

H1. A PPB responde distintamente às variáveis ambientais e climáticas nas diferentes regiões da Amazônia.

H2. A fenologia da floresta amazônica é mais heterogênea do que estudos prévios tem mostrado e a PPB responde à essa variabilidade seguindo gradientes ambientais referentes ao clima, vegetação e solo.

1.2 Objetivo Geral

Estimar a assimilação bruta de carbono ao longo dos gradientes ambientais presentes na Amazônia integrando em um modelo agregado de dossel (ACM – Agregated Canopy Model) dados provenientes de sensoriamento remoto e dados climáticos de bases globais.

1.3 Objetivos específicos

(1) Gerar superfícies contínuas referentes às variáveis biofísicas necessárias à execução do modelo;

(2) Avaliar a exatidão dos dados adquiridos pela comparação com os dados das torres de fluxo e das estações meteorológicas;

(3) Avaliar a sensibilidade do modelo ACM, comparando com os dados das torres de fluxo;

(4) Avaliar a variabilidade espacial da PPB de acordo com a magnitude e com a sazonalidade;

(5) Avaliar a influência da fenologia florestal na sazonalidade da PPB;

(6) Verificar o sentido e as forçantes do gradiente da distribuição espacial da PPB na Amazônia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Produtividade Primária Bruta (PPB) em Ecossistemas Florestais

A Produtividade Primária Bruta pode ser considerada como a soma da fotossíntese realizada por todas as folhas em escala ecossistêmica. Resulta da integração em escala temporal de dias à ano, medida em unidades de massa por área por tempo (ex. gCm⁻²ano⁻¹) (CHAPIN III et al., 2011). A PPB representa a fixação bruta de carbono pelos ecossistemas terrestres, constituindo o caminho inicial do ciclo biogeoquímico do carbono na biosfera (YUAN et al., 2010). A PPB na escala de ecossistema, normalmente, não é medida diretamente e sim, estimada por modelos ou pela soma da troca líquida do ecossistema e a respiração do ecossistema, ambas estimadas por torres de fluxo (HUTYRA et al., 2007).

A PPB também pode ser estimada pela soma dos componentes da produtividade primária líquida (PPL) e respiração autotrófica (R_{Autotrófica}), medidos em campo (Malhi et al., 2009).

A PPL é composta pelas produtividades da liteira fina (PPL_{LF}), galhos da copa (PPL_{GC}), caule (PPL_C), raízes finas (PPL_{RF}), raízes grossas (PPL_{RG}) e compostos orgânicos voláteis (PPL_{COV}) (Equação 2.1):

$$PPL = PPL_{LF} + PPL_{GC} + PPL_{C} + PPL_{RF} + PPL_{RG} + PPL_{COV}$$
(2.1)

A respiração autotrófica é composta pela soma das respirações das raízes (R_R), caule (R_C) e folhas (R_F) (Equação 2.2):

$$R_{Autotrófica} = R_{R} + R_{C} + R_{F}$$
(2.2)

Sendo assim, a PPB pode ser estimada pela Equação 2.3:

$$PPB = PPL + R_{Autotrófica}$$
(2.3)

Considerando o sistema solo-planta-atmosfera, a captação do carbono atmosférico pelo dossel florestal envolve processos onde o CO₂ entra no sistema planta através da fotossíntese em escala foliar. Nessa escala a fotossíntese (PPB) depende da capacidade bioquímica fotossintética das folhas

(quantidade de Rubisco), temperatura, concentração de CO₂, radiação solar absorvida e água (PURY e FARQUHAR, 1997). Nesse nível, os mecanismos que controlam a PPB são relativamente bem entendidos. Entretanto, quantificar o controle biológico, edáfico e climático agregando os processos de fotossíntese em transição de escalas no sentido folha-dossel-ecossistema é complexo, especialmente devido à dificuldade de realizar experimentos em quantidade suficiente e abrangendo diferentes padrões espaciais do dossel florestal (WILLIAMS et al., 1997a).

Em ecossistemas florestais, a estimativa de captação de carbono utilizando o método de covariância de fluxos representou um grande avanço na compreensão da produtividade primária em escala de dossel. Esse método utiliza técnicas micrometeorológicas não invasivas que medem a troca de carbono entre a atmosfera e uma área ampla (vários hectares) no dossel vegetal (BALDOCCHI et al., 2001). A instalação de torres de fluxo nos diversos ecossistemas terrestres globais tem permitido compreender as forçantes da produtividade primária em escala de dossel (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Distribuição das torres de fluxo pertencentes ao programa FLUXNET (2002).

Historicamente, a disponibilidade de água tem sido considerada um dos principais limitantes da PPB no período seco. No entanto, Hutyra et al. (2007) e Goulden et al. (2004) observaram em dois sítios na Floresta Nacional do Tapajós-PA, que a PPB tende a permanecer elevada durante o período seco.

Este período coincide com o decréscimo das chuvas e concomitante incremento da radiação solar incidente, portanto neste sítio, especificamente, a radiação solar tende a ser a principal forçante da PPB em escala de dossel. Estudos de Costa et al. (2009) também apontam nessa direção, evidenciando que no período seco a evapotranspiração é maior do que no período chuvoso.

No entanto, observações provenientes de outros sítios na Amazônia (Reserva Cueiras, Reserva Jarú e Fazenda Maracai) mostrou declínio da PPB no período seco (KELLER et al., 2004).

Esses resultados apontam para uma variação dos mecanismos de controle da PPB em escala de dossel e em diferentes condições ambientais. Consequentemente, as bases conceituais da variação da PPB na Amazônia têm sido reformuladas a partir das observações recentes dos padrões sazonais de PPB e dos mecanismos de controle da PPB. Um exemplo dessas reformulações é a hipótese do "controle isohídrico".

A hipótese do "controle isohídrico" foi formulada a partir de estudos que mostram que determinadas espécies vegetais possuem um mecanismo de controle estomático possibilitando a manutenção do potencial hídrico foliar em situações de déficit hídrico (FIELD e HOLDBROOK, 1989; TARDIEU, 1993; BONAL et al., 2000). Fisher et al. (2006) testaram a hipótese isohídrica e confirmaram a maior limitação da evapotranspiração na resistência hidráulica existente ao longo do trajeto solo-planta, assim como, observaram pequena variação no transporte de seiva nos períodos seco e chuvoso. Além disso, medidas do potencial de água na planta e no solo mostraram que a maior variação deste potencial ocorre no solo. Esses resultados evidenciaram o controle estomático atuando nas relações hídricas, mantendo processos como a PPB mesmo em condições de déficit hídrico.

Outros fatores ambientais podem influenciar as relações do sistema soloplanta-atmosfera, por exemplo, adaptações ecológicas como raízes profundas (NEPSTAD et al., 1994) e variações na capacidade de retenção hídrica de diferentes tipos de solos (HODNETT et al., 1995; JIPP et al., 1998),

proporcionam suporte hídrico durante o período seco e aumentam a resiliência da vegetação em condições de déficit hídrico.

2.2 Modelagem da produtividade primária

A preocupação científica em entender e modelar a produtividade da vegetação possui marcos que datam de 384 a.C. com Aristóteles (importância do solo no crescimento das plantas), 1840 com Leibig (nutrição mineral das plantas e o primeiro a pensar no impacto da vegetação na atmosfera) e 1964 com o *International Biological Program* – IBP que visava organizar estudos ecológicos em larga escala (LEITH, 1975).

Nos últimos 30 anos têm sido desenvolvidos enormes quantidades de modelos que simulam processos relacionados ao desenvolvimento da vegetação e principalmente, assimilação do carbono atmosférico por parte dos ecossistemas. Ainda é possível notar discordância entre os resultados e os dados observados, o que gera o consenso científico da necessidade de constante aprimoramento nas concepções, na capacidade de processamento e cautela na utilização dos resultados (ADAMS et al., 2004).

Apesar desse consenso, é perceptível a importância desses modelos como forma de dar respostas à pressão da sociedade em entender o futuro do Planeta em relação ao impacto das mudanças globais nos recursos básicos de manutenção da vida humana. Sendo um desses aspectos a capacidade dos ecossistemas em responder às alterações atmosféricas e ações antropogênicas (KEMP, 1993).

De forma geral os modelos podem ser classificados em biogeográficos e biogeoquímicos, de acordo com a abordagem conceitual. O primeiro utiliza um mapa matricial de variáveis climáticas e biofísicas para determinar os tipos de vegetação presente em cada ponto da matriz e a combinação desses tipos determinam o bioma ou ecossistema. Modelos dessa natureza não simulam processos biogeoquímicos como fotossíntese e respiração. O segundo tipo, biogeoquímicos, assume uma distribuição pré-estabelecida da vegetação e

simula processos como fotossíntese e transpiração de acordo com variáveis ambientais (radiação solar, temperatura, carbono atmosférico, atividade fotossintética, etc.) (ADAMS et al., 2004).

Outros estudos propõem diferentes formas de classificação, quanto à hierarquia na integração de escalas (de baixo para cima e de cima para baixo – *"bottom up"* e *"top-down"*); e quanto à utilização ou não do sensoriamento remoto como fonte de dados relacionados à fenologia da vegetação, entre outras (HOUGHTON, 2003; KICKLIGHTER et al., 1999; CRAMER et al., 1999; LANDSBERG e WARING, 1997).

Quanto à abordagem de cada tipo de modelo, existe o consenso de que diferentes formulações conceituais dos modelos de simulação da produtividade primária podem resultar em diferentes resultados, não necessariamente contraditórios, mas, complementares, exigindo cautela e exercício de interpretação dos resultados (HOUGHTON, 2003).

Ao longo das últimas duas décadas, vários trabalhos têm sido realizados visando à comparação de modelos de estimativa da Produtividade Primária (PP). No entanto, devido à suas diferentes concepções, os resultados finais da estimativa da produtividade primária líquida global divergem com uma variação entre 47,9 a 80,5 PgC ano⁻¹ (ADAMS et al., 2004).

Ao longo da evolução dos modelos de estimativa da produtividade primária, a distribuição espacial global estimada por diferentes modelos é concordante, apesar de apresentarem discrepâncias de valores. Melillo et al. (1993) utilizaram o modelo TEM (*Terrestrial Ecosystem Model*) para estimar a PPL global e apresentaram o valor de 53,2 Pg.C ano⁻¹, ao passo que Adams et al. (2004) estimaram este valor em 46,2 Pg.C ano⁻¹, no entanto é possível perceber concordância ao comparar a distribuição espacial dos dois trabalhos em diferentes ecossistemas.

Grande parte dos modelos utilizados na estimativa da PPL não foi elaborada especificamente para essa finalidade, possuindo para isso um módulo secundário e como os mecanismos que compõem a PPL não são ainda bem

compreendidos, não existe uma padronização no quadro conceitual das interações ambientais responsáveis pela PPL.

Diferenças de escalas, temporal e espacial, utilizadas nos modelos requerem formulações diferentes para representarem as respostas da vegetação à sazonalidade dos componentes climáticos, e o comportamento fenológico dos ecossistemas (BONDEAU et al., 1999). Isto pode induzir a deficiências na representação da interação biosfera-atmosfera resultando em discrepâncias nas estimativas intra-anuais de PP. Consequentemente, essas incertezas comprometem os processos de calibração e validação, principalmente em relação à concentração de CO₂ atmosférico (NEMRY et al., 1999), temperatura, umidade e radiação solar (RUIMY, A. et al., 1999).

Outro fator importante como fonte de incerteza é a disponibilidade de água no solo e o transporte hídrico pelo sistema solo-planta-atmosfera. A parametrização dessa dinâmica é geralmente realizada por parâmetros que atuam na evapotranspiração. Estes parâmetros representam a condutância da copa e as relações de limitação da produtividade em função do suprimento ou demanda hídrica, podendo ser diretamente inferidos por dados de satélite referentes aos índices de vegetação, temperatura e umidade (CHURKINA et al., 1999). Nesse aspecto, novas teorias têm sido propostas e suas implementações dependem de mais comprovações científicas. Um exemplo disto é a hipótese isohídrica na qual a planta regula a evapotranspiração evitando o déficit hídrico através do controle estomático (FISHER et al., 2006).

2.3 Sensoriamento remoto no estudo da produtividade primária

Os dados e técnicas de sensoriamento remoto (SR) se encaixam em uma demanda de estudos ecológicos realizados em extensas áreas onde a mensuração em campo é técnica e economicamente inviável.

A Produtividade Primária pode ser entendida como uma propriedade ecossistêmica relacionada à capacidade de assimilar e retêr o carbono atmosférico, sendo dependente de padrões temporais e espaciais da vegetação. O SR proporciona a compreensão desses padrões e das ligações entre suas estruturas e funções, assim como suas respostas à variabilidade

climática. Parte dessa compreensão advém da disponibilidade de produtos biofísicos, o que representou um grande avanço na modelagem da PP (NOVO et al., 2005).

Considerando a natureza e as fontes de incertezas relacionadas à modelagem da PP, é possível organizar as contribuições do SR para a redução dessas incertezas em tópicos que abordam os processos de balanço de radiação, estrutura e fenologia de ecossistemas florestais.

2.3.1 Balanço de radiação

Os balanços de radiação (ondas longas, curtas e albedo) e energia (calor latente) constituem dados de entrada em vários modelos em que a PP é o módulo principal ou mesmo secundário (modelos de circulação global). A reduzida quantidade de estações de superfície limita e introduz incertezas nas estimativas da PP em escalas regionais, principalmente na região dos trópicos. No processo de integração de escalas no sentido planta-copa a variação da radiação de ondas curtas, enquanto dado de entrada, pode introduzir um erro de até 38% na estimativa da PP (WILLIAMS et al., 1997b).

Atualmente, dados referentes ao balanço de radiação e energia na superfície terrestre são oferecidos por pelo menos quatro bases de dados globais. O CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), a bordo das plataformas Terra e Aqua, o ISCCP-FD (*International Satellite Cloud Climatology Project Flux Data*), o GEWEX-SRB (*Global Energy and Water Cycle Experiment-Surface Radiation Budget*) e GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*). Dados de entrada referente à radiação de ondas curtas podem variar na ordem de 10% de acordo com a base de dados utilizada e o impacto dessa variação alcança a ordem de 40% na estimativa final da PP (LIN et al., 2008; RODELL et al., 2004).

Além dessas bases, os componentes do balanço de radiação também podem ser estimados indiretamente através de dados provenientes dos satélites da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration – United States Department of Commerce*), da família LANDSAT e do projeto EOS/NASA (*Earth Observing System/National Aeronautics and Space Administration*) (KEY

e HAEFLIGER, 1992; CEBALLOS, 2004; TASUMI et al., 2005; RYU et al., 2008).

2.3.2 Estrutura e fenologia de ecossistemas florestais

A relevância na identificação de padrões na estrutura florestal em relação à modelagem da PP reside na sua importância como reservatório dinâmico, sumidouro e/ou fonte de dióxido de carbono para atmosfera, como no caso de desflorestamentos. No entanto, a magnitude absoluta e os determinantes ambientais dessa estrutura ainda permanecem não suficientemente compreendidos, especialmente considerando a biomassa (MALHI et al., 2006). As incertezas nas estimativas de biomassa são responsáveis por aproximadamente 60% da variação das estimativas de fluxos de carbono (HOUGHTON et al., 2001).

De forma geral os modelos de estimativa de PP necessitam de um estoque inicial de carbono compartimentalizado em diferentes partes da estrutura vertical do dossel (copa, galhos, tronco, liteira, raiz e matéria orgânica). A partir de então, de acordo com a disponibilidade dos recursos naturais que compõem a PP (radiação, CO₂, água e nutrientes) o sistema florestal então incorpora a dinâmica do ciclo fenológico acumulando biomassa nos diferentes compartimentos.

A representação dos elementos estruturais do dossel pode ser realizada por índices biofísicos associados à biomassa, área basal, densidade de madeira, altura do dossel e índice de área foliar. Alguns modelos consideram além desses índices, a ciclagem de nutrientes (*turnover*) na dinâmica de acúmulo de biomassa (WILLIAMS et al., 1997a).

Informações provenientes de SR contribuem para uma melhor representação dessa estrutura florestal à medida que agrega a distribuição espacial e variação temporal dos padrões referentes aos índices biofísicos.

Saatchi et al. (2007) elaboraram uma metodologia baseada na integração de dados de SR visando à geração de um mapa de biomassa para a região

amazônica utilizando dados provenientes de inventário florestal, dados climáticos e dados dos sensores MODIS (Índice de Área Foliar - LAI – *Leaf Area Index* e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) e JERS-1 (*Japanese Earth Resource Satellite*), dados do programa SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e QSCAT (*Quick Scatterometer*). Em algumas regiões de floresta ombrófila densa e cerrado o coeficiente de determinação entre os dados modelados e observados alcançou 0,91, sendo que a acurácia total oscilou entre 60% a 75%.

Assim como a biomassa, o Índice de Área Foliar (LAI) consiste em uma variável requerida pela maioria dos modelos de estimativa de PP, onde o dossel é concebido como uma série de camadas de folhas que atenuam a radiação solar incidente de acordo com a lei de Beer-Lambert (WILLIAMS et al., 1996).

O LAI tem sido utilizado para representar o potencial do dossel em acessar a fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR). Este índice não é gerado diretamente por sensoriamento remoto. São utilizados modelos de transferência radiativa integrados a tipos de vegetação e ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Restrições na utilização desse índice se devem ao problema da saturação em condições de biomassa alta, principalmente em regiões de florestas tropicais (ARAGÃO et al., 2005). O problema da saturação é causado pelo efeito das múltiplas reflectâncias ocorridas no processo de sobreposição de camadas de folhas num dossel em desenvolvimento. Simultaneamente, as reflectâncias espectrais na região do infravermelho próximo e médio apresentam uma elevação em seus valores, até atingir um valor máximo e constante (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

Apesar dessa limitação, estudos têm sido realizados para aprimorar as estimativas do LAI por sensoriamento remoto. Esses estudos têm focado em análises multi-sensores visando melhorar a representação da cobertura vegetal e estabelecer relações entre a fração de cobertura vegetada, reflectância da

superfície, diferentes condições de iluminação e as propriedades óticas da vegetação (PROPASTIN e ERASMI, 2010).

Uma das limitações na utilização de modelos de escala fina (30-1000m) reside na limitação em quantificar a rugosidade do dossel. Estudos mostram que variáveis como o NDVI e o LAI podem ser utilizadas para estimar o comprimento de rugosidade, parâmetro relacionado à troca de momentum entre a superfície e a atmosfera (BORAK et al., 2005). A exatidão desse método depende da qualidade da representação da cobertura da terra e do tamanho da série histórica do LAI.

É possível perceber que na geração dos dados de entrada que alimentam os modelos de simulação da PP, em escala regional, existe a necessidade de aperfeiçoar a representação da cobertura vegetal. Chambers et al. (2007) utilizam o termo "hiper sensoriamento remoto" para agrupar os avanços em resolução espectral (hiperespectral), espacial (hiperespacial) e temporal (hipertemporal).

Técnicas como o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) têm permitido estimativas da estrutura vegetal contribuindo para a detecção de variações estruturais de acordo com a dominância dos componentes solo, sombra e vegetação, em escala regional e com baixo custo computacional (HOLBEN e SHIMABUKURO, 1993). Além desta, técnicas de reconhecimento de padrões como classificação orientada a objeto e mineração de dados podem auxiliar na detecção de padrões de cobertura vegetal, considerando a resposta fenológica do dossel em relação à sazonalidade climática (BLASCHKE, 2005).

Produtos como o Índice de Vegetação Melhorado (EVI – Enhanced Vegetation Index) tem proporcionado o monitoramento fenológico sazonal. Além disso, este índice tem contribuído para discussões sobre conceitos ecológicos relativos às respostas da vegetação ao déficit hídrico durante períodos secos. Estes resultados contribuíram para um intenso debate sobre a magnitude do declínio na alocação de carbono atmosférico nesse período (teoria do "greenup") (SAMANTA et al., 2012; SALESKA et al., 2007; HUETE et al., 2006). Além do ciclo fenológico, estudos mostraram relação direta entre o EVI, proveniente
do sensor MODIS, e os dados de produtividade bruta provenientes de torres de fluxo, umidade do solo e radiação solar incidente (Tabela 1).

Tabela 1. Coeficientes de determinação (R²) entre o fluxo de carbono medido em torres de fluxo (P_g) e índices MODIS, umidade volumétrica do solo (cm³/cm³) e radiação solar na superfície (W.m²) em três sítios de observação e a combinação de todos os sítios (HUETE, A.R. et al., 2008).

Variável	MaeKlong	Sakaerat	Bukit Soeharto	Combinação
MODIS EVI	0,88	0,76	0,46	0,74
MODIS Pg	0,07	0,18	0,03	0,00
MODIS f _{PAR}	0,01	0,04	0,16	0,05
MODIS NDVI	0,53	0,17	0,00	0,01
Umidade do solo	0,83	0,32	0,19	0,08
Radiação solar	0,81	0,48	0,00	0,55

Apesar de serem resultados que necessitam de maior aprofundamento, estes evidenciaram o potencial da utilização de produtos provenientes de SR para a melhor compreensão das relações espaciais entre a produtividade primária em escala regional e variáveis ambientais.

3 ÁREA ESTUDADA

É grande o volume de estudos ambientais na Amazônia e sistematizar os dados produzidos ao longo da história e a busca pela compreensão ecológica verticalizada dos ecossistemas não é uma busca recente.

A Amazônia pode se encaixar nessa perspectiva observando o avanço da sua compreensão, inicialmente motivado pela exploração dos recursos naturais (madeira e minério) (SALATI e VOSE, 1984). Apenas nas últimas três décadas é que observamos esforços multidisciplinares objetivando o estudo multi-escala dos processos ecológicos intra e inter ecossistêmicos.

Reconhecer esse panorama histórico é fundamental para entender que qualquer esforço no sentido de modelar processos ambientais na Amazônia é limitado e condicionado pela ausência de informações básicas e dados primários necessários aos estudos de modelagem.

Partindo dessa premissa, o ideal é que pesquisas abrangendo essa temática devem ser precedidas de um exercício de estudo visando compreensão holística dos componentes ecológicos que abrangem esse ecossistema, em suas respectivas áreas científicas específicas. Em última análise, compreender a evolução e interação dos processos de transferência de massa, energia e momento, ao longo do desenvolvimento da biodiversidade da fauna e flora amazônica.

3.1 Origens e influências geotectônicas nos gradientes ambientais

A origem do Cráton Amazônico ocorreu nos éons Arqueano e Proteozóico, a cerca de aproximadamente 2 bilhões de anos (DALL'AGNOL e ROSA-COSTA, 2008). De acordo com a sequência cronológica, eventos tectônicos deformaram a superfície terrestre e promoveram o afundamento da litosfera em áreas denominadas zonas de subsidência. A superfície da Terra foi então invadida pelo mar e a cerca de 500 milhões de anos, eventos como esse deram origem a Amazônia.

A partir do início do Paleógeno (100 a 50 milhões de anos) o tectonismo sobre a margem leste da bacia do Amazonas promoveu a abertura do Atlântico e a colisão com as placas do oceano Pacífico. Este evento forçou o soerguimento da cordilheira dos Andes, alterando a drenagem da bacia para o oeste dando origem a região onde atualmente está localizada a Floresta Amazônica (Figura 3.1) (NOGUEIRA, 2008).



Figura 3.1 - Formação da bacia Amazônica. Fonte: Nogueira (2008)

Estes estudos estabeleceram uma estratificação do ecossistema amazônico em regiões consideradas como bases litoestratigráficas, que incluem informações sobre as estruturas tectônicas e os aspectos geomorfológicos. Foram identificados 14 domínios tectônicos na região amazônica: (1) Pacaraima-Caracaraí, (2) Negro-Purus, (3) Manaus-Nhamundá, (4) Tupinambarana, (5) Baixo Tapajós, (6) Comandaí, (7) Gurupá, (8) Araguari-Oiapoque, (9) Marajoara, (10) Bragantino, (11) Gurupi-Mearim, (12) Tiracambu, (13) Estreito-Carolina e (14) Carajás (BATISTA et al., 1991; BEMERGUY et al., 2002).

Partindo dessa configuração até a formação do gradiente de fertilidade, a bacia amazônica pode ser dividida em três grandes regiões geológicas: (a) bacia Précambriana; (b) parte central; e (c) região dos Andes. A bacia Pré-cambriana é composta das bacias da Guiana na porção norte e Brasiliana na porção sul. A região central, localizada entre essas duas regiões, é considerada como depressão formada no Paleozóico. Essas são as regiões mais antigas da Bacia Amazônica e têm em comum uma formação pedológica datada em cerca de 20 milhões de anos, correspondendo ao final do período Cretáceo. Portanto, é uma região de pouca atividade geológica recente, onde os solos foram formados a partir de rochas e sedimentos, e, longo e contínuo intemperismo, consequentemente, resultando em solos pobres em nutrientes (FITIKAU, 1971; FITTKAU, 1975; IRION, 1978).

A região dos Andes, localizada na parte oeste, possui origem geológica mais recente, tendo uma formação pedológica iniciada há apenas 2 milhões de anos. Essa região possui ainda grandes áreas onde solos rasos em encostas de montes e montanhas predominam, sendo esses, formados por sedimentos jovens e sobrepostos. Portanto, essa é a região mais fértil da bacia (FITTKAU, 1971; IRION, 1978; JORDAN e HERRERA, 1981).

