MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.08.16.56-TDI

ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS MUDANÇAS DE BIOMASSA DA VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Christianne Riquetti Corsini

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Ana Paula Dutra de Aguiar, e Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão, aprovada em 24 de maio de 2018.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3R44PJP>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.08.16.56-TDI

ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS MUDANÇAS DE BIOMASSA DA VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Christianne Riquetti Corsini

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Ana Paula Dutra de Aguiar, e Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão, aprovada em 24 de maio de 2018.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3R44PJP>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Corsini, Christianne Riquetti.

C818a Análise multitemporal das mudanças de biomassa da vegetação secundária na Amazônia brasileira / Christianne Riquetti Corsini. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xx + 85 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.08.16.56-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Ana Paula Dutra de Aguiar, e Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão.

1. Biomassa. 2. Trajetórias. 3. Amazônia. 4. Radar. 5. TerraClass. 6. Emissões. I.Título.

CDU 504.7:528.8.044(811.3)

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.

Aluno (a): ***Christianne Riquetti Corsini***

Título: "ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS MUDANÇAS DE BIOMASSA DA VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA".

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

Ciência do Sistema Terrestre

Dr. Celso von Randow

Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Video - Conferência

Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

(X) Participação por Video - Conferência

Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão

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

( ) Participação por Video - Conferência

Dr. Marcos Longo

Convidado(a) / NASA / Pasadena - CA

(X) Participação por Video - Conferência

Dr. Alan de Brito

Convidado(a) / FUNDEP / Pampulha - MG

( ) Participação por Video - Conferência

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 24 de maio de 2018

Ao meu marido, Mateus, dedico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar e Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão. A paciência, confiança e o conhecimento de vocês foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigada! Gostaria de agradecer também ao Dr. Sassan Saatchi pela generosidade em me receber para o doutorado sanduíche na Iniversity of Califónia Los Antgeles, Estados Unidos, e compartilhar comigo seu conhecimento e experiência que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à CAPES, ao CNPq e à Rede Clima, pelo financiamento da pesquisa.

Ao grupo da Dra Ana Paula, por todo o suporte, em especial à Talita Assis que me "socorreu" em vários momentos, sempre de forma muito solícita. Agradeço também ao Dr. Luciano Vieira Dutra da divisão de Processamento digital de imagens (DPI) por sua importante contribuição no desenvolvimento da metodologia.

À coordenadoria do CCST pela infraestrutura e suporte. Em especial à coordenação de pós-graduação e às secretárias da pós graduação, e também a todo o corpo docente.

Agradeço aos meus amigos do CCST, em especial à turma de 2013, pelo companheirismo e solidariedade. A todos os amigos em geral que de alguma forma ajudaram a suportar os momentos de stress e desânimo.

Por fim, agradeço a toda minha família, em especial ao meu marido, Mateus, que compartilhou comigo todos os momentos dessa difícil caminhada, sempre me apoiando, encorajando e confortando.

Muito obrigada a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A regeneração da vegetação secundária em áreas desmatadas na Amazônia brasileira desempenha um papel importante no balanço de emissões, funcionando como um sumidouro dinâmico de carbono, e mitigando os impactos do desmatamento. O potencial para tal, entretanto, depende das taxas de crescimento desta vegetação no tempo, que vão refletir nos estoques de biomassa acumulado. Como esses estoques variam em relação aos estágios de regeneração e como a dinâmica da vegetação influencia nos padrões de cresciment, ainda é pouco compreendida. Para entender os padrões de acumulo de biomassa na vegetação secundária nos diferentes estágios de regeneração, foram utilizadas trajetórias de cobertura da terra com base nas classes 'pasto sujo, 'regeneração com pasto' e 'vegetação secundária' do sistema TerraClass e mapas multi-temporais de biomassa acima do solo (BAS) estimados a partir de dados de RADAR do PALSAR-ALOS. A partir destas informações, foi quantificado o crescimento da vegetação secundária em diferentes estágios de regeneração na Amazônia brasileira para os anos de 2007, 2008, 2009 e 2010. Como o crescimento da vegetação secundária é influenciada pelas condições ambientais, também foi testado como os estoques de biomassa variaram em função de diferentes intensidades de máximo déficit hídrico acumulado (MCWD) e com ocorrência de fogo. Os resultados mostraram que a combinação do modelo de trajetórias de classes de cobertura da terra com os mapas de biomassa foi consistente, uma vez que o padrão de BAS foi crescente da trajetória representaviva do início da regeneração (Tr1) até a trajetória de regeneração mais avançada (Tr7). A análise das mudanças inter-anuais de BAS dentro de cada trajetória mostrou o incremento anual potencial no processo de regeneração do 'pasto sujo' até a 'regeneração com pasto', ao passo que as trajetórias envolvendo a classe 'vegetação secundária' apresentaram redução de biomassa em algum dos períodos analisados. A estratificação da BAS nessas trajetórias em função dos níveis de MCWD e ocorrência de fogo revelou a magnitude do impacto deles sobre o acúmulo de biomassa, sugerindo que a umidade tem papel fundamental no processo de crescimento, ao passo que a ocorrência de fogo é o principal agente redutor do incremento. A análise das mudanças inter-anuais de BAS por classe de distúrbio revelou que o deficit hídrico foi o principal causador de perdas de biomassa nas vegetações mais avançadas, enquanto o fogo foi mais danoso nas vegetações secundárias mais jovens. No balanço final do carbono, as trajetórias envolvendo 'pasto sujo' e 'regeneração com pasto' não apresentaram influência significativa, funcionando apenas como parâmetro de crescimento. A vegetação secundária, por outro lado, mostrou grande potencial de impacto nas emissões, respondendo por mais de 80% dos valores encontrados no balanço final do carbono.