Portanto, os gradientes referentes às propriedades dos solos da Bacia Amazônica, assim como da vegetação por consequência (TER STEEGE et al., 2000), possuem características intrinsecamente dependentes da idade e processos geológicos e geomorfológicos (QUESADA et al., 2009).

3.2 Gradientes ambientais

3.2.1 Gradiente de fertilidade

Quesada et al. (2010) realizaram um estudo que descreveu a ocorrência e distribuição de 14 dos principais tipos de solos encontrados na região amazônica e agrupou de acordo com as condicionantes: idade, clima tropical úmido, topografia e drenagem e material de origem. No oeste da Amazônia, o estudo indicou que os solos possuem baixo nível pedogenético, ou seja, mais jovens, pouco intemperizados, formados pela deposição de sedimentos provenientes de regiões mais altas e, consequentemente, mais férteis, como, por exemplo, os Cambissolos. Seguindo até a parte central e leste, por outro lado, os solos tendem a ser mais intemperizados, antigos e consequentemente menos férteis (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Distribuição dos tipos de solos na Amazônia de acordo com Quesada et al. (2010), com a legenda de solos correspondente à nomenclatura utilizada pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*).

Como a diversidade e distribuição espacial dos tipos de solos da Amazônia seguem um padrão no sentido oeste – leste, as demais propriedades químicas relacionadas à fertilidade também tenderão a seguir o mesmo padrão.

Os gradientes de fertilidade dos solos são referentes principalmente à capacidade de troca de cátions, teores de fósforo (Figura 3.3b) e soma de bases trocáveis (Figura 3b). Essas variáveis mostraram uma tendência de acréscimo, dos solos mais jovens aos de idade intermediária, seguindo posteriormente um declínio acentuado nos solos mais antigos e intemperizados (QUESADA et al., 2010).



Figura 3.3 - Gradientes de fertilidade dos solos de acordo com Quesada et al. (2010): (a) Soma de bases (*Sum of bases*) e (b) Fósforo Total (*Total P*).

3.2.2 Gradiente Climático da Precipitação

A precipitação é uma das principais forçantes climáticas na Amazônia e apresenta grande variabilidade espacial (Figura 3.4). O regime hídrico é resultante de fenômenos planetários (inclinação e distância da Terra em relação ao Sol) globais atuantes em escala espacial global (radiação solar incidente. circulação atmosférica global, entre outros) е regional (desmatamento). Na interação atmosfera – biosfera, a precipitação influencia componentes ambientais alterando suas características em diferentes escalas temporais. Exemplos disto são as alterações na fertilidade dos solos pela lixiviação, determinação das espécies que povoam determinado habitat e alterações fenológicas, como controle de floração, bem como crescimento e senescência de folhas.

Em relação à circulação global, o cinturão tropical é a parte do globo na qual a atmosfera ganha momento angular da superfície da Terra. Essa região possui a energia necessária para compensar a perda de calor, que ocorre em direção aos polos, e manter o equilíbrio termodinâmico do Planeta (CASTRO, 2009). Nesse contexto, a Amazônia é um dos três mais extensos e intensos centros de convecção da região tropical, sendo os demais na região do Congo na África e na região da Indonésia (MARENGO, 1993). Durante o verão no hemisfério sul, quando a convecção é mais desenvolvida, a Amazônia é uma das regiões mais úmidas do Planeta.

O regime hídrico na Amazônia apresenta grande variabilidade espacial (Figura 3.4). A região noroeste, por exemplo, apresenta maior volume de precipitação anual (4.000 a 6.400 mm), enquanto o extremo leste apresenta um volume abaixo de 1.200 mm. Na região norte, entre a região das Guianas até a região de Santarém- PA/Brasil é possível observar a presença de um corredor seco. Nesse corredor, a vegetação apesenta grande diversidade, desde a savana de Roraima até a floresta ombrófila densa na Floresta Nacional (FLONA) do Tapajós-Santarém (SOMBROEK, 2001). De forma geral, a Amazônia apresenta um gradiente de precipitação no sentido noroeste (mais úmido) – sudeste (menos úmido).



Figura 3.4 - Distribuição espacial de uma série climatológica (30 anos) referente a precipitação anual de acordo com Sombroek (2001).

Além da intensidade do regime hídrico, a sazonalidade da precipitação (Figura 3.5) é um fator que pode ser determinante tanto para a colonização de regiões geográficas por espécies vegetais (TER STEEGE et al., 2006), quanto para o controle da magnitude de processos ecofisiológicos como a produção de liteira (CHAVE et al., 2009).



Figura 3.5 - Distribuição espacial de uma série climatológica (30 anos) referente ao comprimento do período seco, considerando a quantidade de meses onde a precipitação foi menor que 100mm.

3.2.3 Gradiente das variáveis estruturais do dossel florestal

A heterogeneidade da Floresta Amazônica, sob qualquer aspecto da estrutura ou dinâmica florestal, é inquestionavelmente alta (SILVA et al., 2013; ANDERSON, 2012; SAATCHI et al., 2007). Dentre os processos que ocorrem na interação atmosfera – biosfera na Amazônia, o sistema solo – planta – atmosfera possui propriedades diferentes que interagem entre si de forma diferente de acordo com a escala espaço – temporal. Avaliando os gradientes ambientais, é difícil determinar o grau de influência da variação das propriedades dos solos como determinantes das características da vegetação, assim como é difícil determinar o grau de influência das variáveis atmosféricas nos processos ecofisiológicos vegetais.

A direção de vários gradientes ambientais da Amazônia, entre eles a fertilidade dos solos, está alinhada no sentido leste-oeste. Essa variabilidade exerce importância determinante na explicação de diversas variáveis estruturais da vegetação, em ampla escala espacial (QUESADA et al., 2009).

A produção de liteira decai com a diminuição da fertilidade dos solos, sendo que em solos menos férteis a vegetação tende a investir mais em compostos fotossintéticos e na eficiência da fotossíntese do que na produção de folhas. Apesar da produção de liteira não ser influenciada pela precipitação anual, a sazonalidade na produção de liteira aumenta com a sazonalidade da precipitação (CHAVE et al., 2010).

A densidade de madeira tende a ser alta na região leste da Amazônia onde a taxa de crescimento é baixa, os solos são menos férteis, a precipitação anual é menor e o comprimento do período seco é maior. A área basal está ligada às relações hidráulicas entre solo e planta, sendo menor nas regiões mais secas, ao contrário da densidade de madeira (MALHI et al., 2006).

De acordo com a interpolação de medidas em campo da biomassa acima do solo (MALHI et al., 2006) foi possível observar que a biomassa é maior em áreas mais úmidas, com baixa produtividade de madeira e solos menos férteis, região central e costa das Guianas.

O mapeamento da biomassa acima do solo e, consequentemente, a compreensão das relações entre a biomassa e outras variáveis ambientais, como a fertilidade do solo, têm sido desafiador. Os principais estudos de mapeamento de biomassa na Amazônia têm apresentado resultados divergentes. Malhi et al. (2006) apresentaram um mapa baseado na interpolação de dados medidos em campo, onde o extremo oeste e a parte norte, apresentaram menores valores de biomassa. Esta representação diverge de Saatchi et al. (2007) no extremo oeste e extremo norte. Ambas anteriores divergem de Saatchi et al. (2011) que apresentaram altos valores na parte noroeste e nordeste.

3.2.4 Gradiente de distribuição de espécies vegetais

Sobre o suporte pedológico e, apesar de recentes estudos apresentarem evidências da influência decisiva de fatores geológicos na ocorrência específica de tipos vegetacionais (ROSSETTI e VALERIANO, 2007), outros estudos evidenciaram fatores anteriormente consolidados como clima (precipitação, temperatura e radiação), topografia e fertilidade dos solos. Integrando esses três componentes, observa-se um gradiente partindo do escudo da Guiana em direção ao sudoeste da Amazônia e outro partindo da Colômbia para o sudeste da Amazônia (TER STEEGE et al., 2006).

O primeiro está associado à massa de sementes (Figura 3.7a), densidade lenhosa (Figura 3.7b), fertilidade dos solos e abundância de leguminosas (*Fabaceae*) (Figura 3.7c); o segundo e mais intenso refletiu o comprimento do período climático seco, conhecido por limitar a diversidade de espécies (Figura 3.7d).



Figura 3.6 - Distribuição geográfica das características de árvores do ecossistema amazônico e os valores em cada região representados pelo tamanho dos círculos abertos: a) comunidade ponderada pela massa de sementes; b) comunidade ponderada pela densidade lenhosa; c) abundância de leguminosas (*Fabaceae*); e d) diversidade de árvores (ìndice α – Fisher).

Esse estudo também concluiu que a ocorrência, distribuição e abundância de espécies como as leguminosas, estão associadas à fertilidade dos solos e ao ciclo hidrológico. Nesse caso, observa-se que não apenas a intensidade e distribuição da precipitação, mas, o comprimento em meses do período seco influenciaram fortemente na adaptação da vegetação e na dinâmica do ciclo fenológico relacionadas a propriedades biofísicas como a produtividade primária e a densidade de madeira.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A modelagem da Produtividade Primária Bruta (PPB) foi realizada seguindo um fluxograma metodológico (Figura 4.1) onde a análise da PPB foi dividida em três partes: (1) análise em escala de bioma, (2) análise da distribuição espacial e (3) avaliação da sazonalidade.

4.1 Fluxograma Metodológico



Figura 4.1 - Fluxograma metodológico.

A análise em escala de bioma constitui na quantificação da PPB total do bioma e comparação com as variáveis climáticas referente a precipitação e a radiação solar incidente. A análise da distribuição espacial teve o objetivo de avaliar a magnitude da PPB média anual de acordo com sua distribuição espacial no bioma. A análise da sazonalidade teve o objetivo de avaliar a variação da PPB mensal ao longo do bioma e sua relação com as variáveis climáticas (Figura 4.2).



Figura 4.2 - Fluxograma da análise de sazonalidade da PPB.

4.2 Aquisição dos dados

Para a execução do modelo de PPB, validação e análise da PPB foram utilizados dados climáticos provenientes da base global GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*), dados de índice de vegetação provenientes do sensor MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), dados das torres de fluxo do Projeto LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*) e dados fenológicos e estruturais da vegetação coletados na literatura.

4.3 Dados climáticos GLDAS

O Sistema Global de Assimilação de Dados Terrestres (*Global Land Data Assimilation System* - GLDAS) é um projeto desenvolvido através da parceria entre a agência espacial americana (*National Aeronautics and Space Administration* - NASA) e o centro de pesquisas da atmosfera americano NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) com o objetivo de produzir uma nova geração de dados climáticos espaciais e medidos na superfície. Essa base disponibiliza dados referentes às variáveis e forçantes climáticas de modelos de interação atmosfera-biosfera, desde fevereiro de 2000 até o presente.

A grande vantagem do GLDAS, o que representa uma inovação em estudos climáticos, é a disponibilização de dados climáticos globais em alta resolução (0.25°), desacoplados de modelos atmosféricos terrestres, utilizando dados de satélite incorporados a dados observados gerando informações de fluxo e estado da superfície em tempo real. Os dados produzidos pelo GLDAS seguem na Tabela 4.1.

Variável	Unidade	Resolução temporal
Pressão atmosférica na superfície	Pa	Instantâneo
Temperatura na superfície	K	Instantâneo
Velocidade do vento	m/s	Instantâneo
Umidade específica	kg/kg	Instantâneo
Precipitação	mm/dia	3-horas
Evapotranspiração	kg/m²/s	3-horas
Água total armazenada na copa	kg/m²	Instantâneo
Temperatura no solo	K	Instantâneo
Umidade no solo	kg/m ²	Instantâneo
Radiação incidente de ondas curtas	W/m ²	3-horas
Radiação incidente de ondas longas	W/m ²	3-horas
Fluxo de calor sensível	W/m ²	3-horas
Fluxo de calor latente	W/m ²	3-horas
Fluxo de calor no solo	W/m²	3-horas
Escoamento superficial	kg/m²/s	3-horas
Escoamento subsuperficial	kg/m²/s	3-horas

Tabela 4.1 Dados gerados pela base de dados climáticos GLDAS, unidade e resolução temporal.

A base GLDAS tem sido amplamente utilizada para estudos hidrológicos e climáticos. Chen et al. (2013) demonstraram boa exatidão na estimativa da

umidade do solo na camada de 20-40cm. Tapley et al. (2004) utilizaram dados GLDAS integrados ao projeto GRACE (*Gravity Recovery and Cimate Experiment*) para a estimativa do ciclo hidrológico e variações no lençol freático em escalas regional e global. Spracklen e Taylor (2012) avaliaram a contribuição da evapotranspiração em eventos de precipitação na Amazônia utilizando uma série histórica de evapotranspiração proveniente da GLDAS e demonstraram a redução da precipitação em função do aumento do desmatamento.

4.4 Carbono atmosférico AIRS

Os dados referentes ao CO₂ atmosférico foram provenientes do sensor AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*), a bordo da plataforma EOS-Aqua (*Earth Observing System-Aqua*). O objetivo primário do sensor AIRS é aperfeiçoar as previsões climáticas e proporcionar estudos relacionados aos ciclos hidrológicos e de energia e gases do efeito estufa (CHAHINE, et al., 2006).

O sistema AIRS realiza o imageamento da atmosfera na região espectral do infravermelho (3,74µm a 15,4 µm) usando 2.378 canais produzindo dados em uma resolução espacial de 90x90km. O sistema AIRS utiliza um modelo de transferência radiativa (*Vanishing Partial Derivative*) (CHAHINE et al., 2005) e um algoritmo de correção atmosférica, capturando o sinal do CO₂ em uma coluna atmosférica que varia entre 200hPa a 700hPa (11,8km a 2,5km), onde o pico de sensibilidade ocorre em 450hPa (6,3km). Os dados são disponibilizados em uma grade de 2,5° x 2°, desde setembro de 2002.

Tangborn et al. (2012) avaliaram aperfeiçoamentos no sistema AIRS, entre os quais a utilização de técnicas de assimilação de dados observados e constataram melhoria na exatidão da estimativa de CO₂ na média à baixa troposfera em escala regional.



Figura 4.3 - Média mensal do CO₂ atmosférico global para o ano de 2008.

4.5 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

Foram utilizados índices de vegetação provenientes dos sensores AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) e MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*).

Foram adquiridos dois conjuntos de dados de NDVI do sensor AVHRR em uma série histórica de vinte e sete anos (1982-2008), sendo um conjunto referente a composição quinzenal totalizando 648 imagens e outro referente a composição mensal totalizando 324 imagens. Esse conjunto de dados foi produzido pelo Global Inventory Modeling and Monitoring Study (GIMMS) e disponibilizado com uma resolução espacial de 8km incluindo novas características de processamento que reduzem a variações decorrentes da calibração radiométrica, ângulo de visada, aerossóis vulcânicos e outros efeitos não relacionados à dinâmica da vegetação (TUCKER et al., 2005; PINZON et al., 2005).

Adicionalmente, foi adquirido um conjunto de dados de NDVI do produto MOD13C1 do sensor MODIS em uma série histórica de oito anos (2003-2010) na composição de 16 dias, totalizando 96 imagens. A aquisição dos dados foi realizada a partir do repositório de imagens do "*Warehouse Inventory Search Tool* (WIST)" (disponível no endereço: https://wist.echo.nasa.gov) e pré-

processados com o aplicativo *MODIS Reprojection Tools* (MRT®) para a obtenção de coordenadas planas e a realização da reamostragem dos pixels. O método de reamostragem utilizado foi o vizinho mais próximo.

4.6 Dados coletados em campo

Nos processos que compuseram a modelagem da Produtividade Primária Bruta (PPB) foram utilizados dados meteorológicos, de fluxo de carbono e calor estimados pelas torres de fluxo (5 torres) do projeto LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*). As torres estão localizadas na Floresta Nacional (FLONA) de Caxiuanã – PA , FLONA do Tapajós km67 – PA, FLONA do Tapajós km 83 – PA, Manaus km34 – AM e Reserva Jarú – RO (Figura 4.4).



Figura 4.4 - Localização das torres de fluxo na Amazônia

Os dados fenológicos de liteira e produção de folhas novas foram coletados na literatura e estão dispostos na área estudada de acordo com a Figura 4.5.



Figura 4.5 - Localização dos sítios de coleta de dados fenológicos.

As referências dos dados fenológicos, assim como a localização, mês e estação climática onde ocorre o ápice de produção seguem na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Referência	localização,	mês e	estação	climática	(Período	o Seco -
PS e Per	odo Chuvoso) – PC)	de ocorr	ência do	pico de j	produção
de folhas	novas e liteira	a				

Referência	País	Mês	Estação						
Pico de produção de folhas novas									
Norconk e Brittain (2004)	Venezuela	Abr – Jun	Final do PS						
Peres (1994)	Brasil	Mar - Mai	Final do PS						
Bonal et al. (2000)	Guiana Francesa	Mar - Aug	Final do PC						
Boubli (2005)	Brasil	Out	PS						
Pinto e Stez (2004)	Brasil	Jun	PS						
Basset et al. (2002)	Guiana	Abr	Final do PS						
Pico de	produção de liteira	I							
Justiniano e Fredericksen (2000)	Bolívia	Jun - Set	Final do PS						
RAINFOR – Tambopata-Peru	Peru	Ago - Out	Final do PS						
Parhasa a Faarasida (1996)	Procil	Abr –Mai	Final do PC						
Dalbosa e Featriside (1990)	Diasii	Nov - Dez	Final do PS						
Nebel e Salazar (2001)	Peru	Fev - Mar	Final do PS						
Selva et al. (2007)	Brasil	Jul – Set	PS						
Brienen e Zuidema (2005)	Bolívia	Jul – Set	PS						

A PPB modelada foi comparada com dados biofísicos estruturais do dossel referentes à produção de liteira, biomassa, produtividade de madeira,

sazonalidade das variáveis estruturais, taxas de crescimento, entre outros. Esses dados foram publicados nos trabalhos de Malhi et al. (2004), Malhi et al. (2006) e Chave et al. (2009) (Figura 4.5).



Figura 4.5 - Localização dos sítios de coleta de dados de produtividade de madeira (MALHI et al., 2004), biomassa acima do solo e área basal (MALHI et al., 2006) e produção de liteira reunidos por (CHAVE et al., 2009).

4.7 Modelagem da Produtividade Primária Bruta (PPB)

A modelagem da PPB foi realizada inicialmente de forma pontual considerando os dados das torres de fluxo e a série temporal do índice de vegetação no ponto de cada torre. O objetivo dessa etapa foi avaliar a parametrização do modelo e gerar dados de PPB com a exatidão da estimativa pontual.

Em seguida foi realizada a modelagem utilizando apenas os dados de sensoriamento e dados da base GLDAS. Nessa etapa, a parametrização foi realizada considerando o menor Erro Quadrático Médio entre os dados modelados e dados observados coletados em campo e das torres de fluxo.

Ajustados os parâmetros do modelo ACM utilizando os dados de sensoriamento remoto e GLDAS, a espacialização da PPB foi realizada inicialmente reamostrando os dados climáticos e de CO₂ atmosféricos, de uma resolução espacial de 0,25° e 2,5°, respectivamente, para uma resolução espacial de 8km x 8km. Essa reamostragem visou compatibilizar os dados climáticos com os dados de índice de vegetação NOAA-AVHRR e MODIS-Terra (MOD13C1).

A espacialização da estimativa da PPB pelo modelo ACM foi realizada em uma resolução espacial de 8km e resolução temporal mensal. A análise de exatidão da PPB modelada foi realizada utilizando os dados das torres de fluxo e dados de PPB estimados em campo. Em seguida, foram executadas três análises em níveis diferentes de escala espacial e temporal.

A primeira análise consistiu em uma avaliação, na escala de bioma, da evolução da PPB anual ao longo dos oito anos estudados. Nesta etapa foi calculada a PPB mensal e anual média da Amazônia como um todo. A precipitação e radiação solar incidente média anual, também foram calculadas e comparadas com a PPB.

A segunda análise focou na distribuição espacial da PPB. Nesta etapa foi calculada a média anual da PPB, considerando os oito anos estudados, e, gerada uma imagem da PPB média da Amazônia. Essa imagem foi avaliada de

acordo com os gradientes biofísicos estruturais do dossel vegetal e gradientes climáticos presentes na Amazônia.

A terceira análise consistiu na quantificação da sazonalidade da PPB. Nesta etapa foi executada uma metodologia para delimitação de áreas homogêneas quanto à fenologia do dossel florestal (fenoregiões). Isso porque, neste trabalho a fenologia florestal foi considerada como uma variável ambiental crítica no estabelecimento de padrões sazonais dos processos que envolvem a interação biosfera-atmosfera. Uma vez mapeadas as fenoregiões, a PPB mensal média de cada mês do ano foi calculada com o objetivo de avaliar a distribuição espacial da sazonalidade da PPB. Em seguida, uma análise de correlação de Pearson foi executada entre a PPB mensal, dados climáticos (precipitação, radiação solar incidente, temperatura e déficit de pressão de vapor) e índice de vegetação (forçante fenológica).

4.8 O Modelo Agregado de Dossel (ACM)

A escolha do modelo ACM foi motivada pela viabilidade técnica e operacional da utilização em diferentes fitofisionomias na região amazônica, demonstrada em trabalhos anteriores (FISHER et al., 2008; ARAGÃO, 2004). O ACM (Agregate Canopy Model) é um modelo de estimativa da PPB projetado para estimativas em escala temporal diária, integrando assim processos no sentido folha-dossel a partir de dez variáveis ambientais que controlam a assimilação de carbono atmosférico nessa escala temporal (Tabela 2) (WILLIAMS et al., 1997a).

Variáveis	Unidade
Índice de área foliar	m²/m²
Concentração foliar de nitrogênio	g/m²
Temperatura máxima mensal	°C
Radiação incidente	MJ
Concentração de CO ₂ atmosférico	µmol/mol
Condutância estomática	mm
Dia Juliano	dia
Latitude	Grau

Tabela 4.3 Variáveis necessárias para execução do modelo ACM	
--	--

As equações matemáticas que compõem o modelo consideram a concentração de nitrogênio foliar, concentração de CO_2 atmosférico, condutância estomática e disponibilidade de radiação solar. Inicialmente a taxa de fotossíntese (P_N) (Equação 4.1) é limitada pela concentração de nitrogênio foliar (N), índice de área foliar (L) e pela temperatura (T):

$$P_{\rm N} = e^{(a_2 T)} a_1 N L \tag{4.1}$$

a1 e a2 são parâmetros de ajuste. Assume-se que o nitrogênio foliar é limitado pela concentração foliar de CO_2 (C_i). Neste trabalho, o nitrogênio foliar foi configurado como constante no valor de 2,5 g m⁻². A justificativa para definir esta constante baseia-se nos trabalhos de Loyd et al. (2010) e Fyllas et al. (2009) que mostraram que o nitrogênio não limita o desenvolvimento foliar e a fotossíntese, seja pela hipótese de adaptação das espécies ou seleção natural do ambiente, ou seja pelo uso otimizado dos nutrientes pela vegetação ao longo dos gradientes climáticos e de fertilidade do solo. O valor de 2,5 g m⁻² foi calculado pela média de nitrogênio foliar de 73 espécies, em doze sítios na Amazônia (MARTINELLI et al., 2007). Esses dados foram adquiridos no endereço eletrônico do projeto LBA.

A taxa de assimilação de carbono é co-limitada por limitações metabólicas e de difusão de CO_2 . Essa co-limitação foi considerada no modelo através de uma generalização entre a concentração interna de CO_2 (µmol/mol) e o ponto de compensação de CO_2 (µmol/mol). Esse ajuste da fotossíntese pela limitação de CO_2 (P_C µmol/mol) foi calculado pela Equação 4.2:

$$P_{\rm C} = \frac{P_{\rm N}(C_{\rm i} - \theta)}{k + (C_{\rm i} - \theta)} \tag{4.2}$$

onde, *k* é constante de saturação (µmol/mol) e θ é o ponto de compensação. Em escala diária, a difusão do CO₂ atmosférico (*C_a*) em direção ao sítio de carboxilação (*P_D*) é representada por uma função de condutância diária do dossel (*g_c*) e a diferença de concentração de CO₂ nesses dois locais. Portanto, a taxa de difusão de CO₂ no sítio de fixação de carbono (*P_D*) (Equação 4.3) é determinada por:

$$P_{\rm D} = g_{\rm c}(C_{\rm a} - C_{\rm i}) \tag{4.3}$$

A fórmula original da condutância do dossel elaborada por Williams et al. (1997) foi alterada por Fisher et al. (2006) (Equação 4.4) para adequar às condições tropicais e ecossistemas de severo estresse hídrico:

$$g_{\rm c} = \frac{\sqrt{\Psi_{\rm d}}}{b_1 R^{b_2} + 0.5 V^{b_3} I^{b_4}} \tag{4.4}$$

onde ψ_d é a diferença entre o potencial hídrico foliar e o potencial hídrico do solo, *R* é a resistência hidráulica solo-planta, *V* é o déficit de pressão de vapor e *I* é a irradiância. *b1*, *b2*, *b3* e *b4* são parâmetros que determinam pesos relativos a *R*, *V* e *I* sobre a condutância estomática. Neste trabalho, o modelo de condutância foi substituído pela inversão do modelo de Penman-Monteith (ZHANG et al., 2010) descrito no tópico posterior (4.3.2). Essa decisão foi baseada na impossibilidade de utilização do modelo original devido à ausência de dados espacializados para toda área estudada.