Palavras-chave: Biomassa. Trajetórias. Amazonia. Radar. TerraClass. Emissões

MULTI TEMPORAL ANALYSIS OF BIOMASS CHANGES IN SECONDARY VEGETATION IN THE BRAZILIAN AMAZON

ABSTRACT

The regrowth of secondary vegetation on deforested areas in the Brazilian Amazon plays an important role in the emissions balance, functioning as a dynamic carbon sink, and mitigating the impacts of deforestation. The potential for this, however, depends on the rates of vegetation growth over time, which will reflect in the accumulated biomass stocks. How these stocks vary in relation to the stages of regeneration and how the dynamics of vegetation influences growth patterns is still poorly understood. For understanding the patterns of carbon accumulation in secondary vegetation across different stages of regeneration, land cover trajectories based on the classes 'dirty pasture', 'regeneration with pasture' and 'secondary vegetation' of the TerraClass system and multi-temporal maps of above-ground biomass (BAS) estimated from the RADAR PALSAR-ALOS data were used. Based on these data, vegetation growth at different stages of regeneration in the Brazilian Amazon for the years 2007, 2008, 2009 and 2010 was quantified. As secondary vegetation growth is influenced by environmental conditions, it was also tested how the biomass stocks varied according to different intensities of maximum accumulated water deficit (MCWD) and of the occurrence of fire. The results showed that the combination of the trajectory model of land cover classes with the biomass maps was consistent. The estimated BAS increased from the trajectory representing the beginning of regeneration (Tr1) to the trajectory representing the most advanced regeneration stage (Tr7). The analysis of the inter-annual BAS changes within each trajectory showed the annual BAS increase from 'dirty pasture' to 'regeneration with pasture', while the trajectories involving the 'secondary vegetation' class presented a reduction in biomass in any of the periods analyzed. The stratification of BAS in these trajectories as a function of disturbance classes revealed the magnitude of their impact on the accumulation of biomass. The results suggested that water deficit plays a fundamental role in the growth process, whereas the occurrence of fire is the main agent constraining biomass increase throught time. The analysis of the inter-annual changes of BAS by classes of disturbance revealed that the water deficit was the main cause of biomass loss in the most advanced stages of vegetation regeneration, while fire was more damaging in the younger secondary vegetation. In the final carbon balance, the trajectories involving 'shurubby pasture' and 'regeneration with pasture' did not present significant influence, functioning only as a growth parameter. Secondary vegetation, on the other hand, showed great potential for impact on emissions, accounting for more than 80% of the values found in the final carbon balance.

Keywords: Biomass. Trajectories. Amazon. Radar. TerraClass. Emissions.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2. 1. Exemplo de possíveis trajetórias de uso da terra que se seguem ao desmatamento ou limpeza da área. 8
Figura 2. 2. Diferentes caminhos da dinâmica do carbono após o desmatamento. 12
Figura 3.1. Área de estudo. 19
Figura 3. 2. A. Mapa temático baseado no TerraClass 2004. B. Área ocupada por cada classe de cobertura. 23
Figura 3. 3. A. Mapa temático baseado no TerraClass 2008. B. Área ocupada por cada classe de cobertura 24
Figura 3. 4. A. Mapa temático baseado no TerraClass 2010. B. Área ocupada por cada classe de cobertura 24
Figura 4. 1. Gráfico mostrando as estatísticas para trajetórias (Tr) e testemunhos (Te). 47
Figura 4. 2. BAS acumulada em transições de 2 (A) e 4 anos (B). 48
Figura 4. 3. BAS acumulada em 4 anos (A) e 6 anos (B) de crescimento dentro da mesma classe. 49
Figura 4. 4. Valores de BAS média por trajetória em cada ano de análise. O eixo 'x' mostra as classes associadas a cada ano, em cada trajetória. 51
Figura 4. 5. Distribuição de frequências nas trajetórias em todos os anos. BAS foi dividida em 5 classes iguais, de acordo com a amplitude máxima em cada trajetória... 53
Figura 5. 1. Subdivisão da Amazônia brasileira em níveis de MCWD, além das áreas de ocorrência de fogo. 59
Figura 5. 2. Diferença percentual média entre as classes de déficit hídrico e de fogo e a classe 1 (MCWD = 0mm), em cada trajetória. 60
Figura 5. 3. Diferenças interanuais estratificadas por níveis de MCWD e ocorrência de fogo, em cada período de tempo 61

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 3. 1. Definições das classes de cobertura com base no projeto TerraClass. 20
Tabela 3. 2. Sequência das classes de cobertura da terra em cada trajetória e nas testemunhas. 22
Tabela 4. 1. Diferenças anuais de BAS média em todas as trajetórias, calculadas com base nos valores mostrados na Figura 4.6. Incrementos em valores de $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$... 52
Tabela 6. 1. Biomassa média e área de cada trajetória, em cada ano, que serviram de base para o cálculo da biomassa total em Tg..... 68
Tabela 6. 2. Mudanças interanuais da biomassa total, a partir da biomassa calculada na Tabela 6.1. O fator de conversão do Carbono usado foi de 50%. 68
Tabela A.1. Estatístics completas para todas as trajetórias e anos..... 84

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
BAS	Biomassa acima do solo
INPE/CRA	Centro Regional da Amazônia
CPATU	Embrapa Amazônia Oriental
CNPTIA	Embrapa Informática Agropecuária
MCWD	Máximo déficit hídrico acumulado

SUMÁRIO

Pág.