A concentração foliar de CO₂ (C_i) (Equação 4.5) é calculada assumindo que P_C = P_D :

$$C_{i} = \frac{1}{2} \left[C_{a} + q - p + \sqrt{(C_{a} + q - p)^{2} - 4(C_{a}q - p\theta)} \right]$$
(4.5)

Onde, q = θ – *k* (*k*: constante de saturação (µmol/mol) e θ : ponto de compensação) e p = P_N/g_c . Este valor Ci foi substituído na Equação 4.3 para o cálculo da taxa de difusão de CO₂ (P_D).

A limitação da assimilação de carbono em função da radiação (*P*₁) (Equação 4.6) é determinada por:

$$P_{\rm I} = \frac{E_{\rm o}IP_{\rm D}}{E_{\rm o}I + P_{\rm D}} \tag{4.6}$$

onde *Eo* é o rendimento quântico em nível de copa (gramas de carbono por megajoule por metro quadrado por dia) que é o número de fótons necessários para formação de uma molécula de oxigênio durante o processo fotossintético. *I* é a irradiância (MJ). De acordo com simulações realizadas através de modelos em escala horária, o E_0 (Equação 4.7) foi calculado em função do índice de área foliar (*L*):

$$E_0 = \frac{c_1 L^2}{L^2}$$
(4.7)

A equação final do cálculo da Produtividade Primária Bruta (Equação 4.8) é calculada considerando uma correção relacionada ao comprimento do dia:

$$P_{\rm T} = p_1(d_1 D_{\rm ms} + d_2) \tag{4.8}$$

onde D_{ms} é o número de dias do solstício de verão e p₁ é a razão entre a taxa de fotossíntese (P_N) e a condutância diária do dossel (g_c).

4.9 Modelo de condutância estomática – Penman-Monteith

Dentre os inúmeros modelos de estimativa de evapotranspiração e, consequentemente, condutância estomática, o modelo de Penman-Monteith é citado como o mais avançado e irrefutável modelo, usado atualmente nos mais variados estudos hidrológicos e de interação biosfera-atmosfera (ZHANG et al., 2010).

O modelo utilizado neste trabalho consiste em uma adaptação do modelo de Penman-Monteith realizada por Zhang et al. (2010) para estimar a evapotranspiração global utilizando dados climáticos de bases globais e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) do sensor AVHRR-NOAA.

O modelo de condutância do dossel florestal (g_c) é calculado a partir da constante psicométrica (γ), fluxo de calor latente (LE_{Canopy}), densidade do ar (ρ), calor específico do ar à pressão constante (C_P), déficit de pressão de vapor (VPD), inclinação da curva referente à pressão de vapor do ar saturado (Δ),

energia disponível para evapotranspiração (A_{Canopy}), condutância aerodinâmica (g_a), calculada por bioma de acordo com a Equação 4.9 (MONTEITH e UNSWORTH, 2008):

$$g_{c} = \frac{g_{a}\gamma LE_{Canopy}}{\Delta A_{Canopy} + \rho C_{P}VPDg_{a} - LE_{Canopy}(\Delta + \gamma)}$$
(4.9)

A energia disponível para evapotranspiração (A_{Canopy}) é calculada pela diferença entre a radiação solar líquida incidente (R_n) e o fluxo de calor no solo (G). A R_n é um dado proveniente da base GLDAS, enquanto que G foi calculado (Equação 10) utilizando o método proposto por Su et al. (2001):

$$G = R_{\rm n} \times \left[\Gamma_{\rm c} + (1 - f_{\rm c}) \times (\Gamma_{\rm s} - \Gamma_{\rm c})\right]$$
(4.10)

Onde, f_c corresponde à fração da cobertura vegetal e Γ_c correspondem à razão entre o fluxo de calor no solo e a radiação líquida incidente para uma completa cobertura pela vegetação e Γ_s para solo exposto. Su et al. (2001) padronizaram $\Gamma_c = 0,05$ e $\Gamma_s = 0,315$, como constantes globais.

A fração da cobertura vegetal (f_c) (Equação 11) foi estimada utilizando os valores de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) real do pixel, valor máximo (NDVI_{min}) e mínimo (NDVI_{max}):

$$f_{C} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}}$$
(4.11)

A inversão do modelo de Penman-Monteith tem sido amplamente utilizado integrado à dados de sensoriamento remoto e bases climáticas globais, para estimar a evapotranspiração em escalas regional e global (YUAN et al., 2010; ZHANG et al., 2010; MU et al., 2007).

4.10 Mapeamento das fenoregiões

O conceito de fenoregiões adotado neste trabalho se refere às regiões do dossel florestal, onde o ciclo fenológico perceptível ao imageamento por satélite (brotamento de folhas novas, desenvolvimento vegetativo e senescência), ocorre de forma homogênea. Inicialmente, foram assumidas três premissas: (1) séries temporais de NDVI fornecem um sinal espectro-temporal análogo ao ciclo fenológico florestal (espectro fenológico ou assinatura fenológica) permitindo a distinção de diferentes padrões fenológicos; (2) o dossel florestal pode ser regionalizado pela distinção matemática de ciclos fenológicos representados por séries temporais de NDVI; e (3) a natureza de séries temporais de NDVI é análoga à dados hiper espectrais permitindo o uso de técnicas de processamento digital de imagens similares.

Uma abordagem "pixel por pixel" de tratamento de dados hiper espectrais foi aplicada no processamento da série temporal de NDVI-AVHRR (1982-2008) com o objetivo de distinguir automaticamente sinais espectro-temporais que representem diferentes padrões fenológicos do dossel florestal. A série temporal NDVI-AVHRR foi escolhida em detrimento ao NDVI-MODIS por ser mais longa, o que favoreceria a melhor distinção fenológica em um longo período. Nesse caso, a resposta de diferentes tipos de vegetação aos eventos climáticos extremos (El Niño e La Niña) favorece a distinção desses padrões, quanto maior for a série temporal utilizada.

Essa abordagem consistiu inicialmente em realizar um "ajuste de erro" na série temporal através de uma análise de componentes principais de mínima fração de erro (ruído), identificação automática de membros de referência correspondentes aos principais padrões fenológicos do dossel florestal da Amazônia e executar uma classificação automática baseada em similaridade espectral.

A técnica de Mínima Fração de Ruído é uma reformulação da análise de componentes principais "clássica" que realiza uma transformação linear ordenando as imagens de acordo com a razão entre sinal e erro (valores extremos). O resultado é um novo conjunto de dados onde o erro é reduzido a uma magnitude desprezível (GREEN et al., 1988).

Subsequentemente, a técnica de Índice de Pureza de Pixel (*Pixel Purity Index – PPI*) foi aplicada nesse novo conjunto de dados, sendo essa, baseada no conceito matemático de geometria convexa. Essa formulação é utilizada para

identificar assinaturas espectrais puras ou extremas (membros de referência) em um conjunto de dados representado em um espaço geométrico multidimensional. Nessa representação, os valores dos pixels de cada imagem são representados em um eixo, onde o número de eixos, ou dimensões, é igual ao número de imagens (CHANG e PLAZA, 2006; BOARDMAN, 1988). O PPI repetidamente reprojetando aleatoriamente foi executado 0 espaco multidimensional. Os valores extremos são computados em cada projeção e o número total de vezes que cada pixel foi classificado como extremo é computado até um valor limite. Neste trabalho foi utilizado o limiar máximo de 5.000 pixels para serem computados como extremo ou puro (membro de referência). Um visualizador multidimensional foi utilizado para distinguir automaticamente e estatisticamente as assinaturas espectrais puras e extremas dentro do universo de 5.000 pixels. Ao final dessa etapa, apenas 49 assinaturas foram selecionadas.

Essas 49 assinaturas espectrais de referência (assinaturas fenológicas) serviram como dado de entrada para uma técnica de reconhecimento de padrões baseada na similaridade da forma de curvas espectrais, ou seja, similaridade do ângulo espectral (*Spectral Angle Mapper*). Essa técnica representa os valores de um pixel ao longo de uma série temporal, como um vetor em um espaço multidimensional. Um limiar é fornecido para a comparação de similaridade espectral, e, uma vez considerado como similar, o pixel é agregado a uma categoria (classe) singular (DENNISON et al., 2004; KRUSE et al., 1993).

Com o objetivo de consistir o mapa gerado, a eliminação de classes com menos de 100 pixels. Também foi realizada, assim como, também foram eliminados os pixels que não possuíam mais do que 9 vizinhos na mesma classe (fenoregião).

Para cada fenoregião foi computado o NDVI médio mensal e construída uma série temporal composta de 26 anos de dados mensais de NDVI. O filtro Savitzky-Golay foi aplicado em cada uma das 26 séries temporais com o objetivo de eliminar eventuais valores extremos remanescente do

processamento digital. Com o objetivo de suavizar ao mínimo, uma "janela" de apenas 2 valores foi utilizada (CHEN et al., 2004).

Essa série temporal (fenológica) mensal foi construída para favorecer a análise de correlação com os dados climáticos de precipitação e radiação solar incidente.

Para cada fenoregião foi calculado o coeficiente de variação mensal com o objetivo de avaliar a homogeneidade das classes ao longo da série.

De posse das 26 séries fenológicas foram calculadas as fenofases: (a) Início do período de crescimento (SS – "start of season"); (b) Pico do período de crescimento (PS – "peak of season"); e, (c) Final do período de crescimento (ES – "end of season"). O mês de ocorrência de cada fenofase foi registrado e a moda referente ao valor do mês foi computada (de 1 a 12) para caracterizar o mês de ocorrência característico de cada fenofase por fenoregião. Esse resultado foi representado em forma de mapa para favorecer a visualização de possíveis gradientes fenológicos na Amazônia.

A validação do mapa foi realizada pela comparação das séries temporais com dados fenológicos de liteira e brotamento de folhas novas, coletados em campo. A longa série temporal favoreceu o resgate de trabalhos realizados em um passado maior. Ao todo, doze fenoregiões foram validadas com dados de campo.

Finalizando esta etapa, uma análise de correlação entre os dados de NDVI, precipitação e radiação solar (principais forçantes climáticos da fenologia florestal) foi realizada no sentido de avaliar a influência climática na fenologia florestal, assim como, auxiliar na validação do mapa. Isso porque, determinadas fitofisionomias tem sua resposta à precipitação e radiação solar conhecida, exemplo disso são as savanas que possuem correlação positiva entre o brotamento de folhas novas e desenvolvimento vegetativo, e a precipitação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram gerados oito anos de dados de Produtividade Primária Bruta (PPB) espacializados para a Amazônia com uma resolução de grade equivalente a 8 km. Neste capítulo será inicialmente apresentada a validação do modelo, considerando dados produzidos por outros trabalhos, dados provenientes das torres do LBA e dados de produção de liteira em comparação com os dados de PPB. Em seguida, será apresentada uma análise da PPB total do bioma e sua correlação com a precipitação e radiação solar incidente, enquanto principais forçantes climáticas. A análise da distribuição espacial da PPB é apresentada em seguida, considerando a série temporal de 2003 a 2010. Posteriormente, uma análise sazonal da PPB é apresentada, avaliando para tanto a forçante fenológica através de fenoregiões (regiões onde o dossel possui o mesmo padrão de desenvolvimento vegetativo, brotamento de folhas novas e senescência). Nessa análise foram produzidos os gradientes das fenofases (início, pico e término do período de crescimento vegetativo). Este capítulo é finalizado com a análise das forçantes climáticas (precipitação, radiação, temperatura, déficit de pressão de vapor) e evapotranspiração na PPB seguindo o padrão espacial das fenoregiões.

5.1 Validação da PPB para a Amazônia

A etapa de validação consistiu em: 1) avaliar as diferenças entre os valores da PPB medida e modelada, assim como comparar a PPB modelada com dados fenológicos de produção de folhas em liteira; 2) avaliar a PPB medida e modelada como função das variáveis de entrada do modelo; 3) analisar a sensibilidade do modelo em relação às variáveis de entrada; e, 4) avaliar a exatidão das variáveis de entrada do modelo.

5.1.1 Validação da PPB modelada

A PPB foi estimada utilizando dois conjuntos de parâmetros, sendo o primeiro baseado no trabalho feito por Aragão (2004) e o segundo foi efetuando ajustes realizados neste trabalho.

Inicialmente foram realizadas estimativas pontuais para ajustar a parametrização do modelo ACM. Esse ajuste foi executado visando a obtenção do menor erro quadrático médio relativo. Nesta etapa, a parametrização foi ajustada utilizando uma série mensal de dados da torre do km 67 (2003), torre do km 83 (2001-2002), torre de Caxiuanã (2002) e torre de Jarú (2002).

A análise de validação foi realizada em duas etapas. A primeira considerou os dados mensais e a segunda considerou os dados anuais. Isso, devido ao fato de que apenas a torre do km 67 da FLONA do Tapajós possuiu dados mensais consistentes em longa série temporal (2003 – 2005). Sendo assim, a validação intra-anual foi realizada apenas para essa localidade. Nesse processo, cada ano foi considerando como um conjunto independente (2004 e 2005).

Na validação mensal, analisando a média e o desvio padrão foi possível observar que, em relação à PPB estimada pela torre, a exatidão aumenta com o aumento da escala temporal (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 Média e desvio padrão da PPB (Mg C ha⁻¹) estimada pela Torre – km 67 (Torre) e modelada, utilizando dados climáticos e índice de área foliar da torre (Md_DadosTorre), dados MODIS parametrizados neste trabalho (Md_MODIS_PF) e dados MODIS parametrizados de acordo com Aragão (2004) (Md_ MODIS_PA), em diferentes escalas temporais.

Fonte dos dados	Mensal	Trimestral	Semestral	Anual
Torre	2,66 ± 0,25	7,98 ± 0,51	15,97 ± 0,32	31,93 ± 0,26
Md_DadosTorre	2,60 ± 0,36	7,80 ± 1,13	15,59 ± 1,08	31,19 ± 0,49
Md_MODIS_PF	2,72 ± 0,62	8,15 ± 1,53	16,30 ± 2,37	32,61 ± 1,20
Md_ MODIS_PA	2,48 ± 0,76	7,44 ±1,78	14,89 ± 1,64	29,78 ± 2,78

Em relação à PPB estimada pela torre, a modelagem utilizando dados da torre assim como parametrizada por Aragão (2004) subestimou os valores da PPB enquanto que a parametrização realizada neste trabalho superestimou a PPB (Tabela 5.2).

Tabela 5.2. Erro médio absoluto das estimativas de PPB (Mg C ha⁻¹) a partir da modelagem utilizando dados climáticos e índice de área foliar da torre (Md_DadosTorre), dados MODIS parametrizados neste trabalho (Md_MODIS_PF) e dados MODIS parametrizados de acordo com Aragão (2004) (Md_ MODIS_PA), em diferentes escalas temporais.

Fonte	Mensal	Trimestral	Semestral	Anual
Md_DadosTorre	-0,06	-0,19	-0,37	-0,74
Md_MODIS_PF	0,06	0,17	0,34	0,68
Md_MODIS_PA	-0,18	-0,54	-1,08	-2,16

A modelagem da PPB utilizando os dados da torre apresentou maior exatidão em relação aos demais. Com exceção da escala temporal semestral, a parametrização realizada neste trabalho melhorou a exatidão da modelagem da PPB utilizando o modelo ACM. A escala temporal anual apresentou resultados mais exatos em relação às demais (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 Erro quadrático médio (EQM) e erro quadrático relativo (EQR) entre os dados de PPB medidos pela Torre – km 67 e modelados utilizando dados climáticos e índice de área foliar da torre (Md_DadosTorre), dados MODIS parametrizados neste trabalho (Md_MODIS_PF) e dados MODIS parametrizados de acordo com Aragão (2004) (Md_ MODIS_PA), em escala temporal mensal (M), trimestral (T), semestral (S) e anual (A).

Erro	EQM (Mg C ha ⁻¹)			1)		EQR	(%)	
Escala Temporal	Μ	Т	S	Α	Μ	Т	S	Α
Md_DadosTorre	0,50	1,28	1,09	0,87	20,01	23,00	6,74	2,71
Md_MODIS_PF	0,70	1,65	2,18	1,02	28,58	30,55	13,74	3,18
Md_MODIS_PA	0,87	1,82	1,83	2,99	34,63	32,19	11,47	9,41

O aumento de exatidão com o aumento da escala temporal pode ser justificado pela diminuição do erro em função da agregação de resíduos com valores positivos e negativos, assim quando os dados são agregados em maior escala, essas discrepâncias são minimizadas (WILLIAMS et al., 2001; ARAGÃO, 2004).

Na validação anual foram considerados dados da torre do km 67 (2004 – 2005), dados estimados em campo (2007) na FLONA do Tapajós (HUTYRA et al., 2007), Manaus e Caxiuanã (MALHI et al., 2009) e dados previamente modelados (2003) por Fisher et al., (2007).

Comparando os valores de PPB anual estimados em campo e os valores modelados utilizando a parametrização otimizada neste trabalho foi possível observar, de forma geral, boa concordância. Os resultados foram subestimados nos sítios da FLONA do Tapajós do km 67 e do km 83 no ano de 2003 e no sítio de Caxiuanã no ano de 2007, sendo este último o mais discrepante (16,21%) (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 Medidas de PPB (Mg C ha ano) observadas em campo (PPB_Obs), modeladas com parametrização otimizada neste trabalho (PPB_MODIS) e erros absoluto e relativo para as							
Eonto	livas de PP	<u>'B.</u>	DDB Obs		E۸	ED(%)	
TOILE	51110	Allo	FFD_003	FFB_IVIODI3	LA	LK(/0)	
Hutyra et al.	TP_km67	2004	31,97 (± 0,4)	32,64	-0,67	2,12	
(2007)	TP_km67	2005	32,17 (± 0,4)	33,79	-1,62	5,02	
	TP_km67	2007	29,30 (± 4,4)	32,27	-2,97	10,13	
Malhi et al. (2009)	Manaus	2007	29,90 (± 4,8)	32,50	-2,60	8,69	
	Caxiuanã	2007	34,40 (± 4,2)	32,01	2,39	6,94	
Fisher et al. (2007)	Caxiuanã	2003	31,20	32,01	-0,81	2,59	

A exatidão global anual da PPB modelada com dados MODIS e GLDAS, medida pelo erro quadrático médio considerando todos os pontos de validação anual foi de 2,04 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ e o erro médio relativo foi de 5,91%. O comportamento intra-anual da PPB modelada diferenciou dos valores estimados pela torre de fluxo (Tapajós-km 67) influenciando no baixo coeficiente de determinação ($r^2 = 0,03$) (Figura 5.1).



Figura 5.1 – Comparação entre a PPB estimada a partir da torre de fluxo da FLONA do Tapajós – km 67, a PPB modelada com parametrização otimizada neste trabalho e precipitação mensal.

Essa discordância no comportamento sazonal da PPB, entre a estimativa de modelos "*big-leaf*" e torres de fluxo, é esperada. A abordagem "*big-leaf*" concebe o dossel agregando processos no sentido "de baixo para cima – *bottom-up*", enquanto que, as torres de fluxo utilizam uma abordagem no sentido "de cima para baixo – *top down*" (HOUGHTON, 2003).

As incertezas de cada abordagem são distintas e os erros aumentam com a magnitude da PPB.

Os erros em medidas de torres de fluxo aumentam dramaticamente com a diminuição da velocidade do vento. Além disso, as medidas de fluxo de CO₂ realizadas próximas ao topo do dossel são governadas por uma camada foliar irregular, o que favorece o aumento dos erros aleatórios. Esse efeito promove o aumento do erro em estimativas realizadas, principalmente, na fenofase correspondente ao período de crescimento (RICHARDSON et al., 2006).

Por outro lado, na abordagem "*big-leaf*" a complexidade conceitual e a propagação dos erros, aumentam com a quantidade de processos agregados na transição de escalas entre processos foliares e de dossel. Nesse sentido, a grande variação da PPB em diferentes extratos de índice de área foliar no dossel contribui significativamente no aumento do erro de estimativas de fluxo de CO_2 (HOLLINGER E RICHARDSON, 2005).

Hollinger e Richardson (2005) compararam o fluxo de CO₂ utilizando as duas abordagens e constataram coincidência de valores apenas durante um limiar pequeno de índice de área foliar.

O histograma dos erros absolutos e relativos (Figura 5.2) mostra que a modelagem utilizando os dados da torre produziu valores mais homogêneos em relação a uma tendência central de superestimativa de 0.11 Mg C ha⁻¹mês⁻¹ tendo sua maior variabilidade entre -5% a 9% . A modelagem utilizando dados MODIS e GLDAS com a parametrização otimizada neste trabalho também produziu resultados homogêneos em torno de uma superestimativa de 0.08 Mg C ha⁻¹ mês⁻¹ e variabilidade entre -13% a 31% com tendência central de 9%.





Apesar da modelagem utilizando dados da torre de fluxo possuir maior exatidão, os resultados modelados a partir de dados MODIS e GLDAS apresentaram comportamento intra-anual semelhante (Figura 5.3a) e alta correlação (r = 0,67 – p<0,001). A comparação entre os erros absolutos também revelou o mesmo comportamento, assim como apresentou tendência de subestimativa no período úmido (janeiro – maio) e superestimativa no período seco (junho – dezembro) (Figura 5.3b).




Hutyra et al. (2007) constataram alta correlação entre a PPB estimada pela torre de fluxo, produção de folhas novas e produção de liteira, o que motivou a realização da mesma comparação. Da mesma forma, o comportamento da PPB foi significativamente correlacionado com a produção de folhas novas (r = 0,46, p<0,001) e folhas em liteira (r = 0,32, p<0,001) (Figura 5.4).



Figura 5.4 - Comparação entre a PPB modelada (Md_MODIS-PF), Folhas em liteira e Folhas novas na localidade da FLONA do Tapajós km67.

A mesma comparação foi realizada para mais três sítios. No sítio de Caxiuanã, a PPB apresentou o pico de produção com uma defasagem de aproximadamente 2 meses em relação ao pico de produção de folhas em liteira (Figura 5.5).



Figura 5.5 - Comparação entre a PPB modelada (Md_MODIS-PF) e folhas em liteira na localidade de Caxiuanã.

Esse comportamento não foi observado nos sítios de Sinop no Mato Grosso e Tambopata no Peru, onde os picos de produção de liteira e PPB coincidiram (Figura 5.6a e 5.6b).



Figura 5.6 - Comparação entre a PPB modelada (Md_MODIS-PF) e folhas em liteira na nos sítios de (a) Sinop-MT e (b) Tambopata – Peru.

5.1.2 Comparação das PPB medida e modelada com as variáveis de entrada do modelo

Com o objetivo de avaliar a influência das variáveis de entrada no erro absoluto da PPB modelada foi calculado o coeficiente de correlação (Tabela 5.5). Foi utilizada a PPB-modelada com os dados da torre de fluxo visando avaliar apenas o desempenho do modelo. Foi observada correlação positiva e significativa entre o erro absoluto da PPB e o índice de área foliar e radiação, assim como, correlação negativa com a condutância estomática. O carbono atmosférico não apresentou correlação significativa com o erro absoluto assim como, com as demais variáveis.

Tabela 5.5 Coeficiente de correlação de Pearson entre o índice de área foliar (LAI), temperatura máxima (Temp_max), Radiação (Rad), carbono atmosférico (Ca), condutância estomática (Gs), erro absoluto (EA), produtividade primária bruta modelada (PPB-mod) e observada (PPB-obs). Número amostral (n = 49).

	LAI	Temp_max	Rad	Са	Gs	PPB-mod	PPB-obs
Temp_max	0,18 p = 0,33						
Radiação	0,41 p < 0,05	0,46 p = 0,27					
Са	-0,21 p = 0,59	-0,16 p = 0,07	-0,32 p < 0,05				
Gs	-0,11 p = 0,06	-0,53 p < 0,05	-0,62 p < 0,05	0,15 p = 0,14			
PPB-mod	0,78 p < 0,05	0,34 p < 0,05	0,83 p < 0,05	-0,26 p = 0,09	-0,42 p < 0,05		
PPB-obs	-0,66 p < 0,05	-0,02 p = 0,97	-0,08 p = 0,76	-0,02 p = 0,78	-0,13 p = 0,05	-0,39 p < 0,05	
EA	0,87 p < 0,05	0,22 p = 0,28	0,64 p < 0,05	-0,23 p = 0,14	-0,24 p < 0,05	0,89 p < 0,05	-0,72 p < 0,05

A comparação gráfica mostrou que o pico dos valores do erro absoluto ocorreu no início da estação seca, decaindo até meados do período chuvoso. A PPBmodelada, o LAI e a Radiação apresentaram o pico de maior valor no início do período seco, ao contrário da condutância estomática. A PPB-observada, não mostrou um comportamento sazonal definido, apresentando picos no período seco e chuvoso (Figura 5.7). A PPB-modelada divergiu da PPB-observada, sugerindo que a radiação solar incidente, ou disponibilidade de luz, atua como forçante primária na captação de carbono atmosférico (PPB) (POULTER e CRAMER, 2009). Porém, essa interpretação é possível apenas em condições onde o solo possui a capacidade de armazenamento de água que suporte os processos hidráulicos no período seco (GRANT et al., 2009).



Figura 5.7 Comparação entre a PPB observada e modelada com o Erro Absoluto (a), LAI (b), radiação (c) e condutância estomática (d).

5.1.3 Validação do modelo de condutância estomática

O modelo de condutância estomática utilizado foi derivado a partir da inversão do modelo de Penman-Monteith. Para a sua validação foram utilizados trabalhos coletados na literatura executados em oito sítios de observação na Amazônia. Como os dados não foram disponibilizados em série temporal nos trabalhos coletados, a análise foi realizada observando o comportamento sazonal em relação ao déficit de pressão de vapor e à radiação incidente.

Avaliando a relação entre condutância estomática e déficit de pressão de vapor foi possível perceber que, com exceção do sítio na Reserva Biológica do Cuieiras – AM, todos os sítios avaliados apresentaram correlação negativa (Figura 5.8).





Figura 5.8 - Análise de regressão entre a Condutância Estomática (Gs) e o Déficit de Pressão de Vapor: (a) Reserva Duke – AM (ROBERTS et al., 1990); (b) Igarapé-Açu – PA (SOMMER et al., 2002); (c) Reserva Biológica do Cuieiras – AM (HARRIS et al., 2004); (d) FLONA de Caxiuanã – PA (CRASWELL et al., 2002); (e) Reserva Duke – AM (DÜNISH et al., 2002); (f) FLONA do Tapajós – PA (DA ROCHA et al., 2004); (h) Guiana Francesa (BONAL et al., 2000); e (g) Sinop – MT (VOURTILIS et al., 2008).

Nos sítios da FLONA de Caxiuanã e da Reserva Biológica do Cuieiras, os resultados modelados contrapõem os estudos de Craswell et al. (2002) e Harris et al. (2004), respectivamente. No sítio da Reserva Biológica do Cuieiras – AM, onde a relação entre condutância estomática e déficit de pressão de vapor foi positiva, Harris et al. (2004) mostram em campo que, nesse caso em particular, o solo possui alta capacidade de armazenamento de água mesmo no período seco. Consequentemente, a condutância estomática é pouco alterada no período seco, o que pode explicar a relação positiva com o déficit de pressão de vapor. Na FLONA de Caxiuanã, Carswell et al. (2002) encontraram fraca e negativa correlação entre a condutância estomática e o déficit de pressão de vapor, nas escalas temporal horária e diária.

Em seis dos oitos sítios de validação (75%), os resultados estão em acordo com os estudos desenvolvidos previamente em campo. Nesses sítios, os resultados mostram que a condutância estomática aumenta com a umidade e diminui com o aumento da radiação e do déficit de pressão de vapor (Tabela 5.6).

pressão de vapor em oito sítios de validação na Amazônia.					
Sítio	Gs x Rad	Gs x Umid	Gs x DPV		
Manaus – AM (Reserva Florestal Duke)	-0.53	0.55	-0.76		
(ROBERTS et al., 1990)	p < 0,05	p < 0,05	p < 0,05		
Igarapé-Açu (Sul do Pará)	-0.32	0.65	-0.78		
(SOMMER et al., 2002)	p < 0,05	p < 0,05	p < 0,05		
Manaus – AM (Reserva Biológica de Cuieiras)	0.36	-0.48	0.46		
(HARRIS et al., 2004)	p < 0,05	p < 0,05	p < 0,05		
Floresta Nacional de Caxiuanã	-0.70	0.70	-0.74		
(CARSWELL et al., 2002)	p < 0,05	p < 0,05	p < 0,05		
Manaus (Estação de pesquisa – EMBRAPA)	-0.35	0.53	-0.45		
(DÜNISCH e MORAIS, 2002)	p < 0,05	p < 0,05	p < 0,05		
Floresta Nacional do Tapajós – km-83	-0.66	0.82	-0.85		
(DA ROCHA et al., 2004)	p < 0,05	p < 0,05	p < 0,05		
Sinop – MT	-0.50	0.60	-0.63		
(VOURLITIS et al., 2008)	p < 0,05	p < 0,05	p < 0,05		
CIRAD-forêt (Guyana Francesa)	-0.58	0.35	-0.74		
(BONAL et al., 2006)	p < 0,05	p < 0,05	p < 0,05		

Tabela 5.6. Coeficientes de correlação de Pearson entre a condutância estomática modelada, radiação, umidade específica e déficit de pressão de vapor em oito sítios de validação na Amazônia.

Apesar da concordância da condutância estomática modelada com as variáveis climáticas, a análise de regressão entre a condutância modelada com dados climáticos da base global GLDAS e modelada com dados da torre de fluxo mostra significativa porém baixa correlação. Nesse sentido, uma provável fonte de incerteza na estimativa da condutância é a baixa exatidão dos dados climáticos do GLDAS (Figura 5.9).



Figura 5.9 - Comparação entre a condutância estomática estimada utilizando dados da torre de fluxo da FLONA do Tapajós e a modelada utilizando dados climáticos da base global GLDAS.

5.1.4 Exatidão dos dados climáticos

A análise de exatidão dos dados climáticos provenientes da base global GLDAS foi realizada pelo cálculo do Erro Quadrático Médio (EQM) e Relativo (EQR) e análise de regressão linear em relação aos dados provenientes de torres de fluxo. A série temporal dos dados da torre da FLONA do Tapajós foi utilizada para essa análise, devido ser a maior e mais consistente dentre as demais (Tabela 5.7). Dentre as variáveis climáticas, a radiação, calor latente e a umidade, apresentaram maior EQR, sendo o calor latente a variável climática de maior EQMR (36,35%).

Tabela 5.7 Médias, Erro Quadrático Médio (EQM) e Relativo (EQMR) entre os dados climáticos provenientes da torre de fluxo da FLONA do Tapajós e GLDAS.

Variávaja Biofíciana	EQM		Médias	
			Torre	GLDAS
Radiação	91.50	32.76	279.26	192.77
Calor Latente	5.39	36.35	14.82	10.07
Temperatura	1.78	6.75	26.40	27.84
Pressão	2.48	2.55	97.52	100.01
Umidade	12.52	15.07	83.10	77.33
CO ₂ Atmosférico	7.83	2.05	382.65	374.99

A análise de regressão entre as medidas da torre de fluxo e a base global GLDAS mostrou que a umidade relativa, CO_2 e a pressão atmosférica apresentaram estimativas mais precisas, incluindo o comportamento sazonal. Entretanto, as estimativas provenientes da base global GLDAS apresentaram maior amplitude em relação aos dados medidos pela torre de fluxo (Figura 5.10).



Figura 5.10 - Comparação entre os dados climáticos de torres de fluxo e das bases globais de dados climáticos GLDAS/AIRS. Gráficos de regressão (coluna 1) e comparação mensal (coluna 2) da Radiação (a), Calor Latente (b), Temperatura (c), Pressão Atmosférica (d), Umidade Relativa (e) e CO₂ atmosférico (f).



Figura 5.11 - (Continuação) Comparação entre os dados climáticos de torres de fluxo e das bases globais de dados climáticos GLDAS/AIRS. Gráficos de regressão (coluna1) e comparação mensal (Ccoluna 2) da Radiação (a), Calor Latente (b), Temperatura (c), Pressão Atmosférica (d), Umidade Relativa (e) e (f) CO₂ atmosférico.

Dentre as variáveis secundárias necessárias à estimativa da condutância estomática, a energia disponível para evapotranspiração foi a que apresentou maior EQMR (Tabela 5.8), possívelmente devido à forte dependência do calor latente. Sendo esta a variável que possui maior imprecisão.

Tabela 5.8 Médias, Erro Quadrático Médio (EQM) e Relativo (EQMR) entre os dados climáticos provenientes da torre de fluxo da FLONA do Tapajós e GLDAS, sendo estas as variáveis geradas a partir dos dados GLDAS e NDVI.

Variávaja Biafísiasa		EOD	Médias	
Variavers Diolisicas		EQR	Torre	GLDAS
Energia disponível para evapotranspiração	44.18	27.82	158.78	132.66
Constante Psicométrica	0.002	2.65	0.07	0.07
Densidade do Ar	0.02	1.60	1.13	1.15
Inclinação da curva de pressão de saturação	0.02	10.59	0.20	0.22

5.1.5 Análise de sensibilidade do modelo

Esta etapa teve o objetivo de avaliar o quanto a PPB é sensível às variáveis necessárias a execução do modelo ACM.

Em relação ao Índice de Área Foliar (LAI), a PPB modelada apresentou um incremento de 68% com o LAI variando de 1 para 2, 26% variando de 2 para 3 e 13% variando de 3 para 4. A partir de um LAI 4 o modelo passa a ter uma sensibilidade onde a PPB varia menos de 10%.



Figura 5.12 - Incremento percentual (a) e real (b) da PPB em resposta à variação do Índice de Área Foliar.

Entre as variáveis climáticas (Figura 5.13), a temperatura e o CO₂ atmosférico apresentaram menor sensibilidade na variação da PPB. A radiação solar incidente a partir de 30MJ influencia a PPB em menos de 10%. A condutância estomática tem nos valores acima de 5 mm^{-s} o limite onde a variação é maior que 10%.





5.2 PPB em escala espacial de bioma

5.2.1 Análise em escala temporal anual

No período de 2003 a 2010 e considerando a extensão total do bioma, a PPB anual média foi de 6,93 (\pm 0,18) Pg C ano⁻¹, a precipitação média foi 16,5 (\pm 0,67) trilhões de metros cúbicos e a radiação solar incidente foi 20,79 (\pm 0,60) TJ (Tabela 5.9).

	incidente (R), considerando a área total da Amazônia.				
Ano	PPB (PgC ano ⁻¹)	Precipitação (trilhões de m-3)	R (TJ)		
2003	6,68	16,03	20,00		
2004	6,76	15,75	20,01		
2005	7,00	16,79	20,85		
2006	6,68	17,41	19,96		
2007	6,89	16,33	20,78		
2008	7,11	17,30	21,58		
2009	7,34	17,18	21,93		
2010	6,98	15,22	21,22		
Média	6,93	16,50	20,79		
Desvio Padrão	0,18	0,67	0,60		

Tabela 5.9 Produtividade Primária Bruta (PPB), precipitação e radiação solar incidente (R), considerando a área total da Amazônia.

Ao longo dessa série histórica estudada a variação entre a máxima e mínima PPB modelada foi de 8,99%. A variação entre os anos de 2008 e 2010 foi um declínio de 4,90% e Potter et al. (2011) mostram um declínio de 7% na Produtividade Primária Líquida (PPL) nesse mesmo período. Zhao e Running (2010) mostram uma variação de 5,83% na PPL, entre os anos de 2000 a 2009, com a mínima em 2005, coincidindo com uma seca prolongada.

Essa dependência da PPB em relação à precipitação, ainda em escala temporal anual, foi confirmada pela análise de correlação entre a PBB, a precipitação e radiação solar, confirmando a correlação positiva entre essas variáveis (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 Coeficientes de correlação de Pearson para as correlações entre Produtividade Primária Bruta total anual (PPB), Precipitação total anual, Radiação Solar Incidente total anual (R). Neste caso o número amostral foi igual a oito (número de anos estudados).

PPB x Precipitação	PPB x R	Precipitação x R
0,32	0,97	0,25
p = 0,44	p < 0,001	p = 0,54

Esses resultados mostram que a PPB é controlada, em escala anual, não apenas pela radiação, mas, também pela precipitação (NEMANI et al., 2003). Apesar disso, o gráfico da PPB, precipitação e radiação solar incidente mostram melhor ajuste da PPB à radiação solar incidente (Figura 5.14). Em 2006, mesmo com alta precipitação, o declínio da radiação forçou a diminuição da PPB. Em seguida, de 2007 a 2010, a PPB, precipitação e radiação tiveram o mesmo comportamento.



Figura 5.14 - Dados anuais em escala de bioma referentes a relação entre PPB e (a) precipitação e (b) radiação solar incidente.

No período estudado ocorreram dois eventos prolongados de seca, em 2005 e 2010, sendo a última a mais severa (LEWIS et al., 2011)(Figura 5.15). Esses eventos também afetaram regiões distintas. Em 2005, a região noroeste foi mais afetada, enquanto que em 2010 toda região norte foi afetada com rigor.



Figura 5.15 - Secas prolongadas de 2005 (coluna 1) e 2010 (coluna 2): (a e b) Anomalia padronizada e (c e d) déficit hídrico máximo acumulativo. Adaptado de Lewis et al. (2011).

Avaliando as relações entre a PPB, a precipitação e a radiação solar, assim como esses dois eventos de seca prolongada, foi possível perceber que a PPB, em escala de bioma, foi mais afetada na seca de 2010.

5.2.2 Análise em escala temporal mensal

Ao longo dos oito anos estudados (2003-2010), a PPB mensal média da Amazônia apresentou o pico máximo da PPB ocorrendo em agosto em 6 anos, em 2007 ocorreu em setembro e em 2010 ocorreu em julho. O mês de ocorrência da mínima PPB em 2003 foi em março, de 2004 a 2007 em fevereiro, em 2008 e 2009 ocorreu em dezembro e em 2010 ocorreu em novembro. Os meses de ocorrência da PPB máxima coincidiram com o período

mais seco e com maior disponibilidade de radiação solar incidente, enquanto que os meses de ocorrência da mínima PPB ocorreram no período mais chuvoso, com maior ocorrência de nuvens e, consequentemente, menor disponibilidade de radiação (Figura 5.16).



Figura 5.16 - Série temporal da Produtividade Primária Bruta e precipitação (a) e Produtividade Primária Bruta e radiação solar incidente (b).

Também na escala temporal mensal, a correlação entre a radiação solar e precipitação foi negativa, assim como, também a correlação entre precipitação e radiação (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 Coeficientes de correlação de Pearson para as correlações entre Produtividade Primária Bruta total (PPB), Precipitação total e Radiação Solar Incidente total (R) em escala temporal mensal. Neste caso o número amostral foi 96 (meses estudados).

PPB x Precipitação	PPB x R	Precipitação x R
-0,43	0,82	-0,17
p < 0,001	p < 0,001	p = 0,095

Esses resultados evidenciam que a relação entre a PPB, precipitação e radiação solar incidente é diferente de acordo com a escala temporal considerada. Além disso, mostram que em escala temporal mensal e considerando a extensão total do bioma, a PPB é controlada principalmente pela radiação. No entanto, estudos prévios mostram que a disponibilidade de água no solo é um condicionante fundamental ao desenvolvimento vegetal florestal (HARRIS et al., 2004), não possui comportamento idêntico à precipitação (HODNETT et al., 1995) e possui alta variabilidade espacial ao longo da paisagem (QUESADA et al., 2009). Neste estudo, essa capacidade de água no solo não foi avaliada, por isso não é possível afirmar que a radiação é uma forçante primária única.

5.3 Distribuição espacial da PPB na Amazônia

A distribuição espacial da PPB anual média em termos de magnitude foi gerada a partir da média dos dados anuais (2003 – 2010) e representada em uma paleta de cores variando a partir do valor mínimo (25 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹) até o máximo (60 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹) (Figura 5.17a). Foi possível constatar que as regiões noroeste e nordeste possuem menor PPB. As regiões de savana apresentaram os valores mais baixos de PPB, sendo elas a savana de Roraima, norte da Bolívia e em parte da Ilha de Marajó. Assim também a região andina. O mapa do desvio padrão da média anual da PPB (Figura 5.17b) mostrou que as regiões oeste e o extremo leste da Amazônia apresentaram maior variação.



Figura 5.17 - PPB média anual de 2003 a 2010 (a) e desvio padrão da média (b).

A técnica de Mínima Fração de Ruído foi executada na série temporal em estudo, visando captar a máxima variabilidade espacial da PPB (Figura 5.18). O mapa resultante favoreceu a melhor observação da distribuição espacial da PPB.



Figura 5.18 - Imagem resultante da técnica Mínima Fração de Ruído, executada em escala anual (2003-2010).

5.3.1 PPB anual e gradientes estruturais do dossel florestal

Avaliando a distribuição espacial dos gradientes de área basal, densidade de madeira e biomassa acima do solo (Figura 5.19), como propriedades estruturais do dossel florestal (MALHI et al., 2006), percebemos visualmente a correlação espacial inversa entre os fatores estruturais e a PPB. Em síntese, as regiões de baixa biomassa possuem maior PPB.



Figura 5.19 - Fatores estruturais do dossel florestal da Amazônia: (a) Área Basal, (b) Densidade de Madeira e (c) Biomassa Acima do Solo.

Com a finalidade de confirmar essa análise visual foram utilizados os dados pontuais dos fatores estruturais distribuídos na Amazônia, como mostra a Figura 5.20.



Figura 5.20 - Localização dos sítios de coleta de dados estruturais do dossel florestal de biomassa acima do solo e área basal (MALHI et al., 2006) (a) e produtividade de madeira (MALHI et al., 2004) (b).

A análise de correlação foi realizada entre as variáveis estruturais e a PPB de acordo com os pontos acima citados e localizados (Tabela 5.12). Essa análise confirmou que a PBB possui correlação inversa com a biomassa, área basal, taxas de ciclagem e crescimento e produtividade de madeira. A PPB também apresentou correlação negativa com a elevação. No entanto, apresentou correlação positiva com o tempo de residência da biomassa e comprimento do período seco.

Referência	Variável	r	valor-p	n
	Elevação	-0.41	p < 0,001	
Malhi et al., 2006	Área Basal	-0.18	p = 0,03	146
	Biomassa	-0.10	p = 0,21	140
	Comprimento do Período Seco	0.33	p < 0,001	
	Taxa de ciclagem de madeira	-0.14	p = 0,07	
	Taxa de crescimento da área basal	-0.45	p < 0,001	
	Crescimento de tronco	-0.53	p < 0,001	
Malhi et al., 2004	Crescimento de tronco	-0.48	p < 0,001	50
	Crescimento da área basal	-0,53	p < 0,001	
	Produtividade de madeira	-0.49	p < 0,001	
	Tempo de residência da biomassa	0.13	p = 0,35	

Tabela 5.12	Coeficiente de correlação (r) entre a PPB e as variáveis estruturais
	do dossel florestal avaliadas nos trabalhos de Malhi et al. (2006) e
	Malhi et al. (2004).

A PPB está associada à capacidade fotossintética do dossel florestal e por sua vez aos índices biofísicos. Estudos prévios mostram que esses índices são

baixos em regiões de alta produtividade de biomassa e madeira (MALHI et al., 2004). Essa hipótese foi sustentada pelos resultados obtidos na análise acima citada.

A correlação entre a PPB e produção de liteira também foi avaliada como variável biofísica do dossel. Foram utilizados dados reunidos por Chave et al. (2009), distribuídos na Amazônia de acordo com a Figura 5.21.



Figura 5.21 - Localização dos sítios de coleta de dados de liteira reunidos por Chave et al. (2009).

Além das variáveis relacionadas à produção de liteira, Chave et al. (2009) também avaliaram a relação C:N e C:P da liteira coletada, os índices de sazonalidade da produção de liteira (ISL) e da precipitação (ISP) e comprimento do período seco (CPS). Esses índices de sazonalidade medem a uniformidade de ocorrência da produção ao longo do ano, sendo que, quanto mais próximo de 0 significa um padrão uniforme ao longo do ano e próximo de 1 significa a ocorrência predominante em 1 mês. Nesse trabalho, Chave et al. (2009) não constataram correlação entre produção de liteira e precipitação anual mas, observaram uma leve sazonalidade da produção de liteira, independente da precipitação total anual e do tipo de solo. No entanto, a correlação entre a sazonalidade da produção de liteira e da precipitação foi positiva, ou seja, quanto maior a sazonalidade da precipitação mais sazonal é a produção de liteira. Além dessas relações, a correlação entre a produção total de liteira e a fertilidade do solo foi positiva.

A correlação entre a PPB e a sazonalidade da produção de liteira e da precipitação foi positiva (Tabela 5.13). Chave et al. (2010) mostram que a sazonalidade da precipitação está correlacionada com a sazonalidade da produção de liteira. Nesse sentido, os resultados alcançados neste trabalho sugerem que a PPB é maior em regiões de maior sazonalidade no desenvolvimento vegetal (ISL e ISP) e no clima (CPS). Avaliando o mapa de distribuição da PPB é possível perceber que a parte norte da Amazônia possui maior PPB, sendo também a parte mais seca e com maior dinâmica climática.

Tabela 5.13 Coeficientes de correlação de Pearson, valor-p e número amostral (n) entre a PPB e as variáveis relacionadas à produção de liteira estudadas por Chave et al. (2009).

Variável	r	valor-p	n
Produção total de liteira	0,40	p = 0,001	60
Relação C:N	-0,74	p < 0,001	37
Relação N:P	-0,50	p = 0,005	29
Índice de Sazonalidade (liteira) (ISL)	0,22	p = 0,12	47
Índice de Sazonalidade (precipitação) (ISP)	0,19	p = 0,15	18
Comprimento do Período Seco (CPS)	0,76	p < 0,001	76

A relação entre Produtividade Primária e a produção de liteira tem sido amplamente discutida. Clark et al. (2001) relatam essa correlação como sendo fraca, no entanto, essas estimativas foram realizadas de forma indireta. Por outro lado, Aragão et al. (2009) constata uma forte relação, provendo uma análise que suporta o modelo de Bray e Gorham (1964) sugerindo que Produtividade Primária Líquida corresponde a, aproximadamente, três vezes a produção total de liteira. Nesse sentido, a correlação entre a PPB e a produção de liteira apresentada neste trabalho está de acordo com os resultados em campo (ARAGÃO et al., 2009).

A correlação negativa apresentada neste trabalho entre a PPB e as relações C:N e N:P indica que a PPB diminui com a diminuição de nitrogênio e fósforo foliares.

Em relação ao N foliar, Nardoto et al. (2008) afirmam que, em escala regional, a disponibilidade de N foliar diminui com o aumento da precipitação. Na Amazônia, a parte norte e nordeste apresentaram menor índice pluviométrico e maior comprimento do período seco, consequentemente é a parte mais seca. Seguindo os resultados obtidos por Nardoto et al. (2008), essa região possui maiores teores de N foliar no dossel florestal, porém, possui também os solos mais inférteis (TER STEEG et al., 2006; QUESADA et al., 2009). O mapa da PPB apresentado neste trabalho está alinhado com esses estudos uma vez que, apresenta a PPB positivamente correlacionada com o N foliar e com maiores valores na região de menor precipitação (norte e nordeste).

Em relação ao P foliar, Mercado et al. (2011) relatam altos teores na região ocidental (Equador e Peru) e valores baixos na região oriental (QUESADA et al., 2009). O P foliar explicou mais as variações do crescimento da área basal e produção de madeira do que o N foliar.

Avaliando a distribuição espacial da PPB na Amazônia em relação ao gradiente de fertilidade (oeste-leste) é possível constatar que na região noroeste, mais fértil, a PPB foi baixa. Essa região, além de alta fertilidade apresenta o maior volume de precipitação. Nesse caso, outro fator ambiental poderia estar limitando a PPB. Porém, na região sudoeste, onde a fertilidade também é alta a PPB foi alta. Esses resultados mostram que a fertilidade na parte oeste da Amazônia não é fator limitante da PPB.

Silva et al. (2013) mostraram que na região noroeste o período de maior disponibilidade de radiação (período seco) ocorre durante apenas três meses, no qual ocorre também o início do período de crescimento.

Sendo assim, a disponibilidade de radiação também poderia limitar a PPB nessa região. No entanto, a alta resposta da PPB à radiação pode estar associada ao quadro conceitual do modelo ACM.

Estudos têm apontado alta relação entre os teores de nutrientes nas folhas e nutrientes disponíveis no solo como fatores que explicam a variabilidade espacial da produtividade primária e biomassa na Amazônia (ARAGÃO et al., 2009; MERCADO et al., 2011; FYLLAS et al., 2009). Dessa forma, árvores com alto teor de nutriente nas folhas estariam distribuídas em solos com altos teores de nutrientes (FYLLAS et al., 2012; VITOUSEK, 1984).

73

Considerando os resultados acima citados, neste ponto, apresentamos uma abordagem na qual as forçantes ambientais (vegetação, solo e clima) da PPB interagem distintamente em diferentes regiões na Amazônia.

Na região noroeste a fertilidade dos solos e o déficit hídrico não são fatores limitantes ao desenvolvimento vegetal, nesse caso a radiação solar incidente atua como principal forçante da PPB.

A região sudoeste apresenta alta fertilidade e sazonalidade climática reúne condições favoráveis para altos valores de PPB, sendo o déficit hídrico a principal forçante do desenvolvimento vegetal. Na parte central da Amazônia, a fertilidade dos solos é baixa, a sazonalidade climática é alta, assim como a produção de liteira e a PPB, tendo ainda as leguminosas como principal família predominante. Nesse caso a vegetação estrategicamente estaria investindo em massa foliar e retendo nutrientes no dossel. Por isso, essas regiões apresentaram também uma taxa de reciclagem menor. As plantas que ocorrem nessas regiões devem também ser adaptadas para suprir fundamentalmente a escassez do nitrogênio, fisiologicamente essencial. Devem possuir raízes pivotantes que penetrem em grande profundidade no solo e assim reduza o efeito de déficit hídrico no período seco, pois essas regiões são mais secas e de maior sazonalidade no desenvolvimento vegetal e no clima.

Nas regiões de borda do extremo sul e sudeste, a fertilidade é baixa, a sazonalidade da precipitação é alta, assim como a precipitação anual é mais baixa. Nessa região as leguminosas ocorrem com menos frequência, o que pode limitar a PPB.

Na região das Guianas, comparando o mapa de precipitação e comprimento do período seco de Sombroek (2001) (Figuras 3.4 e 3.5) com o mapa de PPB (5.18) é possível perceber que os menores valores de PPB ocorrem na parte mais seca e com maior comprimento do período seco, apesar da alta predominância de leguminosas (TER STEEG et al., 2006).