1. INTRODUÇÃO 1
1.1 Objetivos e hipótese da tese 4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6
2. 1 Vegetações secundáras na Amazônia Brasileira: formação, dinâmica e aspectos sócio-econômicos 6
2.2 Crescimento das vegetações secundárias 11
2.3 Impactos da vegetação secundaria no balanço das emissões do carbono 15
3. CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE TRAJETÓRIAS E DE BIOMASSA 18
3.1 Área de estudo 18
3.2 Mapa de trajetória de classe de cobertura da terra..... 20
3.2.1 Modelo conceitual 20
3.2.2 Metodologia..... 23
3.3.3 Mapas de Trajetorias 25
3.3 Mapas de biomassa acima do solo (BAS) 33
3.3.1 Base conceitual..... 33
3.3.2 Metodologia..... 34
3.3.3. Mapas de biomassa acima do solo (BAS) 41
4. BIOMASSA ACIMA DO SOLO EM DIFERENTES ESTÁGIOS DE REGENERAÇÃO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA 45
4.1 Metodologia..... 45
4.1.1 Padrão geral da BAS entre as trajetórias 45
4.1.2 Padrão de crescimento da BAS dentro das trajetórias..... 46
4.2 Resultados..... 47
4.2.1 Padrão geral da BAS nas trajetórias 47
4.2.2 Padrão de crescimento da BAS dentro das trajetórias..... 50
5. IMPACTOS DO DÉFICIT HÍDRICO E DO FOGO SOBRE O CRESCIMENTO DAS VEGETAÇÕES SECUNDÁRIAS 56
5.1. Metodologia..... 56
5.1.1 Subdivisão da área da Amazônia Brasileira em classes de intensidade de MCWD e de ocorrência de fogo..... 56
5.1.2. Estratificação da BAS das trajetórias de acordo com as classes obtidas em 5.1.1 57
5.1.3. Análise do impacto do MCWD e do fogo nas taxas de incremento das trajetórias 57
5.1.4 Analise das mudanças interanuais de BAS das trajetórias, por classe de intensidade de MCWD e de ocorrência de fogo..... 58
5.2. Resultados..... 58

5.2.1 . Subdivisão da Amazônia Brasileira em classes de intensidade de MCWD e de ocorrência de fogo 58
5.2.2. Estratificação da BAS das trajetórias de acordo com os níveis de MCWD e ocorrência de fogo. 59
5.2.3. Análise do impacto do MCWD e fogo nas taxas de incremento das trajetórias .. 60
5.2.4. Análise das mudanças interanuais de BAS por classe de intensidade de MCWD e de ocorrência de fogo 62
Discussão com base na literatura 64
6. ANÁLISE DO IMPACTO DA REGENERAÇÃO DAS VEGETAÇÕES NO BALANÇO DO CARBONO..... 67
6.1 Metodologia..... 67
6.2 Resultados..... 68
6.2.1 Variações interanuais da biomassa total e carbono 68
6.2.2 Incremento potencial na regeneração da vegetação 69
7. CONCLUSÕES 73
Síntese dos resultados..... 73
Questões metodológicas e trabalhos futuros 75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 78
ANEXO A 84

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica da vegetação secundária - crescimento, corte e regeneração - tem implicações no balanço de carbono, afetando a quantidade que é sequestrada da atmosfera e novamente liberada (NELSON et al., 2000). Na Amazônia Brasileira cerca de 20% das áreas desmatadas são abandonadas ou deixadas por um período em pousio (ALMEIDA et al., 2016), e nesse processo as vegetações entram em regeneração, exercendo a função de mitigar parcialmente os impactos do desmatamento e seus impactos no clima (GRACE et al, 2014; CHAZDON et al, 2016). Vegetações secundárias de 5 anos de idade resultam em 5% na compensação das emissões, enquanto que com 21 anos esse percentual sobe para 15% (AGUIAR et al., 2012). Por outro lado, quando ocorre a remoção dessas vegetações e queima dos seus resíduos ocorre a liberação desse carbono para a atmosfera (RAMANKUTTY et al., 2007; HOUGHTON et al., 2001).

As consequências da regeneração da floresta secundária para o ciclo global do carbono estão diretamente relacionadas ao potencial de crescimento da vegetação, em termos de acúmulo de biomassa por unidade de área (HOUGHTON et al., 2001). Dependendo da trajetória das mudanças da cobertura da terra após o desmatamento, a biomassa pode permanecer em estágios que não permitem o acúmulo de biomassa (exemplo: pastagens) ou re-acumular até níveis de floresta primária, dependendo da área e do tempo de que essa área permanece em processo de regeneração (RAMAKUTTY et al., 2007). O potencial de regeneração, por sua vez, está ligado à dinâmica da vegetação que impõe mudanças temporais resultando no aumento gradativo da complexidade estrutural, onde a direção da sucessão secundária acontece a partir de estágios mais simples, iniciais, com poucas espécies, baixa produtividade e menos biomassa, para estágios mais avançados de desenvolvimento (WALKER; CHAPIN, 1987; WHITTAKER et al., 1987). De acordo com Blatt et al. (2005), este processo é de fácil observação, mas difícil de ser quantificado.

Em geral, as taxas de acúmulo de biomassa das vegetações em regeneração são aceleradas nos primeiros anos (HOUGHTON et al., 2000). Os incrementos anuais são,

em media, de 4,1 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ até 10 anos, reduzindo subsequentemente para 1,2 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ em áreas com cerca de 40 anos (NEEFF; SANTOS, 2005; NEEF, 2005). Entretanto, essas estimativas podem variar substancialmente no espaço, uma vez que uma diversidade de ambientes co-existem na Amazônia, resultado de um grandiente de variáveis importantes no processo de crescimento, especialmente relacionados aos padrões de fertilidade e textura dos solos e clima (MORAN et al., 2000; MALHI et al., 2004; ZARIN et al., 2001; JOHNSON et al., 2000). Além disso, distúrbios tais como secas e incêndios florestais têm impactos no crescimento, afetando a quantidade de biomassa acumulada e as taxas de crescimento da vegetação ao longo do tempo. Por exemplo, áreas sujeitas a queimadas podem acumular 50% menos biomassa em 25 anos (ZARIN et al., 2005), ao mesmo tempo em que a ocorrência de secas severas reduzem a biomassa como uma resposta ao estresse hídrico (PHILLIPS et al., 2009; TOOMEY et al., 2011). De acordo com Trumbore (2015) detectar como a intensificação desses eventos (seca e fogo) afeta o crescimento das florestas é um grande desafio científico que requer a identificação de limiares a partir dos quais ocorre o rápido declínio da produtividade das florestas. Evidências da maior vulnerabilidade da vegetação às mudanças climáticas incluem aumento das taxas de mortalidade e sinergias com incêndios florestais (ALLEN, 2015). Assim, o potencial das vegetações secundárias como sumidouro de carbono depende de uma melhor compreensão sobre a sua resiliência e sobre as taxas de absorção de carbono e armazenamento na biomassa de florestas secundárias (PAN et al., 2011).

A mensuração do crescimento das vegetações secundárias na Amazônia brasileira, no entanto, ainda é pouco acurada, principalmente em função da falta de dados espacialmente explícitos de biomassa, na escala do bioma. O uso de imagens SAR, *synthetic aperture radar*, de sensores como o PALSAR (*Phased Array type L band SAR*) é, entre outras, uma técnica promissora de sensoriamento remoto para produzir mapas de biomassa (MITCHARD et al., 2009; ASNER et al, 2010; ENGLHART et al., 2011; SAATCHI et al., 2011; HAMDAN et al., 2014; THAPA et al., 2015). A agência de exploração espacial japonesa (*Japan Aerospace Exploration Agency* - JAXA) fornece mapas anuais de 2007 a 2010 provenientes de dados PALSAR ALOS em

resolução espacial de 25m, corrigidos geométrica e radiometricamente. Os pulsos de micro-ondas dos sistemas de RADAR, como o PALSAR ALOS, são insensíveis às condições metereológicas por conta do maior comprimento de onda, em torno de 23 cm e, por serem sistemas ativos, isto é, possuem sua própria fonte de energia, operam também à noite (JANSEN, 2009). Esses dados, portanto, constituem uma ferramenta potencial para quantificar estoques de carbono, bem como analisar o acumulo e perda de biomassa ao longo do tempo (THARPA et al., 2015). Tais processos de acúmulo e perda de biomassa, no entanto, estão atrelados às possiveis trajetórias das mudanças da cobertura da terra em uma região, que levam, por sua vez, ao surgimento ou supressão da vegetação secundaria após o desmatamento. Entender tais trajetórias requer um mapeamento multitemporal e esquemas de classificação adequados à realidade amazônica. Um esforço conjunto entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Centro Regional da Amazônia (INPE/CRA), com a Embrapa Amazônia Oriental (CPATU), e a Embrapa Informática Agropecuária (CNPTIA) resultou no projeto TerraClass (ALMEIDA et al., 2016). Este projeto monitora as mudanças de cobertura da terra na Amazônia Brasileira desde 2004 utilizando 11 classes de cobertura da terra que são classes decorrentes do processo de desmatamento da floresta original. Três das classes mapeadas podem ser relacionadas ao processo de regeneração: *pasto sujo, regeneração com pasto e vegetação secundária*. A definição dessas classes depende da proporção entre vegetação herbácea e vegetação arbórea, sendo que o pasto sujo tem a maior porporção de espécies herbáceas e a vegetação secundária apresenta a maior proporção de espécies arbóreas, dentre as três. Assim, cada uma delas, representa um estágio successional e suas próprias estruturas (LU et al., 2003) e capacidade de acumular biomassa. Dessa forma, a transição temporal entre essas classes, partindo das classes de menor biomassa potencial para as de maior, representa o processo de regeneração das vegetações em áreas desmatadas, onde ‘pasto sujo’ representa a classe anterior à ‘regeneração com pasto’, que por sua vez é anterior a ‘vegetação secundária’.

Esta tese portanto apresenta o desenvolvimento de uma rotina metodológica como uma estratégia para estudos de regeneração, utilizando a combinação de dados de trajetórias de cobertura da terra e mapas anuais de biomassa. A metodologia proposta permite

estimar os estoques de biomassa nessas vegetações e, a partir disso, explorar as diversas trajetórias de desenvolvimento da vegetação secundária, incluindo a modelagem do crescimento das vegetações secundárias, o acúmulo de biomassa potencial, a variação espacial destas áreas e o impacto das variações ambientais relativas à disponibilidade hídrica e de ocorrência de queimadas sobre o processo de crescimento em biomassa. Tendo em vista o potencial de impacto das vegetações secundárias no balanço global do carbono, é de suma importância esforços que visem a melhoria de modelos de crescimento e de dinâmica da vegetação. Modelos de crescimento que demonstrem os caminhos do carbono durante o processo de regeneração e as taxas de incremento no tempo podem levar a cálculos mais acurados do balanço do carbono, uma vez que o crescimento da vegetação secundária pode ser melhor representada nos modelos de emissões por desmatamento e mudanças de uso da terra.

1.1 Objetivos e hipótese da tese

Esta tese explora a hipótese de que trajetórias de cobertura da terra podem ser concebidas a partir das classes do TerraClass ‘pasto sujo’, ‘regeneração com pasto’ e ‘vegetação secundária’, de forma que as diferentes transições temporais entre elas retratrem os diferentes estágios de regeneração.