Essa abordagem está fundamentada, essencialmente, nos trabalhos de Vitousek (1984), Nardoto et al. (2008), Bertiller et al. (2006), ter Steeg et al.

74

(2006), Hedin et al. (2009), Chave et al. (2006), Phillips et al. (2004) e Malhi et al. (2004).

Vitousek (1984) apresenta uma abordagem na qual sugere que a vegetação investe preferencialmente ou em massa foliar ou nutrientes, sendo essa relação mediada pelo Uso Eficiente dos Nutrientes (UEN). Em regiões de menor disponibilidade de nutriente no solo, o UEN é maior, a produção de massa foliar é maior e a exportação desse nutriente via liteira é menor. Ou seja, considerando o sistema solo–planta, o UEN favorece a manutenção do nutriente na parte planta por mais tempo.

Hedin et al. (2009) mostram que: (a) pelo gradiente de fertilidade do solo (Figura 5.22a) a região sudeste-leste é menos fértil; (b) quanto maior a produção de liteira, menor a quantidade de N e P na liteira (Figura 5.22b); (c) o fósforo foliar diminui em baixas latitude, tanto ao norte quanto ao sul (Figura 5.22c); e (d) a limitação de nutrientes é maior em depósitos sedimentares e a limitação de fósforo em regiões de platô (mais antigas) (Figura 5.22d).



Figura 5.22 - Adaptação de Hedin et al. (2009) do gradiente de fertilidade dos solos da Amazônia (I e II: solos inférteis e mais intemperizados; III: solos mais férteis e menos intemperizados; IV: solos menos férteis formados por depósitos sedimentares) (a), razão entre a massa seca e o nitrogênio e

fósforo foliares em liteira (b), razão entre nitrogênio e fósforo foliares (c) e padrões de perdas hidrológicas de N seguido pela limitação de nutrientes em uma floresta tropical do Havaí, em um gradiente de desenvolvimento do substrato (d).

Por isso, quanto maior a produção de liteira menor a exportação dos nutrientes, predominantemente, em solos menos férteis.

Considerando a resposta da vegetação às variações ambientais, no dossel florestal da Amazônia, o nitrogênio foliar decai com o aumento da precipitação anual (NARDOTO et al., 2008). Essas regiões seriam então mais úmidas e férteis, o que favoreceria a exportação de nitrogênio sem o comprometimento fisiológico (VITOUSEK 1984). Nessas regiões mais úmidas (noroeste da Amazônia) a vegetação investe estrategicamente na alocação de carbono (BERTILLER et al., 2006) o que favorece altas taxas de crescimento e ciclagem de nutrientes, compensando assim, altas taxas de mortalidade (PHILLIPS et al., 2004).

Estudos que abordam as relações entre a produtividade primária e variáveis estruturais com a fertilidade do solo apontam na direção da correlação positiva entre a fertilidade do solo, produção de liteira e a produtividade primária líquida (ARAGÃO et al., 2009; MALHI et al., 2009; MERCADO et al., 2011; FYLLAS et al., 2009; TER STEEG et al., 2006; CHAVE et al., 2006). Nesse sentido, o presente estudo propõe que essa correlação depende da escala espacial e da região em análise.

Nesse caso, um aspecto de complementaridade entre a PPB, produção de liteira, as relações C:N, N:P e a dinâmica climática é o caráter adaptativo da distribuição das espécies, principalmente leguminosas, de acordo com as características do ambiente. Ter Steeg et al. (2006) mostram a dominância das leguminosas na parte nordeste e centro-leste da Amazônia, predominantemente em solos menos férteis. Justifica essa dominância não apenas pela capacidade de simbiose com organismos fixadores de nitrogênio, mas, pela produção de alta produção de sementes.

Além desse aspecto, poderia ser especulado também outras questões ecofisiológicas como o sistema radicular profundo, o que proporcionaria captação hídrica em períodos secos mais prolongados e um sistema C3 de fixação de carbono adaptado à regiões onde a radiação solar não é um fator limitante. Nesta última característica, é importante notar a limitação das leguminosas em relação a maior nebulosidade ao longo do ano em consequência do maior índice pluviométrico, sendo essa, uma das possíveis desvantagens de sua ocorrência predominante na região oeste.

5.3.2 Série temporal anual da PPB anual

Avaliando a série temporal anual da PPB foi possível perceber que a região noroeste da Amazônia apresentou valores baixos em maior extensão nos anos de 2003 e 2004 (Figura 5.22). Valores baixos também foram observados na região da bacia das Guianas, na fronteira entre o Brasil, Guiana Francesa e Suriname. Nessa região, apenas em 2004 e 2006 foram observados valores mais altos. As savanas de Roraima, Venezuela e Bolívia igualmente apresentaram valores baixos ao longo de toda série temporal.





Figura 5.22 - Produtividade Primária Bruta anual correspondente à série histórica: (a) 2003, (b) 2004, (c) 2005, (d) 2006, (e) 2007, (f) 2008, (g) 2009 e (h) 2010.

A PPB apresentou distribuição bem caracterizada em regiões distintas. Os extremos nordeste, noroeste, sudeste, assim como as savanas de Roraima, Venezuela e Bolívia apresentaram valores mais baixos ao longo da série histórica. A região noroeste apresentou valores proeminentemente baixos nos anos de 2003 e 2004. A região nordeste, na Bacia das Guianas apresentou valores baixos nos anos de 2003, 2006, 2007, 2008 e 2009. A região sudeste apresentou valores baixos ao longo de toda série histórica, mas principalmente, nos anos de 2003, 2007 e 2009.

5.4 Sazonalidade da PPB

Avaliando a distribuição espacial da PPB na Amazônia pela magnitude foi possível perceber as áreas de maior produtividade, assim como, a correlação com a precipitação e a radiação solar incidente em escala de bioma. Porém,

como o clima apresenta alta variabilidade ao logo da extensão do bioma, e, as relações entre PPB, precipitação e radiação incidente foram diferentes em escala mensal e anual, a avaliação do comportamento sazonal foi realizada através da delimitação de regiões homogêneas tomando como parâmetro a fenologia florestal.

Essa decisão foi fundamentada no entendimento da fenologia como uma "*proxy*" para as interações entre solo, planta e atmosfera. Nesse sentido, a interação desse conjunto de fatores ambientais determinam as fenofases (lançamento e desenvolvimento de folhas novas, floração, frutificação, senescência, entre outras), e consequentemente as trocas gasosas entre o dossel florestal e atmosfera.

5.4.1 Mapeamento das fenoregiões

O resultado da metodologia desenvolvida para o mapeamento das fenoregiões da Amazônia foi a identificação de 26 fenoregiões (Figura 5.23).



Figura 5.23 - Fenoregiões presentes na Amazônia.

Estudos prévios utilizando abordagens de análise de grupamentos e classificação supervisionada utilizando dados multisensores (SAATCHI et al., 2000; EVA et al., 2004) não incorporam a natureza cíclica da fenologia florestal proveniente de dados em série temporal. Consequentemente, representam o dossel florestal da Amazônia como uma floresta tropical úmida "sempre verde", homogênea na maior parte de sua extensão.

A metodologia desenvolvida neste trabalho permitiu capturar sinais (espectros fenológicos) de fitofisionomias agrupadas anteriormente em uma única categoria, por exemplo, florestas altas com dossel irregular e florestas altas mistas de dossel aberto e florestas de clima savanico, na Bacia das Guianas (SOMBROEK et al., 2011; GOND et al., 2011). A consistência da identificação pode também ser constatada ao considerar que a metodologia utilizada foi aplicada "pixel por pixel", e nesse caso, como as classes foram significativamente extensas e diferenciadas, no caso das savanas de Roraima e Venezuela em regiões de alta precipitação, pode ser observada a coerência das classes mapeadas.

A correlação das fenoregiões com os tipos vegetacionais amazônicos foi realizada utilizando o mapa de vegetação da Amazônia brasileira produzido pelo IBGE e trabalhos realizados em outros países que possuem parte da Amazônia em seu território. Essa comparação foi limitada pelo fato de não existir um mapa de vegetação que abranja toda extensão do bioma. A Tabela 5.12 mostra a fitofisionomia característica de cada fenoregião.

Das fenoregiões apresentadas, 30% (oito) apresentaram o pico do NDVI no período chuvoso e 26% (sete) apresentaram o pico do NDVI no primeiro mês do período seco. Esse resultado mostra que a influência atmosférica, nuvens e aerossóis, foi minimizada devido o incremento do NDVI mesmo no período chuvoso. Kobayashi e Dye (2005) mostram que na região central da Amazônia o efeito dos aerossóis é menor, sendo a presença de nuvens o principal fator que determina a sazonalidade desse índice. Além disso, sugere cautela na utilização de composições de 16 dias com o máximo valor do pixel, mostrando a complexidade da extrapolação de estudos em ampla escala utilizando NDVI-AVHRR.

Fenoregião	Tipo Vegetacional	Referência	Período Seco	Pico máximo do NDVI	Vriação (%) (Max –Min)
1	Savana de Roraima	IBGE (2004)	out-mar	ago	31.71
2	Floresta densa com lianas em terras baixas	IBGE (2004)	jun-set	jul	25.19
3	Floresta densa alluvial em terras baixas	IBGE (2004)	ago-nov	ago	21.72
4	Floresta densa em terras baixas	IBGE (2004)	jul-out	jul	36.33
5	Floresta densa húmida em terras baixas	Gregoire et al. (1998)	jan-mar	set	20.11
6	Savanna	Panagos et al. (2011)	nov-abr	set	22.14
7	Transição entre floresta densa e campos andinos	Panagos et al. (2011)	jul-set	set	20.29
8	Floresta submontana pluvial	Panagos et al. (2011)	mai-set	ago	30.97
9	Floresta ombrófila densa	IBGE (2004)	jun-out	ago	17.93
10	Floresta sempre-verde em terras altas	Panagoset al. (2011)	jun-ago	jun	18.13
11	Floresta de bambus	IBGE (2004)	mai-set	jul	21.65
12	Floresta densa em terras baixas com palmeiras	IBGE (2004)	aug-out	ago	25.76
13	Campinarana	IBGE (2004)	aug-out	nov	20.09
14	Floresta ombrófila aberta	IBGE (2004)	jun-ago	jul	20.78
15	Campinarana arbustiva com palmeiras	IBGE (2004)	out-jan	out	22.12
16	Floresta densa com dossel irregular	Huber (2006)	aug-out	set	30.38
17	Floresta submontana com palmeiras e lianas	IBGE (2004)	mai-set	jul	27.81
18	Floresta pluvial em terras altas	Panagos et al. (2011)	dez-fev	dez	16.67
19	Floresta ombrófila densa com palmeiras e lianas	IBGE (2004)	jun-set	ago	24.43
20	Floresta submontana seca	Panagos et al. (2011)	jun-set	ago	29.15
21	Floresta Xerófita	Rangel et al. 2007	jun-out	dez	24.50
22	Floresta mista alta e aberta com clima de savana tropical	Gond et al. (2011)	dez-mar	set	39.07
23	Floresta ombrófila densa em terras baixas com palmeiras e lianas	IBGE (2004)	aug-nov	jul	25.30
24	Transição entre floresta ombrófila densa, floresta aberta e savana	IBGE (2004)	jun-set	jun	23.56
25	Mosaico de floresta de terras baixas, pântanos e savana	Anhuf et al. (1999)	dez-mar	out	16.52
26	Savana alagável	López and Zambrana- Torrelio (2006)	jun-set	abr	22.46

Tabela 5.14 Descrição dos tipos vegetacionais, período seco, pico máximo do NDVI e variação percentual do NDVI para cada fenoregião.

Outro aspecto relevante é a saturação do NDVI em regiões de alta biomassa florestal e índice de área foliar acima de 4 (Aragão et al., 2005). A amplitude entre os valores máximo e mínimo alcançaram 16,67% em uma floresta mista em terras baixas, pântanos e savana e 39,07% em uma floresta mista alta e aberta com clima de savana tropical. Esses resultados são semelhantes à estudos que utilizam o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) (SAMANTA et al., 2012; MYNENI et al., 2007; HUETE et al., 2006), indicando a minimização também do efeito de saturação.

Foram utilizados dados de brotamento de folhas novas e produção de liteira em 12 sítios para validação das fenoregiões. O pico da produção de folhas novas coincidiu com o período de incremento na curva de NDVI (Figura 5.24) na maioria dos sítios observados, com exceção da fenoregião 24 (Figura 5.24e), caracterizada por uma floresta de transição entre floresta ombrófila densa, floresta aberta e savana. Além disso, foi possível notar o pico de produção de folhas novas que ocorreu no período chuvoso em 4 dos 6 sítios observados.



Figura 5.24 - Comparação entre as séries temporais de NDVI das fenoregiões (→), período de pico na produção de folhas novas (sombreado), o coeficiente de variação do NDVI em cada fenoregião e o período chuvoso (linha pontilhada): (a) Peho-06 (NORCONK e CONKLIN-BRITTAIN, 2004); (b) Peho-9 (PERES, 1994); (c) Peho-16 (BONAL et al., 2000); (d) Peho-18 (BOUBLI, 2005); (e) Peho-24 (PINTO e STEZ, 2004); e (f) Peho-25 (BASSET et al., 2000).

O período do pico de produção de liteira coincidiu com o período de decréscimo na curva de NDVI e ocorreu no final do período seco em todos os sítios comparados (Figura 5.25).



Figura 5.25 - Comparação entre as series temporais de NDVI das fenoregiões (→), período de pico na produção de liteira (sombreado), o coeficiente de variação do NDVI em cada fenoregião e o período chuvoso (linha pontilhada). (a) Pheno-10 (JUSTINIANO e FREDERICKSEN, 2000); (b) Pheno-11 (RAINFOR – Tambopata); (c) Pheno-13 (BARBOSA e FEARNSIDE, 1996); (d) Pheno-14 (NEBEL et al., 2001); (e) Pheno-17 (SELVA et al., 2007); e (f) Pheno-26 (BRIENEN e ZUIDEMA. 2005).

Estudos prévios de fenologia florestal na Amazônia utilizando dados do sensor MODIS reportam o amplo brotamento de folhas novas no período seco (HUETE et al., 2006; MYNENI et al., 2007; XIAO et al., 2006; SAMANTA et al., 2012). Porém, 66% dos estudos compilados neste trabalho que coletaram dados fenológicos em campo, reportam o pico do brotamento de folhas novas no período chuvoso. Nesse sentido, as séries temporais de NDVI das fenoregiões (espectros fenológicos), produzidas neste trabalho, seguem a dinâmica de brotamento no período chuvoso com a curva fenológica apresentando incremento a partir da metade do período chuvoso.

5.4.2 Gradientes fenológicos e climáticos

A Figura 5.26 mostra as fenofases correspondentes ao início, pico e final do período de crescimento vegetativo do dossel florestal. As fenofases apresentaram alta variabilidade espacial assim como, ocorrem seguindo um gradiente no sentido sudeste - noroeste. Ao noroeste da Amazônia, o início do período de crescimento ocorreu entre maio e julho, durante a metade final do período seco no período de maior incidência da radiação solar. Essa região é caracterizada pelo curto ou ausência do período seco. No centro-norte, o início do período de crescimento ocorreu de março a maio, durante meados do período chuvoso, seguindo o aumento da disponibilidade de radiação solar. No extremo sul, as fenoregiões 17 e 26, caracterizadas por uma floresta submontana e savana respectivamente, apresentaram início do crescimento em outubro e dezembro, dois meses antes da máxima precipitação (início do período chuvoso). No sentido sudoeste-noroeste o pico do período de crescimento ocorreu em um gradiente que segue a metade final do período chuvoso, de abril (sudoeste) a setembro (nordeste). A fenofase referente ao fim do período de crescimento seguiu o gradiente correspondente ao final do período seco, no sentido sudeste-noroeste (setembro a fevereiro) com uma defasagem de três meses.



Figura 5.26 - Fenofases de acordo com as fenoregiões mapeadas. (a) Início do período de crescimento; (b) Pico do período de crescimento; e (c) Final do período de crescimento. As setas indicam o sentido do gradiente fenológico.
Os gradientes fenológicos, seguiram os gradientes referentes à distribuição espacial das variáveis climáticas (precipitação e radiação solar incidente) presentes na Amazônia (Figura 5.27).



Figura 5.27 - Gradiente climático de acordo com as fenoregiões mapeadas. (a) início do período seco; (b) pico do período seco; (c) início do período chuvoso;
(d) pico do período chuvoso; (e) pico da radiação solar incidente; e (f) mínima radiação solar incidente.

5.4.3 Sazonalidade da PPB de acordo com as fenoregiões

A utilização das fenoregiões como padrão da PPB média mensal mostrou um gradiente no sentido norte-sul (Figura 5.28a). A distribuição espacial do coeficiente de variação da média mensal da PPB mostra um gradiente no sentido sudoeste-nordeste (Figura 5.28b), indicando o extremo nordeste da Amazônia (foz do Amazonas às Guianas) como região onde é maior a diferença entre a máxima e mínima PPB, em escala mensal.



Figura 5.28 - Média e coeficiente de variação da PPB mensal média para o período de 2003-2010 (n = 96).

Esse gradiente sudoeste-nordeste que representa a maior variação da PPB, também pode ser observado pela distribuição espacial da amplitude da PPB (Figura 5.29). Esse é o mesmo padrão espacial da fertilidade do solo (QUESADA et al., 2009), sendo o mesmo também para a quantidade de massa foliar por unidade de área (FYLLAS et al., 2009). Esse resultado suporta a "abordagem conciliadora entre a PPB e variáveis estruturais do dossel", apresentada neste trabalho (tópico 5.3.1).

88



Figura 5.29 Amplitude entre a PPB mínima e a máxima.

Complementando essa abordagem, nesse gradiente sudoeste-nordeste, a região de maior amplitude da PPB é também a região de maior massa foliar e por isso, onde a taxa de crescimento vegetal do dossel é menor. Ou seja, na região nordeste é maior o tempo que o dossel florestal gasta para desenvolver do estado de mínima quantidade de folhas até o ápice da quantidade de folhas. Sendo assim, na região sudoeste a massa foliar do dossel é menor, consequentemente, é menor o tempo em que o dossel atinge o ápice da quantidade da quantidade de folhas.

A PPB mínima ocorreu de forma homogênea no mês de fevereiro, na maior parte da Amazônia, e, apresenta um gradiente no sentido sudeste-noroeste (fevereiro-maio), com exceção das savanas de Roraima (dezembro) e de uma Floresta sempre-verde em terras altas situada no extremo sudoeste, na fronteira entre Brasil, Peru e Bolívia (Figura 5.30a). A PPB máxima, no entanto, foi mais heterogênea, ocorrendo em agosto na maior parte sul, setembro ao norte, e fevereiro no extremo noroeste e outubro no extremo sudoeste (Figura 5.30a).

89



Figura 5.30 - Distribuição espacial do mês de ocorrência da mínima PPB (a) e máxima PPB (b).

Foram calculadas as médias da PPB para todos os meses do ano, a partir da série histórica estudada (Figura 5.31). De forma geral, é possível observar um deslocamento da máxima PPB no sentido anti-horário na região bioma amazônico, do mês de janeiro a dezembro. Nos meses de janeiro e fevereiro, a máxima PPB ocorre na região noroeste, deslocando-se à região norte até maio, onde alcança o pico nessa região. Em junho a região leste concentra maior PPB e de agosto a outubro, concentra na região nordeste. Em novembro e dezembro a PPB máxima retorna à região noroeste.





(2003-2010).

5.4.4 Forçante Fenológica (NDVI)

Avaliando a correlação entre o NDVI das fenoregiões e a PPB modelada foi possível perceber o gradiente sudoeste-nordeste, onde a região nordeste do bioma possui uma relação mais forte entre a fenologia e a PPB (Figura 5.32).



Figura 5.32 Coeficiente de correlação de Pearson entre o NDVI proveniente de cada uma das fenoregiões e a PPB modelada.

Esse resultado mostra que na região nordeste, mais fortemente no maciço das Guianas, a assimilação de carbono atmosférico (PPB) aumenta com o aumento do NDVI ou aumento da quantidade de folhas no dossel. Nessa região, o máximo desenvolvimento fenológico (NDVI) coincidiu com a máxima PPB em setembro, metade final do período seco (chuvas iniciam em dezembro). Sendo assim, a PPB decai a partir de meados do período seco.

Na região noroeste, o máximo desenvolvimento fenológico (NDVI) ocorreu em dezembro (meados do período chuvoso), enquanto que a máxima PPB ocorreu em janeiro, metade final do período seco (chuvas iniciam em outubro). Na parte sul da Amazônia, mais seca e maior comprimento do período seco, o máximo desenvolvimento fenológico (NDVI) ocorreu em junho enquanto que, a máxima PPB ocorreu de agosto, metade final do período seco (chuvas iniciam em outubro). Na região sudoeste, o máximo desenvolvimento fenológico (NDVI)

ocorreu de junho, enquanto que a máxima PPB ocorreu em outubro, início do período chuvoso.

5.4.5 Forçantes climáticas da PPB

Considerando a delimitação das fenoregiões, a correlação entre a PPB e a precipitação foi negativa, principalmente na região sudeste da Amazônia. As fenoregiões caracterizadas por savanas (fenoregiões 1, 6 e 26) apresentaram correlação positiva entre PPB e a precipitação (Figura 5.33a). Em relação à temperatura, apenas a região da savana de Roraima apresentou relação negativa, estatisticamente significativa, entre a PPB e a temperatura (Figura 5.33b). A PPB apresentou correlação positiva em relação à radiação solar incidente em toda Amazônia, principalmente na região norte do bioma (Figura 5.33c). Em relação ao déficit de pressão de vapor, a PPB apresentou correlação negativa apenas nas fenoregiões correspondentes à savana de Roraima e Gran Savana da Venezuela (Figura 5.33d).



Figura 5.33 Correlação entre a PPB e (a) precipitação, (b) temperatura, (c) radiação solar incidente e (d) déficit de pressão de vapor.

As fenoregiões caracterizadas pelas savanas (Roraima e Gran Savana – Venezuela) apresentaram uma dinâmica de perda de folhas no período seco e rápido brotamento de folhas no início do período chuvoso. Nesse caso, as folhas jovens possuem alta capacidade de assimilação de carbono atmosférico. Por isso, essa correlação positiva demonstra assertividade do modelo ACM.

A correlação negativa entre a precipitação e a PPB na maior parte da Amazônia ocorreu, como na relação PPB e a fenologia (NDVI), devido a PPB alcançar o máximo valor na metade do período seco.

Na região noroeste, apesar da PPB alcançar o máximo no pico do período chuvoso, como mostrado na relação entre PPB e fenologia, o mínimo valor da PPB nessa região ocorreu em maio dois meses antes do mínimo da

precipitação, o que repercutiu na correlação negativa entre a PPB e a precipitação. Ou seja, nessa região a PPB mínima ocorre de forma antecipada ao final do período chuvoso.

A temperatura e radiação apresentaram correlação positiva, por isso, a correlação entre a PPB e a temperatura, assim como, PPB e radiação solar incidente, apresentaram o padrão de distribuição espacial semelhante. Nesse caso, região sul apresentou correlação positiva forte. No entanto, a relação entre a PPB e temperatura positiva principalmente na região noroeste, enquanto que a relação entre a PPB e a radiação solar incidente foi fortemente positiva em toda região sul.

No caso específico da radiação solar incidente, a maior correlação com a PPB seguiu o padrão de distribuição espacial seguindo o gradiente sudoestenordeste, semelhante aos gradientes de fertilidade (QUESADA et al., 2009), taxa de crescimento (MALHI et al., 2004) e quantidade de massa foliar por unidade de área (FYLLAS et al., 2009).

Na região sudoeste, a vegetação inicia o período de crescimento (NDVI mínimo) em março e alcançando o ápice em junho, 4 meses. Na região nordeste, inicia em abril e tem o ápice em setembro, 6 meses. A PPB na região sudoeste o inicia o crescimento em junho e chega ao ápice em outubro, 5 meses. Na região noroeste esse período é de 8 meses (fevereiro – setembro). A radiação solar inicia o incremento em abril e tem o ápice em agosto (5 meses) na maior parte da Amazônia.

Esses resultados confirmam a região sudoeste como sendo mais dinâmica (CHAVE et al., 2009), possuindo ciclo mais curto das variáveis biofísicas e da PPB, sendo que na região nordeste o ciclo entre a PPB e a radiação estão mais alinhados.

O déficit de pressão de vapor (DPV) é uma variável climática relacionada à demanda atmosférica de umidade, ou seja, atua como forçante na evapotranspiração (tópico 5.3.1), portanto, uma variável chave na avaliação da PPB. Nesse caso, as savanas apresentaram correlação negativa entre DPV e a PPB. Essa relação é esperada, uma vez que, os valores mais altos de DPV

ocorrem no período seco, quando o dossel das savanas perdem as folhas, diminuindo, portanto a PPB.

Nas demais regiões da Amazônia a correlação entre o DPV e a PPB foi positiva, sendo fortemente positiva, principalmente na região noroeste, assim como foi fortemente positiva a PPB em relação à temperatura. Essa região é caracterizada pelo curto ou ausente período seco. Por isso, o DPV reflete substancialmente o efeito da radiação, diminuição da quantidade de chuvas e menor regime hídrico. Por isso, com exceção dos períodos de seca prolongada, essa é uma região onde o déficit hídrico dificilmente ocorre. Essa região também é caracterizada por ser mais fértil que as demais regiões (QUESADA et al., 2009), com maior taxa de crescimento (CHAVE et al., 2009) e ciclagem de nutrientes (MALHI et al., 2004; NARDOTO et al., 2008), portanto, reúne condições para que a radiação solar incidente seja a principal limitante e, consequentemente, forçante climática da PPB.

A parte sul da Amazônia apresentou menores valores de correlação entre a PPB e as variáveis climáticas, sendo ainda negativa a correlação com a precipitação. Como abordado no tópico da correlação entre PPB e fenologia, a parte sul apresentou o pico da PPB na metade final do período seco (agosto), período ápice da radiação incidente. O pico do desenvolvimento fenológico ocorreu em junho. Sendo assim, a PPB tem o pico quando o dossel está renovando as folhas, pois nessa região a perda de folhas ocorre simultaneamente ao brotamento de um novo conjunto (BRANDO et al., 2008). Nesse caso, a maior eficiência fotossintética do novo conjunto de folhas aliada à maior disponibilidade de radiação solar, em meados do período seco, poderia explicar a máxima PPB nesse período.

A região norte apresentou comportamentos distintos na parte noroeste e nordeste. Comparando com as demais regiões, a parte noroeste é caracterizada pelo curto ou ausente período seco, maior fertilidade dos solos, maior taxa de crescimento, maiores taxas de ciclagem de nutrientes, menor quantidade de massa foliar e maior diversidade de espécies vegetais. Com exceção da precipitação, as demais variáveis climáticas apresentaram correlação positiva mais forte nessa região noroeste. Uma hipótese para esse

97

comportamento pode ser uma confluência de fatores ambientais que proporcionaram o desenvolvimento de uma vegetação diversificada e adaptada à essa região. Nesse sentido, sob solo fértil (Quesada et al., 2009) a vegetação possui alta taxa de crescimento (Malhi et al.2004), porém com baixa amplitude de crescimento, o que favorece a rápida ciclagem de nutrientes (Fyllas et al., 2009; Nardoto et al., 2008). O aporte hídrico nessa região não é um fator limitante, por isso, a radiação solar passa a controlar a PPB e, consequentemente, a temperatura e o déficit de pressão de vapor.

Na região nordeste, a baixa fertilidade dos solos e o período de déficit hídrico bem definido, pode ter favorecido o povoamento, principalmente de leguminosas (terr Steeg et al., 2006), melhor adaptada à essas condições. Nesse caso, a radiação passa a co-limitar a PPB juntamente com a precipitação e por isso, possui correlação mais baixa com a PPB.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta resultados que visam contribuir no entendimento da distribuição espacial da Produtividade Primária Bruta (PPB) na Amazônia, com relação a três questões remanescentes dos estudos de modelagem da Produtividade Primária em ecossistemas florestais:

1. Como a PPB se distribui espacialmente na Amazônia?

Espacialmente, a PPB é maior nas regiões noroeste, centro-norte, centro-sul e na costa do Suriname. A PPB é menor nas regiões sudoeste, no maciço das Guianas, na borda da região norte e no extremo leste. As savanas da Venezuela, Roraima e Bolívia, assim como a vegetação pré-andina apresentaram valores de PPB proeminente mente baixos em relação às demais regiões da bacia.

A PPB apresentou relações diferentes com a precipitação e radiação solar, de acordo com a escala temporal considerada. A PPB total anual da Bacia Amazônica apresentou declínio nos últimos três anos, mostrando correlação positiva com a precipitação e com a radiação solar incidente, sendo a radiação a maior forçante nesta escala espaço-temporal. A PPB total mensal apresentou correlação negativa com a precipitação e positiva com a radiação solar incidente.

2. Como a sazonalidade da PPB varia espacialmente e temporalmente?

Partindo dos padrões da fenologia florestal, a PPB máxima varia sazonalmente apresentando um ciclo no sentido anti-horário, na Bacia Amazônica. A amplitude de variação mensal da PPB ocorre em um gradiente no sentido sudoeste-nordeste, onde a região nordeste é mais dinâmica do que a região sudeste da bacia. A PPB mínima mensal ocorre em fevereiro, de forma homogênea na maior parte da bacia. A PPB máxima ocorre em agosto na parte centro-norte, em outubro no extremo noroeste, em setembro na região nordeste e em janeiro no extremo noroeste.

3. Qual a influência das variáveis estruturais da vegetação e climáticas na dinâmica da PPB?

Os resultados apresentados neste trabalho apontam a PPB como uma propriedade que relaciona a dinâmica estrutural da vegetação, a fertilidade dos solos e a precipitação. A PPB sequestra o carbono atmosférico disponibilizando-o para o metabolismo vegetal. Na Amazônia a PPB apresentou maiores valores em regiões onde os teores de nutrientes foliares (nitrogênio e fósforo) são maiores e a taxa de ciclagem é menor. Nessas regiões, a PPB possibilita o maior investimento em massa foliar e, consequentemente, retenção dos nutrientes no dossel por mais tempo. Esse mecanismo pode minimizar a lixiviação dos nutrientes, uma vez que, nessas regiões a sazonalidade climática é maior e a fertilidade dos solos é menor. Como a sazonalidade é maior, igualmente é o comprimento do período seco, expondo o dossel ao déficit hídrico. Nessas regiões ocorre o predomínio de leguminosas, com raízes pivotantes e profundas que diminuem os efeitos do déficit hídrico e suprem o nitrogênio possivelmente escasso no solo.

Essas relações sugerem uma influência mutua entre a capacidade fotossintética expressa pela PPB, variáveis biofísicas estruturais da vegetação e do clima, favorecendo a adaptação da vegetação à variabilidade do suporte pedológico.

Além dessas questões, os resultados alcançados confirmam as hipóteses levantadas inicialmente:

H1. A PPB responde distintamente às variáveis ambientais e climáticas nas diferentes regiões da Amazônia.

A PPB na região noroeste apresentou valores baixos mesmo com alta fertilidade dos solos e disponibilidade hídrica, sendo a disponibilidade de radiação o fator limitante. Na região central, a alta ocorrência de espécies leguminosas e altos teores de nitrogênio e fósforo foliares podem favorecer altos valores de PPB. Nas bordas da região sul e sudeste da bacia, a baixa ocorrência de leguminosas pode favorecer baixos valores de PPB. Na região das Guianas os valores mais baixos de PPB ocorrem na parte mais secas, apesar da alta ocorrência de leguminosas.

H2. A fenologia da floresta amazônica é mais heterogênea do que estudos prévios tem mostrado e a PPB responde à essa variabilidade seguindo gradientes ambientais referentes ao clima, vegetação e solo.

A fenologia apresentou alta variabilidade espacial, sendo identificados 26 padrões distintos, onde a produtividade ocorreu distribuída em regiões homogêneas seguindo gradientes ambientais referentes ao clima, estrutura da vegetação e fertilidade dos solos.

Este trabalho avaliou a PPB, ou seja, a capacidade do ecossistema florestal em sequestrar o carbono atmosférico e disponibilizar aos processos metabólicos. Parte desse carbono retorna à atmosfera (Respiração) e a outra é fixada nas estruturas vegetais (Produtividade Primária Líquida – PPL). Portanto, a sugestão para futuros trabalhos é complementar os estudos na modelagem da Respiração e por diferenciação estimar a PPL. Estudos apontam que a fração correspondente a Respiração não é constante ao longo do dossel, portanto, os gradientes ambientais podem influenciar a respiração, e consequentemente a PPL, de forma diferente da PPB. Os eventos de seca prolongada afetam diretamente a Respiração, sendo assim, a sequência desses estudos pode determinar a resiliência da Floresta Amazônica em relação ao carbono atmosférico total sequestrado e fixado na biosfera.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, B.; WHITE, A.; LENTON, T. M. An analysis of some diverse approaches to modelling terrestrial net primary productivity. *Ecological Modelling*, v. 177, n. 3-4, p. 353-391, doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.03.014, 2004.

ANDERSON; L. O. Biome-Scale Forest Properties in Amazonia Based on Field and Satellite Observations. *Remote Sensing*, v. 4, n. 12, p. 1245-1271, doi:10.3390/rs4051245, 2012.

ARAGÃO, L. E. O. C. *Modelagem dos padrões temporal e espacial da produtividade primária bruta na região do Tapajós: uma análise multi-escala.* 2004. 283 p. (INPE-11423-TDI/951). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/07.14.13.33. Acesso em: 01 jul. 2013.

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. *Biogeosciences*, v. 6, n. 12, p. 2759-2778, doi:10.5194/bg-6-2759-2009, 2009.

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Landscape pattern and spatial variability of leaf area index in Eastern Amazonia. *Forest Ecology and Management*, v. 211, n. 3, p. 240-256, doi:10.1016/j.foreco.2005.02.062, 2005.

BAKER, T. R. et al. Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, v. 359, n. 1443, p. 353-65, doi:10.1098/rstb.2003.1422, 2004.

BALDOCCHI, D. et al. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem–Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, n. 11, p. 2415-2434, doi:10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2, 2001.

BARBOSA, R. I.; FEARNSIDE, P. M. Carbon nutrient flows in an Amazonian forest: fine litter production and composition at Apiaú, Roraima, Brazil. *Tropical Ecology*, v. 37, n. 1, p. 115-125, 1996.

BASSET, Y. et al. Short-term effects of canopy openness on insect herbivores in a rain forest in Guyana. *Journal of Applied Ecology*, v. 38, n. 5, p. 1045-1058, doi:10.1046/j.1365-2664.2001.00660.x, 2002.

BATISTA, J. et al. Neotectônica da região amazônica : aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *Geonomos,* v. 4, n. 2, p. 23-43, 1991.

BEER, C. et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science (New York, N.Y.)*, v. 329, n. 5993, p. 834-8, doi:10.1126/science.1184984, 2010.

BEMERGUY, R. L.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; BORGES, M. S.; SOARES JR, A. V. Structural geomorphology of the Brazilian Amazon region. In: SBG (Ed.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém-PA: Núcleo Norte, 2002. p. 245-257.

BERTILLER, M. B. et al. Leaf strategies and soil N across a regional humidity gradient in Patagonia. *Oecologia*, v. 148, n. 4, p. 612-24, doi:10.1007/s00442-006-0401-8, 2006.

BLASCHKE, T. Towards a framework for change detection based on image objects. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, v. 113, p. 1-9, 2005.

BOARDMAN, J. W. Analysis, understanding and visualization of hyperspectral data as convex sets in n-space Jo. *SPIE*, v. 2480, p. 14-22, 1988.

BONAL, D. et al. Late-stage canopy tree species with extremely low d 13 C and high stomatal sensitivity to seasonal soil drought in the tropical rainforest of French Guiana. *Plant, Cell & Environment*, v.23, n. 5, p. 445–459, May 2000.p. 445-459, 2000.

BONDEAU, a. et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): importance of vegetation structure on seasonal NPP estimates. *Global Change Biology*, v. 5, n. S1, p. 35-45, doi:10.1046/j.1365-2486.1999.00005.x, 1999.

BORAK, J. S.; JASINSKI, M. F.; CRAGO, R. D. Time series vegetation aerodynamic roughness fields estimated from modis observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 135, n. 1-4, p. 252-268, doi:10.1016/j.agrformet.2005.12.006, 2005.

BOUBLI, J. P. Floristic, primary productivity and primate diversity in Amazonia: contrasting a eutrophic várzea forest and an oligotrophic caatinga forest in Brazil. In: DEW, J. L.; BOUBLI, JEAN PHILIPPE (Eds.). *Tropical fruits and frugivores*. Netherlands: Springer, 2005. p. 59-73.

BRANDO, P. M. et al. Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, v. 363, n. 1498, p. 1839-48, doi:10.1098/rstb.2007.0031, 2008.

BRAY, J. R.; GORHAM, E. Litter production in forests of the world. *Adv. Ecol. Res.*, v. 2, p. 101-157, 1964.

BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: a test for six species using tree ring analysis. *Oecologia*, v. 146, n. 1, p. 1-12, doi:10.1007/s00442-005-0160-y, 2005.

CARSWELL, F. E. et al. Seasonality in CO 2 and H 2 O flux at an eastern Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. D20, p. 8076, doi:10.1029/2000JD000284, 2002.

CASTRO, C. A. C. Interações trópicos-extratrópicos na escala de tempo intrasazonal durante o verão austral e seus efeitos na américa do sul. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - [S.I.]. 2009.

CEBALLOS, J. C. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, n. D2, p. D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004.

CHAHINE, M. et al. On the determination of atmospheric minor gases by the method of vanishing partial derivatives with application to CO 2. *Geophysical Research Letters*, v. 32, n. 22, p. L22803, doi:10.1029/2005GL024165, 2005.

CHAHINE, M. T. et al. AIRS: Improving Weather Forecasting and Providing New Data on Greenhouse Gases. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 87, n. 7, p. 911-926, doi:10.1175/BAMS-87-7-911, 2006.

CHAMBERS, J. Q. et al. Regional ecosystem structure and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests. *Trends in ecology & evolution*, v. 22, n. 8, p. 414-23, doi:10.1016/j.tree.2007.05.001, 2007.

CHANG, C. I.; PLAZA, A. A Fast Iterative Algorithm for Implementation of Pixel Purity Index. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 3, n. 1, p. 63-67, doi:10.1109/LGRS.2005.856701, 2006.

CHAVE, J. et al. Regional and temporal patterns of litterfall in tropical South America. *Biogeosciences Discussions*, v. 6, n. 4, p. 7565-7597, doi:10.5194/bgd-6-7565-2009, 2009.

CHAVE, J. et al. Regional and seasonal patterns of litterfall in tropical South America. *Biogeosciences*, v. 7, n. 1, p. 43-55, doi:10.5194/bg-7-43-2010, 2010.

CHEN, J. et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI timeseries data set based on the Savitzky–Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, v. 91, n. 3-4, p. 332-344, doi:10.1016/j.rse.2004.03.014, 2004.

CHEN, Y. et al. Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against Observations of a Soil Moisture network on the central Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, p. n/a-n/a, doi:10.1002/jgrd.50301, 2013.

CHURKINA, G. et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): the importance of water availability. *Global Change Biology*, v. 5, n. S1, p. 46-55, doi:10.1046/j.1365-2486.1999.00006.x, 1999.

CLARK, D. A. et al. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, v. 11, n. 2, p. 371-384, doi:10.1890/1051-0761(2001)011[0371:NPPITF]2.0.CO;2, 2001.

CRAMER, W. et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, v. 5, n. S1, p. 1-15, doi:10.1046/j.1365-2486.1999.00009.x, 1999.

DALL'AGNOL, R.; ROSA-COSTA, L. T. A. A formaçao do continente amazônico. *Amazônia - A floresta do futuro: Orígens*. São Paulo: Duetto Editorial/Scientific American Brasil, 2008. p. 6-13.

DENNISON, P. E.; HALLIGAN, K. Q.; ROBERTS, Dar A. A comparison of error metrics and constraints for multiple endmember spectral mixture analysis and spectral angle mapper. *Remote Sensing of Environment*, v. 93, n. 3, p. 359-367, doi:10.1016/j.rse.2004.07.013, 2004.

DÜNISCH, O.; MORAIS, R. R. Regulation of xylem sap flow in an evergreen , a semi-deciduous , and a deciduous Meliaceae species from the Amazon. *Trees*, v. 16, p. 404-416, doi:10.1007/s00468-002-0182-6, 2002.

EVA, H. D. et al. A land cover map of South America. *Global Change Biology*, v. 10, n. 5, p. 731-744, doi:10.1111/j.1529-8817.2003.00774.x, 2004.

FIELD C. B.; H. N. M. Catastrophic xylem failure: tree life at the brink. *Trends in ecology & evolution*, v. 4, n. 5, p. 124-126, 1989.

FISHER, R. A. et al. Evidence from Amazonian forests is consistent with isohydric control of leaf water potential. *Plant, cell & environment*, v. 29, n. 2, p. 151-65, 2006.

FISHER, R. A. et al. Evidence from Amazonian forests is consistent with isohydric control of leaf water potential. *Environment*, p. 151-165, 2006.

FISHER, R. A. et al. The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and modelling analyses from a throughfall exclusion experiment. *Global Change Biology*, v. 13, n. 11, p. 2361-2378, doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01417.x, 2007.

FISHER, R. A. et al. Evaluating climatic and soil water controls on evapotranspiration at two Amazonian rainforest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, n. 6-7, p. 850-861, doi:10.1016/j.agrformet.2007.12.001, 2008.

FITTKAU, E. J. Esboço de uma divisão ecológica da região amazônica. In: PROC. SYMP. BIOL. TROP. AMAZ. *Anais*... Florencia y Leticia: [s.n.], 1971.

FITTKAU, E. J. Productivity, biomass and population dynamics in Amazonian water bodies. In: GOLLEY, G. B. E MEDINA, E. (eds.). *Tropical ecological*

systems. Trends in 30 terrestrial and aquatic and research. Springer, 1975. p. 289–311.

FYLLAS, N. M. et al. Basin-wide variations in foliar properties of Amazonian forest: phylogeny, soils and climate. *Biogeosciences Discussions*, v. 6, n. 2, p. 3707-3769, doi:10.5194/bgd-6-3707-2009, 2009.

FYLLAS, Nikolaos M.; QUESADA, C. A.; LLOYD, Jon. Deriving Plant Functional Types for Amazonian forests for use in vegetation dynamics models. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, v. 14, n. 2, p. 97-110, doi:10.1016/j.ppees.2011.11.001, 2012.

GOND, V. et al. Broad-scale spatial pattern of forest landscape types in the Guiana Shield. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 13, n. 3, p. 357-367, doi:10.1016/j.jag.2011.01.004, 2011.

GOULDEN, M. L. et al. DIEL AND SEASONAL PATTERNS OF TROPICAL FOREST CO 2 EXCHANGE. *Ecological Applications*, v. 14, n. sp4, p. 42-54, doi:10.1890/02-6008, 2004.

GRANT, R. F. et al. Modeling the carbon balance of Amazonian rain forests: resolving ecological controls on net ecosystem productivity. *Ecological Monographs*, v. 79, n. 3, p. 445-463, doi:10.1890/08-0074.1, 2009.

GREEN, A. A. et al. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 26, n. 1, p. 65-74, doi:10.1109/36.3001, 1988.

HARRIS, P. P. et al. Effect of soil moisture on canopy conductance of Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 122, n. 3-4, p. 215-227, doi:10.1016/j.agrformet.2003.09.006, 2004.

HEDIN, L. O. et al. The Nitrogen Paradox in Tropical Forest Ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 40, n. 1, p. 613-635, doi:10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110246, 2009.

HODNETT, M. G. et al. Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. *Journal of Hidrology*, v. 170, p. 233-254, 1995.

HOLBEN, B. N.; SHIMABUKURO, Y. E. Linear mixing model applied to coarse spatial resolution data from multispectral satellite sensors. *International Journal of Remote Sensing*, v. 14, n. 11, p. 2231-2240, doi:10.1080/01431169308954032, 1993.

HOLLINGER, D. Y.; RICHARDSON, A. D. Uncertainty in eddy covariance measurements and its application to physiological models. *Tree Physiology*, v. 25, n. 7, p. 873-885, doi:10.1093/treephys/25.7.873, 2005.

HOUGHTON, R. A. et al. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biology*, v. 7, n. 7, p. 731-746, doi:10.1046/j.1365-2486.2001.00426.x, 2001.

HOUGHTON, R. A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology*, v. 9, n. 4, p. 500-509, doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00620.x, 2003.

HUETE, A.R. et al. Multiple site tower flux and remote sensing comparisons of tropical forest dynamics in Monsoon Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, n. 5, p. 748-760, doi:10.1016/j.agrformet.2008.01.012, 2008.

HUETE, A. R. et al. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 6, p. L06405, doi:10.1029/2005GL025583, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Mapa de biomas do Brasil e o mapa de 400 vegetação do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.* Rio de Janeiro, 2004.

IRION, G. Soil infertility in the Amazonian rain forest. *Naturwissenschaften*, v. 65, p. 515–519, 1978.

JIPP, P. H.; NEPSTAD, D. C.; CASSEL, D. K. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally-dry Amazonia. *Climatic Change*, v. 39, p. 395-412, doi:10.1023/a:1005308930871, 1998.

JORDAN, C. F.; HERRERA, R. Tropical rain forests: are nutrients really critical? *The American Naturalist*, v. 117, p. 167–180, 1981.

JUSTINIANO, M. J.; FREDERICKSEN, T. S. Phenology of Tree Species in Bolivian Dry Forests. *Biotropica*, v. 32, n. 2, p. 276-281, doi:10.1111/j.1744-7429.2000.tb00470.x, 2000.

KELLER, M. et al. Ecological research in the large-scale biosphere – atmosphere experiment in amazonia: early results. *Ecological Applications*, v. 14, n. sp4, p. 3-16, doi:10.1890/03-6003, 2004.

KEMP, P. R. Scaling Ecophysiology from the Plant to the Ecosystem: A Conceptual Framework. *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Academic Press, 1993. p. 127.

KEY, J.; HAEFLIGER, M. Arctic ice surface temperature retrieval from AVHRR thermal channels. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, n. D5, p. 5885, doi:10.1029/92JD00348, 1992.

KICKLIGHTER, D. W. et al. *Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): global pattern and differentiation by major biomes. Global Change Biology.* 1999.

KOBAYASHI, H.; DYE, D. G. Atmospheric conditions for monitoring the longterm vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, v. 97, n. 4, p. 519-525, doi:10.1016/j.rse.2005.06.007, 2005.

KRUSE, F. A. et al. The Spectral Image Processing System (SIPS) Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sens. Environ.*, v. 44, p. 145-163, 1993.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, v. 95, n. 3, p. 209-228, doi:10.1016/S0378-1127(97)00026-1, 1997.

LEITH, H. Primary productivity in ecosystems: comparative analysis of global patterns. In: DOBBEN, W. H. VAN; LOWE-MCCONNELL, R. H. (eds.). *Patterns of primary production in the biosphere*. Dowden, Hutchingson and Ross, 1975. p. 67-88.

LEWIS, S. L. et al. The 2010 Amazon drought. *Science (New York, N.Y.)*, v. 331, n. 6017, p. 554, doi:10.1126/science.1200807, 2011.

LIN, B. et al. Assessment of global annual atmospheric energy balance from satellite observations. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, n. D16, p. D16114, doi:10.1029/2008JD009869, 2008.

MALHI, Y. et al. The above-ground coarse wood productivity of 104 Neotropical forest plots. *Global Change Biology*, v. 10, n. 5, p. 563-591, doi:10.1111/j.1529-8817.2003.00778.x, 2004.

MALHI, Y. et al. The regional variation of aboveground live biomass in oldgrowth Amazonian forests. *Global Change Biology*, v. 12, n. 7, p. 1107-1138, doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01120.x, 2006.

MALHI, Y. et al. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology*, v. 15, n. 5, p. 1255-1274, doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01780.x, 2009.

MARENGO, A. M.; DRUYAN, L. M.; HASTENRATH, S. Observational and modelling studies of amazonia interannual climate variability. *Climatic Change*, v. 23, p. 267-286, 1993.

MARTINELLI, L. A. et al. The Use of Carbon and Nitrogen Stable Isotopes to Track Effects of Land-Use Changes in the Brazilian Amazon Region. *Terrestrial Ecology*, v. 1, p. 301-318, doi:10.1016/S1936-7961(07)01019-6, 2007.

MELILLO, J. M. et al. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, v. 363, n. 6426, p. 234-240, 1993.

MERCADO, L. M. et al. Variations in Amazon forest productivity correlated with foliar nutrients and modelled rates of photosynthetic carbon supply. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, v. 366, n. 1582, p. 3316-29, doi:10.1098/rstb.2011.0045, 2011.

MONTEITH, J.; UNSWORTH, M. *Principles of environmental physics*. Third Edit ed. Burlington: Elsevier, 2008. p. 440

MU, Q. et al. Evaluating water stress controls on primary production in biogeochemical and remote sensing based models. *Journal of Geophysical Research*, v. 112, n. G1, p. G01012, doi:10.1029/2006JG000179, 2007.

MYNENI, R. B. et al. Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 104, n. 12, p. 4820-3, doi:10.1073/pnas.0611338104, 2007.

NARDOTO, G. B. et al. Understanding the Influences of Spatial Patterns on N Availability Within the Brazilian Amazon Forest. *Ecosystems*, v. 11, n. 8, p. 1234-1246, doi:10.1007/s10021-008-9189-1, 2008.

NEBEL, G.; DRAGSTED, J.; SALAZAR, A. Litterfall, biomass and net primaryproduction in the Peruvian Amazon. *Forest Ecology and Management*, v. 150, p. 93-102, 2001.

NEMANI, R. R. et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science (New York, N.Y.)*, v. 300, n. 5625, p. 1560-3, doi:10.1126/science.1082750, 2003.

NEMRY, B. et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of the seasonal atmospheric CO2 signal. *Global Change Biology*, v. 5, n. S1, p. 65-76, doi:10.1046/j.1365-2486.1999.00008.x, 1999.

NEPSTAD, D. C. et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, v. 372, n. 6507, p. 666-669, doi:10.1038/372666a0, 1994.

NOGUEIRA, A. C. R. A formaçao do continente amazônico. *Amazônia - A floresta do futuro: Orígens*. São Paulo: Duetto Editorial/Scientific American Brasil, 2008. p. 6-13.