O objetivo principal deste trabalho é:

Quantificar o crescimento das vegetações secundárias na Amazônia Brasileira a partir de classses do TerraClass, contemplando a influência dos distúrbios na variabilidade dos estoques e incrementos em biomassa.

Para alcançar o objetivo geral, esta tese aborda seis objetivos específicos:

1. Desenvolver um modelo conceitual de trajetórias de mudança de cobertura na Amazônia Brasileira, que represente a formação de vegetação secundária em áreas abandonadas;
2. Calcular a biomassa acima do solo (BAS) na Amazônia brasileira a partir de imagens PALSAR-ALOS gerando mapas multi-temporais;

3. Aplicar uma abordagem metodológica com base na associação dos mapas derivados em 1 e 2 para estimar os estoques de biomassa em cada uma das trajetórias, afim de identificar os estágios de regeneração em relação à floresta primária; bem como os estoques de biomassa nas classes de cobertura da terra;
4. Mensurar as mudanças temporais da BAS média em cada trajetória;
5. Quantificar o impacto do fogo e déficit hídrico sobre o crescimento das vegetações secundárias;
6. Analisar o impacto da regeneração das vegetações nas áreas desmatadas na Amazônia brasileira no balaço de carbono.

Sendo assim, o Capitulo 2 apresenta a fundamentação teórica; o Capítulo 3 apresenta a área de estudo e a concepção dos materiais que serão usados nos capítulos 4 e 5: os mapas de biomassa e os mapas das trajetórias de cobertura da terra (objetivos 1 e 2). O Capítulo 4 apresenta a estimativa da biomassa acima do solo associada às trajetória e classes de cobertura da terra, bem com a análise das mudanças temporais (objetivos 3 e 4). O Capítulo 5 apresenta o impacto dos distúbios (fogo e déficit hídrico) sobre o crescimento da vegetação secundária, em termos de taxas de acúmulo e sobre os estoques de biomassa (objetivo 5). O Capítulo 6 apresenta a análise do impacto da regeneração das vegetações no balanço de Carbono (objetivo 6). Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões desta tese e as sugestões para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vegetações secundáras na Amazônia Brasileira: formação, dinâmica e aspectos sócio-econômicos

Brown e Lugo (1990) definiram a vegetação secundária como aquela formada a partir de distúrbios antrópicos na vegetação original, notadamente do desmatamento das florestas. A vegetação secundária, também denominada de floresta secundária, ou capoeiras, tem diversas funções relevantes à ecologia, além da fixação de carbono atmosférico, como a manutenção da biodiversidade e a recuperação da fertilidade do solo. Além disso, fornece recursos não madeireiros e desempenham um papel estrutural como corredores ecológicos entre os remanescentes cada vez mais fragmentados (BROWN; LUGO, 1990; SALIMON; BROWN, 2000).

Mello e Alves (2011) argumentaram que a sucessão secundária deve ser considerada como parte de um processo complexo que começa com o desmatamento da floresta primária, cuja evolução pode seguir uma variedade de trajetórias. Assim, as áreas de floresta são incorporadas nos processos produtivos como áreas de exploração florestal de recursos madeireiros e não madeireiros, como terras agrícolas e como pastagens. Nas duas últimas funções elas podem assumir a condição de capoeira, temporária ou definitivamente fora do processo de trabalho (COSTA, 2008). A proporção das áreas desmatadas que se tornam vegetação secundária apresenta uma distribuição espacial heterogênea que emergem de diferentes trajetórias de uso da terra na região Amazônica (ALMEIDA et al., 2010). A explicação se dá, em grande parte, devido à extensão da Amazônia brasileira que faz com que esta região seja um mosaico de muitos ambientes, não só físicos, mas também histórico-culturais e socioeconômicos (HURTIENNE, 2005), tendo uma influência associada aos agentes econômicos e às diferentes formas de uso da terra (D'ANTONA et al., 2006; PERZ; SKOLE, 2003b; ALMEIDA et al., 2007). Como agente econômico entende-se o tipo de produtor presente na área, e sua forma de produção na propriedade rural (ALMEIDA, 2009).

A dinâmica das vegetações secundárias está diretamente relacionada aos agentes econômicos que fazem uso da terra em diversos processos produtivos. Os processos

produtivos, por sua vez, estão pautados tanto em fatores biofísicos quanto socioeconômicos intrínsecos à região Amazônica, relacionados aos atores sociais envolvidos, leia-se população rural. A população rural inclui a tradicional (extrativistas, indígenas), pequenos agricultores, criadores de gado, produtores de grãos mecanizados e grandes empresas de diferentes setores (mineração, cosmético e florestal) que extraem e comercializam recursos naturais. Dependendo do sistema de produção esses atores empregam diferentes práticas (BECKER, 2004), podendo ou não incluir o uso de vegetação secundária, como parte do processo (PERZ; SKOLE, 2003a; COSTA, 2004; MELLO et al., 2011).

Segundo Martins (2005), a área é cultivada durante alguns anos em ciclos de cultivo com um breve período de pousio entre as safras. Quando sucede o declínio da fertilidade do solo ocorre o abandono da atividade agrícola e a área é deixada em pousio para a recuperação da fertilidade do solo. O pousio, então, representa um importante componente desse sistema uma vez que, a maioria da regeneração das vegetações secundárias ocorre nesse período (STEINIGER, 2000), em taxas que variam conforme características biofísicas da área, grau de degradação dos solos – influenciado pelo manejo e uso intensivo – bem como pelo próprio tempo de pousio.