NORCONK, M. A.; CONKLIN-BRITTAIN, N. L. Variation on Frugivory: The Diet of Venezuelan White-Faced Sakis. *International Journal of Primatology*, v. 25, n. 1, p. 1-26, doi:10.1023/B:IJOP.0000014642.68751.ed, 2004.

NOVO, E. M. L. de M. et al. Técnicas avançadas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo de mudanças climáticas e ao funcionamento dos ecossistemas amazônicos. *Acta Amazonica*, v. 35, n. 2, p. 259-272, doi:10.1590/S0044-59672005000200016, 2005.

PERES, C. A. *Primate Responses to Phenological Changes in an Amazonian Terra Firme Forest. Biotropica*. JSTOR. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/2389114?origin=crossref>, 1994.

PHILLIPS, O. L. et al. Pattern and process in Amazon tree turnover, 1976-2001. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, v. 359, n. 1443, p. 381-407, doi:10.1098/rstb.2003.1438, 2004.

PINTO, L. P.; SETZ, E. Z. F. Diet of Alouatta belzebul discolor in an Amazonian Rain Forest of Northern Mato Grosso State, Brazil. *International Journal of Primatology*, v. 25, n. 6, p. 1197-1211, doi:10.1023/B:IJOP.0000043958.75534.7f, 2004.

PINZON, J; BROWN, M. E.; TUCKER, C. J. Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition. In: N. E. HUANG AND S. S. P. SHEN (Ed.). *Hilbert-Huang transform: introduction and applications*. Singapore: Hackensack, NJ: World Scientific, 2005. p. 167-183.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. 1a. ed. São José dos Campos - SP: Parêntese, 2007. p. 78

POTTER, C. et al. Changes in the carbon cycle of Amazon ecosystems during the 2010 drought. *Environmental Research Letters*, v. 6, n. 3, p. 034024, doi:10.1088/1748-9326/6/3/034024, 2011.

POULTER, B.; HEYDER, U.; CRAMER, W. Modeling the Sensitivity of the Seasonal Cycle of GPP to Dynamic LAI and Soil Depths in Tropical Rainforests. *Ecosystems*, v. 12, n. 4, p. 517-533, doi:10.1007/s10021-009-9238-4, 2009.

PROPASTIN, P.; ERASMI, S. A physically based approach to model LAI from MODIS 250m data in a tropical region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 12, n. 1, p. 47-59, doi:10.1016/j.jag.2009.09.013, 2010.

QUESADA, C. A. et al. Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties. *Biogeosciences Discussions*, v. 6, n. 2, p. 3993-4057, doi:10.5194/bgd-6-3993-2009, 2009.

QUESADA, C. A. et al. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences*, v. 7, n. 5, p. 1515-1541, doi:10.5194/bg-7-1515-2010, 2010.

RICHARDSON, A. D. et al. A multi-site analysis of random error in tower-based measurements of carbon and energy fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 136, n. 1-2, p. 1-18, doi:10.1016/j.agrformet.2006.01.007, 2006.

ROBERTS, J.; CABRAL, O. M. R.; AGUIAR, L. F. Stomatal and boundary-layer conductances in an amazonian Terra Firme rain forest. *Journal of Applied Ecology*, v. 27, p. 336-353, 1990.

ROCHA, H. R. DA et al. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecological Applications*, v. 14, n. sp4, p. 22-32, doi:10.1890/02-6001, 2004.

RODELL, M. et al. The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 85, n. 3, p. 381-394, doi:10.1175/BAMS-85-3-381, 2004.

ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M. Evolution of the lowest amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. *CATENA*, v. 70, n. 2, p. 253-265, doi:10.1016/j.catena.2006.08.009, 2007.

RUIMY, a. et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. *Global Change Biology*, v. 5, n. S1, p. 56-64, doi:10.1046/j.1365-2486.1999.00007.x, 1999.

RYU, Y. et al. Evaluation of land surface radiation balance derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) over complex terrain and heterogeneous landscape on clear sky days. *agricultural and forest meteorology*, v. 148, n. 10, p. 1538-1552, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.05.008, 2008.

SAATCHI, S. S. et al. Mapping land cover types in the Amazon Basin using 1 km JERS-1 mosaic. *International Journal of Remote Sensing*, v. 21, n. 6-7, p. 1201-1234, doi:10.1080/014311600210146, 2000.

SAATCHI, S. S. et al. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, v. 13, n. 4, p. 816-837, doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01323.x, 2007.

SAATCHI, S. S. et al. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, v. 13, n. 4, p. 816-837, doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01323.x, 2007.

SAATCHI, S. S. et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 108, n. 24, p. 9899-904, doi:10.1073/pnas.1019576108, 2011.

SALATI, E.; VOSE, P. B. Amazon basin: a system in equilibrium. *Science (New York, N.Y.)*, v. 225, n. 4658, p. 129-38, doi:10.1126/science.225.4658.129, 1984.

SALESKA, S. R. et al. Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science* (*New York, N.Y.*), v. 318, n. 5850, p. 612, doi:10.1126/science.1146663, 2007.

SAMANTA, A. et al. Seasonal changes in leaf area of Amazon forests from leaf flushing and abscission. *Journal of Geophysical Research*, v. 117, n. G1, p. G01015, doi:10.1029/2011JG001818, 2012.

SELVA, E. C. et al. Litterfall production and fluvial export in headwater catchments of the southern Amazon. *Journal of Tropical Ecology*, v. 23, n. 03, p. 329-335, doi:10.1017/S0266467406003956, 2007.

SILVA, F. B. et al. Large-scale heterogeneity of Amazonian phenology revealed from 26-year long AVHRR/NDVI time-series. *Environmental Research Letters*, v. 8, n. 2, p. 024011, doi:10.1088/1748-9326/8/2/024011, 2013.

SOMBROEK, W. Spatial and Temporal Patterns of Amazon Rainfall Consequences for the Planning of Agricultural Occupation and. *Ambio*, v. 30, n. 7, p. 388-396, 2001.

SOMMER, R.; SÁ, T.; VIELHAUER, K. Transpiration and canopy conductance of secondary vegetation in the eastern Amazon. *Agricultural and Forest* ..., v. 112, p. 103-121, 2002.

SPRACKLEN, D. V; ARNOLD, S. R.; TAYLOR, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, v. 489, n. 7415, p. 282-5, doi:10.1038/nature11390, 2012.

STEEGE, H. T. E. R. et al. A spatial model of tree a-diversity and tree density for the Amazon. *Biodiversity and Conservation*, v. 12, p. 2255-2277, doi:10.1023/A:1024593414624, 2003.

STEEGE, H. TER et al. An analysis of the floristic composition and diversity of Amazonian forests including those of the Guiana Shield. *Journal of Tropical Ecology*, v. 16, n. 6, p. 801-828, doi:10.1017/S0266467400001735, 2000.

STEEGE, H. TER et al. Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. *Nature*, v. 443, n. 7110, p. 444-7, doi:10.1038/nature05134, 2006.

SU, Z. et al. An Evaluation of Two Models for Estimation of the Roughness Height for Heat Transfer between the Land Surface and the Atmosphere. *Journal of Applied Meteorology*, v. 40, n. 11, p. 1933-1951, doi:10.1175/1520-0450(2001)040<1933:AEOTMF>2.0.CO;2, 2001.

TANGBORN, A. et al. Evaluation of a new middle-lower tropospheric CO2 product using data assimilation. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, v. 12, n. 10, p. 26685-26717, doi:10.5194/acpd-12-26685-2012, 2012.

TAPLEY, B. D. et al. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science (New York, N.Y.)*, v. 305, n. 5683, p. 503-5, doi:10.1126/science.1099192, 2004.

TARDIEU, F. Will Increases in Our Understanding of Soil-Root Relations and Root Signalling Substantially Alter Water Flux Models? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B Biological Sciences*, v. 341, n. 1295, p. 57-66, 1993. TASUMI, M. et al. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid US. *Irrigation and Drainage Systems*, v. 19, n. 3-4, p. 355-376, 2005.

TUCKER, C. et al. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, n. 20, p. 4485-4498, doi:10.1080/01431160500168686, 2005.

VITOUSEK, P. M. Litterfall, Nutrient Cycling, and Nutrient Limitation in Tropical Forests. *Ecology*, v. 65, n. 1, p. 285-298, 1984.

VOURLITIS, G. L. et al. Energy balance and canopy conductance of a tropical semi-deciduous forest of the southern Amazon Basin. *Water Resources Research*, v. 44, n. 3, p. n/a-n/a, doi:10.1029/2006WR005526, 2008.

WILLIAMS, M. et al. Modelling the soil-plant-atmosphere continuum in a Quercus-Acer stand at Harvard Forest: the regulation of stomatal conductance by light, nitrogen and soil/plant hydraulic properties. *Plant, Cell and Environment*, v. 19, n. 8, p. 911-927, doi:10.1111/j.1365-3040.1996.tb00456.x, 1996.

WILLIAMS, M. et al. Predicting gross primary productivity in terrestrial ecosystems. *Ecological Applications*, v. 7, n. 3, p. 882-894, doi:10.1890/1051-0761(1997)007[0882:PGPPIT]2.0.CO;2, 1997a.

WILLIAMS, M. et al. Predicting gross primary productivity in terrestrial ecosystems. *Ecological Applications*, v. 7, n. 3, p. 882-894, doi:10.1890/1051-0761(1997)007[0882:PGPPIT]2.0.CO;2, 1997b.

WILLIAMS, M. et al. Primary production of an arctic watershed: an uncertainty analysis. *Ecological Applications*, v. 11, n. 6, p. 1800-1816, doi:10.1890/1051-0761(2001)011[1800:PPOAAW]2.0.CO;2, 2001.

XIAO, X. et al. Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, v. 103, n. 4, p. 465-473, doi:10.1016/j.rse.2006.04.013, 2006.

YUAN, W. et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, n. 7, p. 1416-1431, doi:10.1016/j.rse.2010.01.022, 2010.

ZHANG, K. et al. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resources Research*, v. 46, n. 9, p. 1-21, doi:10.1029/2009WR008800, 2010.

ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science (New York, N.Y.)*, v. 329, n. 5994, p. 940-3, doi:10.1126/science.1192666, 2010.

ANEXO A – Artigo Publicado



Home Search Collections Journals About Contact us My IOPscience

Large-scale heterogeneity of Amazonian phenology revealed from 26-year long AVHRR/NDVI time-series

This article has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text article. 2013 Environ. Res. Lett. 8 024011 (http://iopscience.iop.org/1748-9326/8/2/024011) View the table of contents for this issue, or go to the journal homepage for more

Download details: IP Address: 150.163.24.123 The article was downloaded on 19/04/2013 at 16:19

Please note that terms and conditions apply.

Content from this work may be used under the terms of (cc)the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the

1. Introduction

Forest phenology is a critical process regulating fluxes of carbon and water between the biosphere and the atmosphere.

Environ. Res. Lett. 8 (2013) 024011 (12pp)

Large-scale heterogeneity of Amazonian phenology revealed from 26-year long **AVHRR/NDVI** time-series

Fabrício B Silva¹, Yosio E Shimabukuro¹, Luiz E O C Aragão^{1,2}, Liana O Anderson^{1,3}, Gabriel Pereira¹, Franciele Cardozo¹ and Egídio Arai¹

¹ National Institute for Space Research, Avenida dos Astronautas 1758, São José dos Campos-SP, Brazil

² College of Life and Environmental Sciences, University of Exeter, Exeter EX4 4RJ, UK

³ Environmental Change Institute, University of Oxford, South Parks Road, Oxford, OX1 3QY, UK

E-mail: fabricioagro@gmail.com and laragao@dsr.inpe.br

Received 1 February 2013 Accepted for publication 25 March 2013 Published 18 April 2013 Online at stacks.iop.org/ERL/8/024011

Abstract

Depiction of phenological cycles in tropical forests is critical for an understanding of seasonal patterns in carbon and water fluxes as well as the responses of vegetation to climate variations. However, the detection of clear spatially explicit phenological patterns across Amazonia has proven difficult using data from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). In this work, we propose an alternative approach based on a 26-year time-series of the normalized difference vegetation index (NDVI) from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) to identify regions with homogeneous phenological cycles in Amazonia. Specifically, we aim to use a pattern recognition technique, based on temporal signal processing concepts, to map Amazonian phenoregions and to compare the identified patterns with field-derived information. Our automated method recognized 26 phenoregions with unique intra-annual seasonality. This result highlights the fact that known vegetation types in Amazonia are not only structurally different but also phenologically distinct. Flushing of new leaves observed in the field is, in most cases, associated to a continuous increase in NDVI. The peak in leaf production is normally observed from the beginning to the middle of the wet season in 66% of the field sites analyzed. The phenoregion map presented in this work gives a new perspective on the dynamics of Amazonian canopies. It is clear that the phenology across Amazonia is more variable than previously detected using remote sensing data. An understanding of the implications of this spatial heterogeneity on the seasonality of Amazonian forest processes is a crucial step towards accurately quantifying the role of tropical forests within global biogeochemical cycles.

Keywords: tropical forest, vegetation index, Amazonia, phenology, leaf flushing, remote sensing

S Online supplementary data available from stacks.iop.org/ERL/8/024011/mmedia

title of the work, journal citation and DOI.

© 2013 IOP Publishing Ltd Printed in the UK

Biophysical and structural changes in the forest canopy driven by phenological cycles are closely tied to vegetation–climate feedbacks (Richardson *et al* 2013, Wu *et al* 2012, Gonsamo *et al* 2012). Therefore, depiction of the spatial configuration of phenological cycles in multiple biomes is essential for improvement of the representation of ecophysiological processes in Earth system models (Bradley *et al* 2011) and for evaluation of the impacts of climatic variation on these processes (Richardson *et al* 2013).

Undisturbed Amazonian vegetation is characterized by a heterogeneous mosaic of forest types (Silman 2007, Gond et al 2011) originating from complex interactions between three main factors: (1) climate, which generates gradients in the timing of the onset and ending of the dry season (Liebmann and Marengo 2001, Sombroek 2001), the length of the dry season (Marengo et al 2001) and the seasonality of solar radiation (Schafer et al 2002); (2) environmental factors, which present a large heterogeneity in soil physical and chemical characteristics (Quesada et al 2009), drainage and topography; and (3) biological factors, which are characterized by changes in species composition across the basin (Sombroek 2001, Sternberg 2001, ter Steege et al 2006), by structural differences in canopy sizes (Barbier et al 2009), by gradients of net primary productivity (Aragão et al 2009) and by canopy litter production (Chave et al 2010).

Previous studies using the normalized difference vegetation index (NDVI) derived from Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data have shown little variation in the phenology of Amazonian forests (Batista et al 1997, Maignan et al 2008). Distinct changes in the amplitude of the NDVI, however, were observed for eastern (high amplitude) and north-western (low amplitude) Amazonia (Asner et al 2000). Negative anomalies in the NDVI during the dry season of eastern Amazonia were associated with decreases in canopy greenness related to dry season water stress. Moreover, the reduction in the amplitude of the NDVI from El Niño to La Niña years suggested that Amazon forest phenology is responsive to rainfall variations. Further research analyzing vegetation index (VI) and leaf area index (LAI) products derived from MODIS data have advanced our knowledge on the phenology of Amazonian forests (Huete et al 2006, Myneni et al 2007, Xiao et al 2006, Saleska et al 2007, Anderson et al 2010, Brando et al 2010, Anderson et al 2011, Bradley et al 2011, Samanta et al 2012). An important breakthrough using MODIS data was the identification of seasonal changes in forest greening during the dry season as a response to increased solar radiation for large areas of primary forests in Amazonia (Huete et al 2006, Myneni et al 2007, Xiao et al 2006, Samanta et al 2012). However, generalization of the dry season green up over Amazonian forests must be interpreted cautiously. Bradley et al (2011), using similar data, showed that 1.27×10^6 km² of the forested area analyzed was in phase with radiation, while 1.58×10^6 km² was in phase with precipitation. Most of the forested area had a weak seasonality (Bradley et al 2011). Moreover, inter-annual variability in changes in the VI could not be explained by climatic variation in Amazonia (Brando et al 2010). This variability indicates



Figure 1. Phenoregions identified in the Amazon basin.

that other environmental controls may play an important role in determining the phenology of Amazonian forests. Our knowledge about Amazonian phenology is still limited to basin-wide generalizations, mainly because of unsuccessful attempts to identify spatially variable coherent regional patterns of phenology. This is in part due to limitations linked to the length of the time-series available for previous analysis (<10 yr) and field information confined to a single area in eastern Amazonia (Tapajós National Forest; Doughty and Goulden 2008, Malhado *et al* 2009, Brando *et al* 2010) that may not be representative of other areas of Amazonia, and therefore limiting our capacity to interpret the patterns observed from satellite data.

Based on the principle that phenological variation of tropical trees is shaped through adaptations to biotic and abiotic factors and, hence, phenological traits are an evolutionary reflection of the influence of these external factors (van Schaik et al 1993, Borchert 1994, Borchert et al 2002), we expect that the phenological cycles within Amazonian vegetation types will vary greatly, reproducing the environmental diversity that can emerge from the spatial arrangement of potential drivers of phenology identified above for this biome. Despite the difficulty in determining the ultimate causes of forest phenological cycles, analysis of pixel-based long-term seasonality of VI is likely to provide an indication of spatially explicit homogenous phenological responses of Amazonian vegetation to different evolutionary pressures. The longest satellite-derived VI time-series currently available is the NDVI from AVHRR (1981-2011) (Zhu et al 2013). A recent comparison between the NDVI and the enhanced vegetation index (EVI) from MODIS revealed that bidirectional reflectance effects are more exacerbated in the EVI than the NDVI, potentially influencing the interpretation of phenological cycles in forest ecosystems (Galvão et al 2011).

Table 1. Vegetation description, dry season period (monthly precipitation < 100 mm), peak of maximum NDVI and proportional variation of NDVI for all phenoregions.

Phenoregion	Vegetation description	Reference	Dry season	Peak of maximum NDVI	% NDVI variation (max–min)
1	Roraima savanna	IBGE (2004)	Oct–Mar	Aug	31.71
2	Dense forest of low lands with lianas	IBGE (2004)	Jun-Sep	Jul	25.19
3	Alluvial dense evergreen forest in low lands	IBGE (2004)	Aug–Nov	Aug	21.72
4	Dense forest of low lands	IBGE (2004)	Jul-Oct	Jul	36.33
5	Low land dense moist forest	Selvaradjou et al (2005)	Jan–Mar	Sep	20.11
6	Savanna	Panagos et al (2011)	Nov–Apr	Sep	22.14
7	Andes–Amazon transition forest	Panagos et al (2011)	Jul-Sep	Sep	20.29
8	Premontane pluvial forest	Panagos et al (2011)	May–Sep	Aug	30.97
9	Closed evergreen forest	IBGE (2004)	Jun-Oct	Aug	17.93
10	Evergreen forest in high lands	Panagos et al (2011)	Jun–Ago	Jun	18.13
11	Bamboo forest	IBGE (2004)	May–Sep	Jul	21.65
12	Dense forest of low lands with palms	IBGE (2004)	Aug-Oct	Aug	25.76
13	Campinarana forest	IBGE (2004)	Aug-Oct	Nov	20.09
14	Low lands evergreen open forest	IBGE (2004)	Jun–Ago	Jul	20.78
15	Campinarana forest with palms and shrubs	IBGE (2004)	Oct–Jan	Oct	22.12
16	High forest with regular canopy	Huber (2006)	Aug-Oct	Sep	30.38
17	Submontane forest with palms and lianas	IBGE (2004)	May-Sep	Jul	27.81
18	Pluvial forest in high lands	Panagos et al (2011)	Dec-Feb	Dec	16.67
19	Dense evergreen forest with palms and lianas	IBGE (2004)	Jun-Sep	Aug	24.43
20	Premontane dry forest	Panagos et al (2011)	Jun-Sep	Aug	29.15
21	Xerophytic vegetation	Rangel et al (1997)	Jun-Oct	Dec	24.50
22	Mixed high and open forest with a tropical savanna climate	Gond <i>et al</i> (2011)	Dec-Mar	Sep	39.07
23	Dense evergreen forest in low lands with palms and lianas	IBGE (2004)	Aug–Nov	Jul	25.30
24	Forest transition between dense, open forest and savanna	IBGE (2004)	Jun–Sep	Jun	23.56
25	Mosaic of evergreen lowland forest, swamp forest, and sayanna	Anhuf and Winkler (1999)	Dec-Mar	Oct	16.52
26	Flooded savanna	López and Zambrana-Torrelio (2005)	Jun-Sep	Apr	22.46

To identify distinct ecological responses of Amazonian forests to localized biotic and abiotic controls, in this study we propose to analyze 26-year long time-series of NDVI data from AVHRR using a novel pixel-level pattern recognition technique based on temporal signal processing concepts. Specifically, we aim to (1) characterize the spatial variability of forest phenology in Amazonia by identifying regions where the forest phenological cycle is homogeneous (phenoregions); (2) quantify the relationships between the seasonality of the NDVI signal of each distinct phenoregion and climate by analyzing the covariance between NDVI, rainfall and solar radiation; and finally (3) investigate how the NDVI changes in relation to field-derived data on leaf flushing and litterfall based on a new compilation of published information for Amazonia.

2. Material and methods

2.1. Datasets

We used two long-term NDVI time-series (1982–2008) with 8 km spatial resolution from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) available from the Global Inventory Monitoring and Modeling Studies (GIMMS) group. The first corresponds to biweekly data and the second to monthly data. These two datasets have been



Figure 2. Comparison between phenoregions' NDVI time-series ($-\phi$ -). Production peak of new leaves (shaded). Monthly coefficient of variation of NDVI (vertical bars) and rainy season (dashed line). (a) Phenoregion 6 (Norconk and Conklin-Brittain 2004); (b) Phenoregion 9 (Peres 1994); (c) Phenoregion 16 (Bonal *et al* 2000); (d) Phenoregion 18 (Boubli 2005); (e) Phenoregion 24 (Pinto and Setz 2004); (f) Phenoregion 25 (Basset *et al* 2001).

constantly improved to minimize noise resulting from residual atmospheric effects, orbital drift, inter-sensor variations, and stratospheric aerosol effects (Tucker *et al* 2005, Pinzon *et al* 2005). The biweekly data were used for the pattern recognition analysis due to their higher temporal resolution. The monthly data were used to perform the correlation analysis between monthly rainfall and incoming radiation and NDVI datasets, as well as to investigate the seasonality of field phenology, NDVI and rainfall data.

Monthly precipitation and incoming radiation time-series covering the period from 2000 to 2008 were created for each phenoregion based on the Global Land Data Assimilation System (GLDAS) precipitation grids (0.25° spatial resolution) (Rodell *et al* 2004). Additionally, we compiled published information on field observations of peak of new leaf and litterfall production for 12 sites in Amazonia to investigate how the NDVIs for selected phenoregions respond to the seasonality of these two phenological processes: (1) leaf flushing and (2) abscission (table S1 available at stacks.iop. org/ERL/8/024011/mmedia).

To reduce the effect of land use and land cover change on the phenological signal, we masked all areas corresponding to agriculture, water body, bare soil and urban areas based on the GLOBCOVER product developed by the European Space Agency (ESA) (Arino *et al* 2007).

2.2. Data processing

Our rationale for detecting forest phenology was based on three assumptions: (1) NDVI time-series can provide cyclical spectra that are directly related to the distinct phenological patterns of each phenoregion; (2) the periodicity of the cycles can be mathematically separated, allowing the identification of phenologically homogenous regions; and (3) the multi-temporal nature of the NDVI time-series is analogous to the characteristics of hyperspectral data, permitting the use of similar image processing techniques.

We applied a signal processing approach to the NDVI time-series aiming to automatically identify NDVI standard curves, which represent phenological forest patterns, in order to map these regions. This signal processing approach consisted of 'noise-adjusted' principal component analysis (minimum noise fraction), automated extraction of end members (pixel purity index) and an automated classification method based on spectral similarity (spectral angle mapper).

The minimum noise fraction (MNF) is a linear transform that provides an optimal ordering of images in terms of image quality and increases the signal to noise ratio, generating principal component images that are unaffected by noise (Green *et al* 1988).

After MNF transformation, the pixel purity index (PPI) was then applied to the principal component images. The



Figure 3. Comparison between phenoregions' NDVI time-series ($-\phi$ -). Production peak of litterfall (shaded). Monthly coefficient of variation of NDVI (vertical bars) and rainy season (dashed line). (a) Phenoregion 10 (Justiniano and Fredericksen 2000); (b) Phenoregion 11 (RAINFOR—Tambopata Site); (c) Phenoregion 13 (Barbosa and Fearnside 1996); (d) Phenoregion 14 (Nebel *et al* 2001); (e) Phenoregion 17 (Selva *et al* 2007); (f) Phenoregion 26 (Brienen and Zuidema 2005).

PPI is an algorithm based on convex geometry concepts used to find the most 'spectrally pure' or extreme pixels (end members), which examines multidimensional envisioned data in *n*-dimensions. Each point (pixel) within this data space can be examined as a linear combination of an unknown number of pure components (Boardman 1995). The PPI is computed by repeatedly projecting *n*-dimensional scatter plots onto a random unit vector. The extreme pixels in each projection are recorded and the total number of times each pixel is marked as extreme is noted. A threshold of 5000 pixels was used to define how many pixels are marked as extreme at the end of the projected vector.

The selected end members (phenological signatures) were then used as input for the spectral angle mapper (SAM) analysis. This pattern recognition technique is based on the measurement of spectral similarity between two or more spectra obtained considering each spectrum as a vector in n-dimensional space (Kruse *et al* 1993). Once similar spectra are identified they are aggregated into a single category. Lastly, the resulting map was postprocessed and pixels with less than nine neighbors and phenoregions with less than 100 pixels were excluded from the final map.

We computed for each phenoregion the mean monthly NDVI. These time-series were smoothed using the Savitzky–Golay filter (Chen *et al* 2004) and the coefficient of variation

was calculated as a homogeneity index. For each NDVI time-series extracted from each phenoregion, phenophases corresponding to the start (SS), end (ES) and peak (PS) of the growing season were calculated according to the methodology proposed by Jönsson and Eklundh (2002).

Finally, correlation analyses were performed to quantify the relationships between NDVI and rainfall and radiation for each phenoregion.

3. Results and discussion

The pattern recognition technique enabled the characterization of 26 phenoregions with distinct long-term NDVI temporal cycles (figure 1). These phenoregions tended, in general, to reflect the spatial distribution of main vegetation types described for Amazonia (table 1).

Previous studies used approaches based on automated cluster analysis or training techniques using multisensor data (Saatchi *et al* 2000, Eva *et al* 2003) that do not incorporate the temporal component of phenology dynamics. Consequently, the resulting maps tended to represent Amazonia as a homogeneous lowland humid forest. Conversely, our technique captured the differences between high forest with regular canopy and mixed high and open forest with a tropical savanna climate in the Guyana shield. These two



Figure 4. (a) Peak of rainy season, (b) peak of dry season, (c) month of maximum radiation and (d) month of minimum radiation. The arrows indicate the southeast–northwest direction of the climatic gradient. The black color corresponds to unclassified areas in the phenoregion map (see figure 1).

forest types have structural and climate differences that have been previously described (Sombroek 2001, Gond *et al* 2011) but not yet clearly separated using remote sensing data. Another important distinction, probably influenced by climatic gradients, was observed among dense forest, open forest and dry forest in the north–south direction.

3.1. Reconciling NDVI variation with field-based phenology

For all phenoregions analyzed, the peak of new leaf production reported from field observations was followed by a steady increase in NDVI or occurred during the maximum NDVI (figure 2). The peak of litterfall production corresponded to time periods in which NDVI had a descending trend (figure 3).

In contrast to previous studies using MODIS data that reported widespread leaf flushing during the dry season in Amazonia (Huete *et al* 2006, Myneni *et al* 2007, Xiao *et al* 2006, Samanta *et al* 2012), field-based information from our literature compilation revealed that the peak of new leaf production occurs during the wet season in 66% of the sites. The NDVI from the AVHRR follows this same dynamics with values increasing from the beginning or middle of the rainy season to the end.

Specifically, field-based reports showed that the pluvial forest in high lands (Phenoregion 18) and forest transition between dense, open forest and savanna (Phenoregion 24) presented just one annual peak of new leaf flushing in the dry season (Boubli 2005, Pinto and Setz 2004). The closed evergreen forest (Phenoregion 9) presented two peaks of flushing in the wet season (Peres 1994). The savanna forest (Phenoregion 6), mosaic of evergreen lowland forest, swamp forest, and savanna (Phenoregion 25) and high forest with regular canopy (Phenoregion 16) presented just one peak of flushing in the wet season (Norconk and Conklin-Brittain 2004, Basset *et al* 2001, Bonal *et al* 2000). The NDVI of each phenoregion followed these events in both the dry and the wet season. The coefficient of variation of the NDVI values did




Figure 5. (a) Start of the growing season, (b) peak of the growing season and (c) end of the growing season. The arrows indicate the southeast–northwest direction of the phenology gradient. The black color corresponds to unclassified areas in the phenoregion map (see figure 1).

not exceed 40% in any of the regions analyzed. The automated PPI method captured NDVI temporal signatures consistently with the main phenological features observed in the field.

3.2. Timing of phenological phases

We identified a strong rainfall and radiation gradient, with maximum rainfall occurring in parallel with minimum radiation. Both variables followed a southeast-northwest direction. The phenophases clearly followed this climatic gradient (figure S2 available at stacks.iop.org/ERL/8/024011/ mmedia). In the northwest of the basin the onset of the growing season occurred mainly between May and July (figure 5(a)), during the middle to the end of the dry season when solar radiation is at its maximum (figure 4(c)). This region is characterized by a non-existent or short dry season. On the other hand, in the central-north Amazon the onset of the growing season occurred from March through May, during the middle to the end of the wet season, following the increased availability of solar radiation. In the extreme south of the Amazon basin, Phenoregions 17 and 26, characterized by submontane forest and savanna, respectively, had the onset of the growing season between October and December, two months before the maximum rainfall (beginning of the wet season). In the southwest-northeast direction the peak of the growing season (figure 5(b)) occurred following the middle-to-end of wet season gradient, from April (southwest) to September (northeast). The end of the growing season (figure 5(c)) also followed the end of dry season gradient in the southwest-northeast direction (September-February) with a lag of about three months.

Correlation analysis revealed that without lags only savanna forests presented positive correlation with rainfall. However, 76.9% of all phenoregions had a significant positive correlation between NDVI and rainfall with a three month time lag (figure 6). The correlation between NDVI and incoming radiation was positive in a large part of the basin without lags (figure 7). These results indicate that large areas of Amazonian forests strategically flush new leaves from the middle to the end of the wet season when incoming radiation is increasing and soil water availability is still high (Juárez et al 2007). A delay effect of the NDVI in response to rainfall is expected and is likely to explain the occurrence of negative correlation coefficients when lags are not considered. An exception was savanna forest and submontante forest with palms and lianas that presented positive correlation between NDVI and rainfall without time lags.

The NDVI amplitude between maximum and minimum values reached 16.67% in the mosaic of evergreen lowland forest, swamp forest, and savanna (Phenoregion 22) and 39.07% in the mixed high and open forest with a tropical savanna climate (Phenoregion 25). In the alluvial dense evergreen forest domain in the low lands (Phenoregion 3), where Tapajos National Forest and Caxiuana National Forest are located, the NDVI amplitude reached 21.72% (table S1 available at stacks.iop.org/ERL/8/024011/mmedia). These results were similar to previous studies that used EVI (Samanta *et al* 2012, Myneni *et al* 2007, Huete *et al* 2006).



Figure 6. The Pearson correlation coefficient between NDVI and precipitation (a) without lag, (b) with one month lag, (c) with two month lag and (d) with three month lag. The black color corresponds to unclassified areas in the phenoregion map (see figure 1).

Our results showed a basin-wide phenological gradient delay between the southeast and northwest portions of four months for the start of the growing season and six months for the peak of growing season, when the forest reached the highest NDVI values at the middle-to-end of the wet season. This reveals that the phenological responses to climatic variation are heterogeneous across Amazonia. Based on our NDVI and field-based analysis we argue that the flush of new leaves does not occur simultaneously during the dry season across all Amazonian forest as previously stated (Samanta et al 2012, Myneni et al 2007, Saleska et al 2007, Huete et al 2006, Asner et al 2004). By combining the long-term NDVI time-series (26 years) with ground-based studies produced in the last 26 years, we highlighted that leaf flushing in the majority of Amazonia, as approximated by the NDVI, starts after the soil is fully recharged with water and incoming

radiation starts to increase after the peak of the wet season. This tendency is characterized in our data by a peak in the NDVI by the end of the rainy season. We demonstrated that the onset and end of the growing seasons in Amazonia cannot be considered to occur simultaneously throughout the basin from July to September. We showed a southeast–northwest direction gradient of rainy and dry seasons (figures 4 and 5). It was also possible to note a difference of five months in the peaks of the dry and wet seasons in the southeast–northwest direction and four months in the start of the growing season (September to December) in the west–east direction of the Amazon basin, which is in agreement with Marengo *et al* (2001).

It is interesting to note that in a large fraction of southern Amazonia, the growing season occurs almost exclusively during the wet season for a period of three months. In contrast,



Figure 7. The Pearson correlation coefficient between NDVI and incoming radiation (a) without lag, (b) with one month lag, (c) with two month lag and (d) with three month lag. The black color corresponds to unclassified areas in the phenoregion map (see figure 1).

in the northern, and wetter, fraction of the basin the growing season occurs during the transition between wet and dry seasons for a period of six months. The shorter time of the growing season in the south could be associated with a 'sprint' of greenness as an evolutionary strategy to reduce losses through herbivory during this susceptible phase of foliar development (Patino *et al* 2012, Moles and Westoby 2000). This 'sprint' of greenness could be either associated to the flushing of new leaves (Sinimbu *et al* 2012) or to the increased rate of leaf expansion (Brando *et al* 2010).

Previous studies of Amazonia greening tend to assume a dry season between July and October, concluding that Amazonia greens up during the dry season (Samanta *et al* 2012, Huete *et al* 2006, Xiao *et al* 2006). Therefore, due to the variability observed here in the timing of phenological phases and climatic gradient, more caution should be taken when linking climatic conditions with canopy phenology in Amazonia.

4. Conclusions

This work provided a critical understanding of the phenological mosaics in Amazonia and how they respond to climatic variability. The fundamental aspect of our methodology was the implementation of a pixel by pixel pattern recognition technique that could successfully identify the differences in the natural cycles of forest phenology. Our phenoregion map clearly distinguishes regions that were not detected in previous studies. This is probably because spatially pixels are spectrally similar but temporally they produce distinct responses to biotic and abiotic factors.

Differently from previous studies, using MODIS data, which generated contradictory results, creating an unresolvable debate (Saleska *et al* 2007, Asner and Alencar 2010, Samanta *et al* 2012, Atkinson *et al* 2011), our results added a new and independent perspective on the phenology of Amazonian forests. The coherent phenological patterns found

in our analysis are a result of the combination of the data characteristics and the methodological approach used. In spite of inherent limitations of optical remote sensing, in terms of saturation of NDVI signal over tropical canopies (Aragão et al 2005) and interference of clouds (Asner and Alencar 2010), it appears that, in particular, the length of the time-series allowed the detection of cyclical behavior in the AVHRR/NDVI data. This indicates that saturation of NDVI was not a problem for the analysis. Moreover, the identification of peak NDVI during the dry season in some areas and the wet season in other areas indicates that cloud cover is not a major factor influencing the seasonality of this dataset. Because our methodology explicitly distinguishes curves based on their shape and not their amplitude, the influence of NDVI saturation and potential cloud or aerosol interference is minimized.

Forest phenology is a complex process involving several environmental factors which enables similar vegetation types to develop distinct phenological cycles or, alternatively, different vegetation types to develop similar phenological cycles. For this reason we opted to compare the phenoregions with the main vegetation types on a macroscale.

Our results show that Amazon forest phenology is more heterogeneous than previously anticipated. To better understand the drivers of this heterogeneity it is critical to perform a formal evaluation of the contribution of other variables across the basin, including soil, geomorphology, vegetation and climatic information.

Acknowledgments

We would like to thank the National Research Council of Brazil (CNPq) for providing the PhD studentship to FBS and the Special Visiting Researcher Fellowship through the program Science Without Borders to LEOCA.

Author contributions

FBS, YES and LEOCA designed the experiment; FBS, GP, FC and EA processed the data; FBS, YES, LEOCA and LOA analyzed the results; FBS and LEOCA wrote the paper.

References

- Anderson L O, Aragão L E O C, Shimabukuro Y E, Almeida S and Huete A 2011 Fraction images for monitoring intra-annual phenology of different vegetation physiognomies in Amazonia Int. J. Remote Sens. 32 387–408
- Anderson L O, Malhi Y, Aragão L E O C, Ladle R, Arai E, Barbier N and Phillips O 2010 Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies *New Phytol.* 187 733–50
- Anhuf D and Winkler H 1999 Geographical and ecological settings of the Surumoni-crane-project (Upper Orinoco, Estado Amazonas, Venezuela) Anz. Abstr. 135 3–23
- Aragão L E O C, Shimabukuro Y E, Espirito-Santo F D B and Williams M 2005 Spatial validation of the collection 4 MODIS LAI product in eastern Amazonia *IEEE Trans. Geosci. Remote* Sens. 43 2526–34
- Aragão L E O C *et al* 2009 Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils *Biogeosciences* **12** 2759–78

- Arino O et al 2007 GlobCover: ESA service for global land cover from MERIS IGARSS 2007: IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium (New York: IEEE) pp 2412–5 (doi:10.1109/IGARSS.2007.4423328)
- Asner G P and Alencar A 2010 Drought impacts on the Amazon forest: the remote sensing perspective *New Phytol.* **187** 569–78
- Asner G P, Nepstad D, Cardinot G and Ray D 2004 Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborneimagein spectroscopy *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 101 6039–44
- Asner G P, Townsend A R and Braswell B H 2000 Satellite observation of El Niño effects on Amazon Forest phenology and productivity *Geophys. Res. Lett.* **27** 981–4
- Atkinson P M, Dash J and Jeganathan C 2011 Amazon vegetation greenness as measured by satellite sensors over the last decade *Geophys. Res. Lett.* 38 L19105
- Barbier E B, Burgess J C and Grainger A 2009 The forest transition: towards a more comprehensive theoretical framework *Land Use Policy* **27** 98–107
- Barbosa R I and Fearnside P M 1996 Carbon and nutrient flows in an Amazonian forest: fine litter production and composition at Apiaú, Roraima, Brazil *Trop. Ecol.* **37** 115–25
- Basset Y, Novotny V, Miller S E and Kitching R 2001 Short-term effects of canopy openness on insect herbivores in a rain forest in Guyana J. Appl. Ecol. 38 1045–58
- Batista G T, Shimabukuro Y E and Lawrence W T 1997 The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern Brazil using NOAA–AVHRR data *Int. J. Remote Sens.* 18 3195–210
- Boardman J W 1995 Analysis understanding and visualization of hyperspectral data as convex sets in *n*-space *Proc. SPIE* **2480** 14–22
- Bonal D, Sabatier D, Montpied P, Tremeaux D and Guehl J M 2000 Interspecific variability of δ 13C among trees in rainforests of French Guiana: functional groups and canopy integration *Oecologia* **124** 454–68
- Borchert R 1994 Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees *Ecology* **75** 1437–49
- Borchert R, Rivera G and Hagnauer W 2002 Modification of vegetative phenology in a tropical semi-deciduous forest by abnormal drought and rain *Biotropica* **34** 27–39
- Boubli J P 2005 Floristic, primary productivity and primate diversity in Amazonia: contrasting a eutrophic várzea forest and an oligotrophic caatinga forest in Brazil *Tropical Fruits* and Frugivores ed D J Lawrence and J P Boubli (Dordrecht: Kluwer Academic) pp 59–73
- Bradley A V, Gerard F F, Barbier N, Weedon G P, Anderson L O, Huntingford C, Aragão L E O C, Zelazowski P and Arai E 2011 Relationships between phenology, radiation, and precipitation in the Amazon region *Glob. Change Biol.* 17 2245–60
- Brando P M, Goetz S J, Baccini A, Nepstad D C, Beck P S A and Christman M C 2010 Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **107** 14685–90
- Brienen R J W and Zuidema P A 2005 Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: a test for six species using tree ring analysis *Oecologia* **146** 1–12
- Chave J *et al* 2010 Regional and seasonal patterns of litterfall in tropical South America *Biogeosciences* **7** 43–55
- Chen J, Jonssonc P, Tamurab M, Gua Z, Matsushitab B and Eklundh B 2004 A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter *Remote Sens. Environ.* 91 332–44
- Doughty C E and Goulden M L 2008 Seasonal patterns of tropical forest leaf area index and CO₂ exchange *J. Geophys. Res.* 113 G00B06

Eva H D *et al* 2003 The land cover map for South America in the year 2000 *GLC2000 Database* (Ispra: European Commission Joint Research Centre)

- Galvão L S, Santos J R, Roberts D A, Breunig F M, Toomey M and Moura Y M 2011 On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: a case study with MODIS and hyperspectral data *Remote Sens. Environ.* **115** 2350–9
- Gond V *et al* 2011 Broad-scale spatial pattern of forest landscape types in the Guiana Shield *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **13** 357–67

Gonsamo A, Chen J M, Price D T, Kurz W A and Wu C 2012 Land surface phenology from optical satellite measurement and CO₂ eddy covariance technique *J. Geophys. Res.* **117** G03032

Green A A, Berman M, Switzer P and Craig M D 1988 A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 26 65–74

Huber O 2006 Herbaceous ecosystems on the Guayana Shield, a regional overview *J. Biogeogr.* **33** 464–75

Huete A R, Didan K, Shimabukuro Y E, Ratana P, Saleska S R, Hutyra L R, Yang W, Nemani R R and Myneni R 2006 Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season *Geophys. Res. Lett.* 33 L06405

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) 2004 Mapa de Biomas do Brasil e o Mapa de Vegetação do Brasil (Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (available from www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/ 21052004biomashtml.shtm)

Jönsson P and Eklundh L 2002 Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **40** 1824–32

Juárez R I N, Hodnett M G, Fu R, Goulden M L and von Randow C 2007 Control of dry season evapotranspiration over the Amazonian forest as inferred from observations at a southern Amazon forest site J. Clim. 20 2827–39

Justiniano M J and Fredericksen T S 2000 Phenology of tree species in bolivian dry forests *Biotropica* **32** 276–81

Kruse F A, Lefkoff A B, Boardman J B, Heidebrecht K B, Shapiro A T, Barloon P J and Goetz A F H 1993 The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data *Remote Sens. Environ*. 44 145–63

Liebmann B and Marengo J A 2001 Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon basin *J. Clim.* **14** 4308–18

López R P and Zambrana-Torrelio C 2005 Representation of Andean dry ecoregions in the protected areas of Bolivia: the situation in relationto the new phytogeographical findings *Biodivers. Conserv.* **15** 2163–75

Maignan F, Bréon F-M, Bacour C, Demarty J and Poirson A 2008 Interannual vegetation phenology estimates from global AVHRR measurements: comparison with *in situ* data and applications *Remote Sens. Environ.* **112** 496–505

Malhado A C M, Costa M H, Lima F Z, Portilho K C and Figueiredo D N 2009 Seasonal leaf dynamics in an Amazonian tropical forest *Forest Ecol. Manag.* 258 1161–5

Marengo J A, Liebmann B, Kousky V E, Filizola N P and Wainer I C 2001 Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin *J. Clim.* **14** 833–52

Moles A T and Westoby M 2000 Do small leaves expand faster than large leaves, and do shorter expansion times reduce herbivore damage? *Oikos* **90** 517–24

Myneni R B et al 2007 Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforest Trans. R. Soc. 1498 1839–48

Nebel G, Dragsted J and Vega A S 2001 Litter fall, biomass and net primary production in flood plain forests in the Peruvian Amazon *Forest Ecol. Manag.* **150** 93–102 Norconk M A and Conklin-Brittain N L 2004 Variation on frugivory: the diet of Venezuelan white-faced sakis Int. J. Primat. 25 1–26

Panagos P, Jones A, Bosco C and Senthil Kumar P S 2011 European Digital Archive of Soil Maps (EuDASM): preserving important soil data for public free access *Int. J. Digital Earth* 4 434–43

Patino S, Fyllas N M, Baker T R, Paiva R, Quesada C A, Santos A J B and Lloyd J 2012 Coordination of physiological and structural traits in Amazon forest trees *Biogeosciences* 9 775–801

Peres C 1994 Primate responses to phenological change in Amazonian Terra Firme forest *Biotropica* **26** 98–112

Pinto L P and Setz E Z F 2004 Diet of Alouattabelzebul discolor in an Amazonian rain forest of northern MatoGrosso State, Brazil Int. J. Primat. 25 1197–211

Pinzon J, Brown M E and Tucker C J 2005 Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition *Hilbert–Huang Transform: Introduction and Applications* ed N E Huang and S S P Shen (Hackensack, NJ: World Scientific) pp 167–86

Quesada C A *et al* 2009 Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties *Biogeosci*. *Discuss.* **6** 3993–4057

Rangel J, Lowy P D, Aguilar M and Garzón A 1997 Tipos de vegetación en Colombia *Colombia: Diversidad Biótica II* ed J Rangel, P D Lowy and M Aguilar (Bogotá: Guadalupe) pp 89–382

Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O and Toomey M 2013 Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system Agric. Forest Meteorol. 169 156–73

Rodell M *et al* 2004 The global land data assimilation system *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **85** 381–94

Saatchi S S, Nelson B, Podest E and Holt J 2000 Mapping land cover types in the Amazon basin using 1 km JERS-1 mosaic Int. J. Remote Sens. 21 1201–34

Saleska S R, Didan K, Huete A R and Rocha H R 2007 Amazon forests green-up during 2005 drought *Science* **318** 612

Samanta A, Knyazikhin Y, Xu L, Dickinson R E, Fu R, Costa M H, Saatchi S S, Nemani R R and Myneni R B 2012 Seasonal changes in leaf area of Amazon forests from leaf flushing and abscission J. Geophys. Res. 117 G01015

Schafer J S, Holben B N, Eck T F, Yamasoe M A and Artaxo P 2002 Atmospheric effects on insolation in the Brazilian Amazon: observed modification of solar radiation by clouds and smoke and derived single scattering albedo of fire aerosols J. Geophys. Res. 107 8074

Selva E C, Couto E G, Johnson M S and Lehmann J 2007 Litterfall production and fluvial export in headwater catchments of the southern Amazon J. Trop. Ecol. 23 329–35

Selvaradjou S-K, Montanarella L, Spaargaren O and Dent D 2005 European Digital Archive of Soil Maps (EuDASM)—Soil Maps of Latin America and Caribbean Islands (EUR 21822 EN) (Luxembourg: Office of the Official Publications of the European Communities)

Silman M R 2007 Plant species diversity in Amazonian forests Tropical Rainforest Responses to Climatic Change ed M B Bush and J R Flenley (Chichester: Praxis Publishing) pp 269–94

Sinimbu G, Coley P D, Lemes M R, Lokvam J and Kursar T A 2012 Do the antiherbivore traits of expanding leaves in the Neotropical tree *Inga paraensis* (Fabaceae) vary with light availability? *Oecologia* 170 669–76

Sombroek W 2001 Spatial and temporal patterns of amazon rainfall: consequences for the planning of agricultural occupation and the protection of primary forests *Ambio* **30** 388–96

- Sternberg L D L 2001 Savanna-forest hysteresis in the tropics *Glob. Ecol. Biogeogr.* **10** 169–378
- ter Steege H *et al* 2006 Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia *Nature* **443** 444–7
- Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, Slayback D A, Pak E W, Mahoney D R, Vermote E F and Saleous N E 2005
 An extended AVHRR 8 km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data *Int. J. Remote Sens.* 26 4485–98
- van Schaik C P, Terborgh J W and Wright S J 1993 The phenology of tropical forests: adaptative significance and consequences for primary consumers *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **24** 353–77
- Wu C, Chen J M, Gonsamo A, Price D T, Black T A and Kurz W A 2012 Interannual variability of net carbon exchange

is related to the lag between theend-dates of net carbon uptake and photosynthesis: evidence from long records at two contrasting forest stands *Agric. Forest Meteorol.* **164** 29–38

- Xiao X, Hagen S, Zhang Q, Keller M and Moore B III 2006 Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images *Remote* Sens. Environ. 103 465–73
- Zhu Z, Bi J, Pan Y, Ganguly S, Anav A, Xu L, Samanta A, Piao S, Nemaniand R R and Myneni R B 2013 Global data sets of vegetation leaf area index (LAI)3g and fraction of photosynthetically active radiation (FPAR)3g derived from global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the period 1981 to 2011 *Remote Sens.* 5 927–48



Home Search Collections Journals About Contact us My IOPscience

Corrigendum: Large-scale heterogeneity of Amazonian phenology revealed from 26-year long AVHRR/NDVI time-series

This article has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text article. 2013 Environ. Res. Lett. 8 029502 (http://iopscience.iop.org/1748-9326/8/2/029502) View the table of contents for this issue, or go to the journal homepage for more

Download details: IP Address: 200.137.128.226 The article was downloaded on 21/08/2013 at 13:24

Please note that terms and conditions apply.

Environ. Res. Lett. 8 (2013) 029502 (2pp)

Corrigendum: Large-scale heterogeneity of Amazonian phenology revealed from 26-year long AVHRR/NDVI time-series

2013 Environ. Res. Lett. 8 024011

Fabrício B Silva¹, Yosio E Shimabukuro¹, Luiz E O C Aragão^{1,2}, Liana O Anderson^{1,3}, Gabriel Pereira¹, Franciele Cardozo¹ and Egídio Arai¹

¹ National Institute for Space Research, Avenida dos Astronautas 1758, São José dos Campos-SP, Brazil

² College of Life and Environmental Sciences, University of Exeter, Exeter EX4 4RJ, UK

³ Environmental Change Institute, University of Oxford, South Parks Road, Oxford OX1 3QY, UK

E-mail: fabricioagro@gmail.com and laragao@dsr.inpe.br

Received 3 May 2013 Accepted for publication 8 May 2013 Published 20 May 2013 Online at stacks.iop.org/ERL/8/029502

There is an error in figure 7; figure 7(a) is the same as figure 6(a). The corrected figure and caption are given below.

Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.



Figure 7. Pearson correlation coefficient between NDVI and incoming radiation (a) without lag, (b) with 1-month lag, (c) with 2-month lag and (d) with 3-month lag. The black color corresponds to unclassified areas in the phenoregion map (see figure 1).