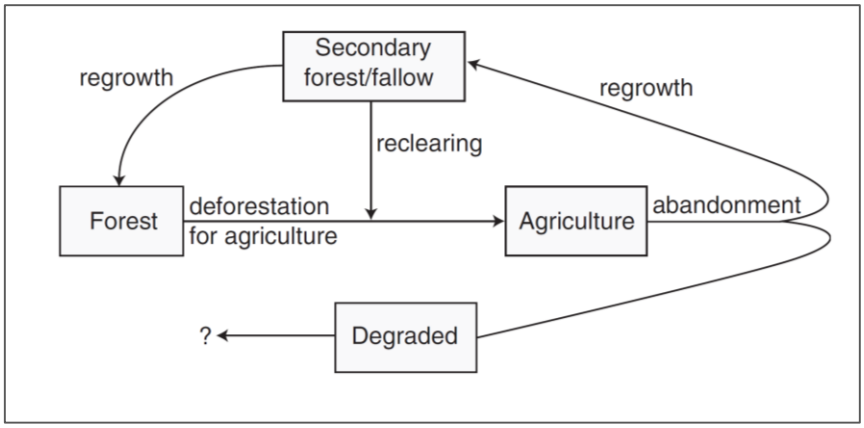
Outro processo de produção na Amazônia é a pecuária (ALVES et al., 2010). A pecuária na Amazônia pode ser vista como uma trajetória direta, quando o pasto é imediatamente implantado após o desmatamento, ou pode ser uma transição intermediária quando a pastagem se forma após a degradação do solo pelo uso agrícola, e nesse caso, tornar-se-ia um tipo de uso possível para o crescimento da vegetação secundária. Castro (2004), observando áreas utilizadas na pecuária extensiva de baixa tecnologia no Mato Grosso e Pará, notou que parte destas áreas eram abandonadas devido à exaustão do solo e entravam em processo de regeneração da vegetação por sucessão secundária.

Um modelo conceitual de possíveis trajetórias que envolvem a vegetação secundária foi proposto por Ramakutty et al (2007). Os tipos de usos que se pode fazer da terra na Amazônia brasileira - florestas, vegetação secundária, agricultura, solo degradado e a

pastagem - podem ser traduzidas pelo esquema da Figura 2.1. Segundo o autor, é crítico conhecer o quanto de terra se encontra em cada uso e por quanto tempo permanecem nesse uso. Vale ressaltar que a Figura 2.1 mostra uma representação básica, relacionada à vegetação secundária, visto que na Amazônia encontra-se uma ampla gama de atores sociais, em diversos setores da economia, envolvidos nas mudanças da paisagem.

Alves et al. (2007) realizaram um estudo nos estados do Mato Grosso, Pará e Rondônia e encontram indícios de um processo de intensificação de uso da terra ao verificar uma queda mais acentuada das terras produtivas não utilizáveis em regiões mais desmatadas, com base nos dados dos Censos Agropecuários de 1985 e 1995, além de uma queda na fração de terras representada por vegetação secundária. Nas áreas abandonadas pode ocorrer a regeneração da vegetação ou, também, a introdução da pecuária, visto que a produtividade agrícola não é mais possível devido à baixa fertilidade do solo. Neste caso, os pastos podem ser novamente abandonados e, consequentemente, ocorrer o recrescimento da vegetação.

Figura 2. 1. Exemplo de possíveis trajetórias de uso da terra que se seguem ao desmatamento ou limpeza da área.



Fonte: Ramankutty (2007).

Enfim, a diversidade de trajetórias de transição na Amazônia destaca a variabilidade espacial e temporal das áreas produtivas na paisagem, que tanto podem ser precursoras de determinado uso da terra, quanto o resultado final em determinado ponto no tempo (ALVES, 2002). Dessa forma, as variáveis caracterizam a dinâmica da vegetação

secundária são as características dos processos produtivos, como o tempo de pousio, taxa de recrescimento e extensão das áreas de rebrota. Condições biofísicas específicas de uma região, bem como fatores sociais também interferem nessas características (PERZ; SKOLE, 2003b).

Em se tratando da extensão das áreas de vegetação secundária, alguns estudos mostram que a disponibilidade de água no solo é determinante. Hirstch et al. (2004) desenvolveram um modelo para determinar o fluxo de carbono pelo desmatamento na Amazônia (CARLUC – Carbon and Land-use Change). Os autores concluíram que, em regiões da Amazônia com pouca variabilidade climática, o padrão de distribuição da vegetação secundária foi claramente associado à delimitação espacial dos solos úmidos. Assim, a contribuição da a rede hidrográfica é significativa em relação à extensão da vegetação secundária (ALMEIDA, 2009; ALMEIDA et al., 2009) além de proporcionar maior humidade nos solos, a sua presença é um fator indireto de ocupação da região pela população ribeirinha, que por sua vez, utiliza práticas agrícolas que propiciam a formação da vegetação secundária (MARTINS, 2005).

Analisando o percentual de área abandonada para crescimento da vegetação secundária, Almeida (2009) encontrou um valor de 131.873 Km^2, o que corresponde a um percentual de cerca de 19% da área desmatada no ano de 2008.. O valor encontrado neste estudo difere dos valores apresentados por Neeff et al., 2006 que encontrou cerca de 161.000 Km^2 para o ano de 2002, Lucas et al. (2000) que identificou 157.953 km^2 em 1992 e aproximou-se dos cerca de 140.000 Km^2 encontrados por Carreiras et al. (2006) em 2000. As diferenças encontradas podem ser explicadas pelos diferentes tipos de dados, datas e metodologias utilizadas. De acordo com o TerraClass 2014, em 2004 16.4% das áreas desmatadas tornaram-se vegetação secundária, 21,3% em 2008, 22,3%, 2010, 22,9% em 2012 e 22,8% em 2014.

A formação das vegetações secundárias, por outro lado, se pauta em decisões dos atores sociais envolvidos, que por sua vez se paugam em aspectos sociais e econômciso. Perz eWalker (2002) citaram seis delas: (i) a decisão de abandonar a propriedade (falência, custo de oportunidade); a decisão de abandonar uma parte da propriedade (devido à

degradação da terra); (iii) a decisão de deixar a terra em pousio por algum tempo (agricultura itinerante); (iv) a decisão de permitir a invasão de herbáceas nas terras produtivas (caso de algumas pastagens); (v) a decisão de abrir clareiras para exploração de madeira; (vi) a decisão de interromper o pousio para retomada da produção agrícola. As cinco primeiras favorecem o crescimento da vegetação secundária, enquanto que a última restringe-a.

Uma análise regionalizada da vegetação secundária na Amazônia realizada por Perz e Skole (2003b) mostrou que a expansão desta vegetação foi maior nas regiões produtivas mais antigas, seguidas pelas regiões de fronteira e regiões remotas. Parâmetros como densidade da população rural, uso de fertilizantes na cultura, grau de produtividade da terra e taxa de imigração variaram sistematicamente entre as regiões. Esses resultados monstraram que a idade da propriedade, bem como o grau de intensidade do uso do solo estão fortemente relacionados à formação da vegetação secundária.

Fatores como o tamanho da propriedade e as condições de mercado são determinantes para definir a natureza dos sistemas de rotação entre cultivos, floresta ou pastagem (D'ANTONA et al., 2006; ALVES et al, 2010). Nas pequenas fazendas, as áreas de cultivo são usadas até que os nutrientes do solo se esgotem, quando são então abandonadas por vários anos para que a vegetação da floresta possa acumular nutrientes. Em fazendas maiores, as condições de mercado da carne bovina ou de grãos podem determinar os padrões interanuais de uso de pastagem e cultivo, ou a frequência dos ciclos de pousio (ALVES et al, 2009).

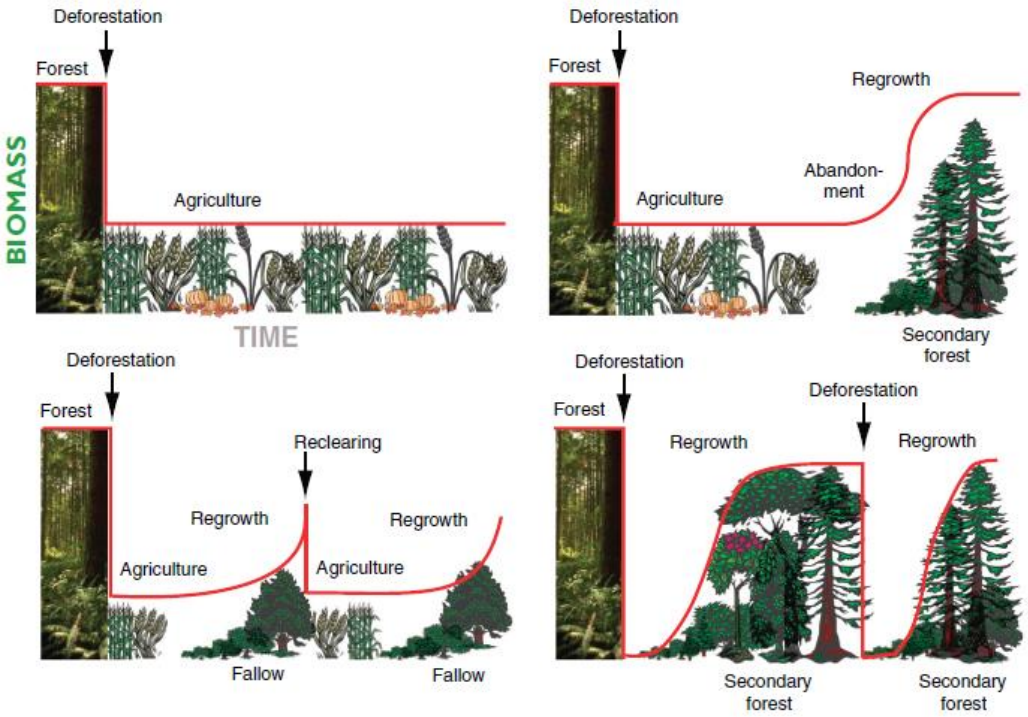
Outros estudos na região Amazônica mostraram que áreas com usos que exigem maior grau de mecanização e manejo têm menor área de vegetação secundária. As regiões que apresentam menor proporção de vegetação secundária são aquelas que apresentam cadeias produtivas como as da pecuária intensiva (ESCADA et al., 2005; AMÉRICO et al., 2008) e de grãos (MUELLER; BUSTAMENTE, 2002).

2.2 Crescimento das vegetações secundárias

A conversão das florestas tropicais para um sistema agrícola itinerante e a remoção da vegetação secundária têm contribuições significativas nas emissões globais de gases do efeito estufa. Por outro lado, a incorporação do carbono atmosférico na biomassa devido a regeneração da vegetação secundária exerce um papel importante na compensação de emissões do CO_2 (FEARNSIDE, 2000). Esse processo depende da quantidade do carbono atmosfério incorporado na biomassa da planta e as taxas com que isso acontece no tempo.

Ramankutty et al. (2007) explica que a biomassa, incorporada durante a regeneração da vegetação, pode permanecer em níveis menores que que os da floresta primária (caso da agricultura permatente), nível intermediário, quando relacionado a um sistema cíclico (no caso da agricultura itinerante), ou acumular biomassa novamente para quase o mesmo nível de antes do desmatamento (em o caso de abandono agrícola e rebrota, ou exploração madeireira e rebrota), mostrando como o tempo de pousio pode influenciar as taxas de absorção de carbono atmosférico. A ilustração da Figura 2.2 mostra o nível de biomassa em diferentes transições, ao longo do tempo.

Figura 2. 2. Diferentes caminhos da dinâmica do carbono após o desmatamento.



Fonte: Ramankutty et al. (2007).

De forma geral, o acúmulo de biomassa na vegetaçao em regeneração é afetado pela intensidade de uso do solo, que por sua vez está associado ao sistema produtivo e ao tipo de uso da terra, que alteram as propriedades biofísicas ligadas ao crescimento. Assim, o histórico de uso do solo, o tempo de pousio, os métodos de limpeza da área são fatores que podem diminuir a produtividade.

A curva de crescimento proposta por Houghton et al. (2000) estipula que a floresta recupera 70% da sua biomassa original em 25 anos e os outros 30% são recuperados nos 50 anos seguintes. Outro estudo sobre recrescimento da vegetação foi realizado por Lima et al (2011) na Amazônia Oriental por meio de imagens classificadas de satélite, para os anos de 2001, 2002, 2005 e 2009. Os resultados revelaram que o primeiro ano pós-desmate foi o que apresentou maior proporção de regeneração (20%), fato explicado pelos autores como devido ao uso menos intensivo da terra nos primeiros anos. No decorrer dos anos esta proporção diminuiu.

Fearnside (1996) já afirmava que a vegetação secundária advinda da agricultura itinerante cresce mais rápido do que aquela derivada de pasto. Em 2000, o mesmo autor confirmou essa tendência e explicou que, o abandono da agricultura itinerante para se implantar outro sistema produtivo tal como pastagem para gado, torna o tempo de pousio muitas vezes abreviado e/ou degrada os solos de tal forma que a vegetação volta a crescer cada vez mais lentamente, para um mesmo período de pousio. Silver et al. (2001) modelaram o crescimento da vegetação secundária com uma série de dados de 20 anos de incremento de biomassa em diferentes usos da terra em florestas tropicais. Os autores verificaram que houve uma taxa de crescimento maior nas áreas onde o uso anterior foi dominado por culturas agrícolas, em relação às áreas onde antes existiam pastagens.

De acordo com Malhi et al. (2002), a taxa de crescimento da vegetação está relacionada à variação dos fatores climáticos e edáficos em toda bacia Amazônica. Brown e Lugo (1982) já demostraram o papel da umidade e temperatura na taxa metabólica da planta, principalmente nos trópicos, onde o incremento da biomassa é maior do que em regiões secas. Estes autores compararam as taxas de estoque de carbono e a localização das florestas dentro de grupos classificados por meio de um sistema de classificação chamado Holdridge Life Zone. Como variáveis independentes, os autores usaram dados de temperatura e precipitação, resultando em seis grupos. Os resultados mostraram que picos de biomassa ocorreram nas zonas de florestas tropicais úmidas decrescendo exponencialmente nas zonas secas.

Dois importantes trabalhos que elucidaram a relação entre o Acúmulo de Biomassa Acima do Solo (ABAS) e os fatores climáticos e edáficos, em áreas que sofreram algum distúrbio, foram desenvolvidos por Jonhson et al. (2000) e Zarin et al., (2001). Jonhson et al. (2000) avaliaram acúmulo da biomassa acima do solo com dados de textura de solo e clima, no recrescimento da vegetação pós-distúrbio, numa escala mundial. Os autores encontraram resultados significativamente diferentes entre os solos arenosos e os argilosos e concluíram que as diferenças de clima e capacidade de retenção de umidade são os principais fatores que influenciam o crescimento da vegetação secundária. A influência da textura do solo sobre a produtividade pode estar relacionada

com umidade e/ou a disponibilidade de nutrientes, temperatura do solo, ou a capacidade de micróbios do solo para acessar e posteriormente mineralizar a matéria orgânica do solo, aumentando o teor dos nutrientes.

Já o estudo de Zarin et al. (2001), quantificou a importância do clima e da textura do solo na regeneração das florestas na Amazônia brasileira. Utilizando as mesmas premissas de Jonhson et al. (2000), os autores desenvolveram um estudo comparando o crescimento da vegetação secundária em dois estratos de solos: arenosos e não-arenosos, em locais caracterizados por histórico de distúrbios como agricultura itinerante e pastagem. Os resultados foram bastante similares aos de Johnson et al. (2000). Para a regeneração das florestas em solos não-arenosos o crescimento se manteve contínuo, enquanto que nos solos arenosos, tendeu a diminuir com o tempo.

Outro estudo sobre a regeneração da vegetação em áreas abandonadas foi realizado por Silver et al. (2001), em florestas tropicais do mundo todo. Os pesquisadores analisaram a relação entre o crescimento da floresta, com dados de 20 anos de acúmulo de biomassa, e parâmetros ambientais definidos em função de *Life Zones*. A classificação das zonas utilizou os índices de precipitação, como segue: *dry* (1000 mm/ano), *moist* (1000–2500 mm/ano) e *wet* (acima de 2500 mm/ano). Os resultados mostraram que, durante os primeiros 20 anos de recrescimento, florestas nas *wet zones* tiveram crescimento mais rápido, seguidas das florestas em *moist zones* e *dry zones*.

Moran et al. (2000) encontraram forte relação entre a fertilidade dos solos e as diferentes taxas de regeneração da vegetação. Os autores explicaram que a variabilidade inter-regional de crescimento na Amazônia pode ser explicada pela diferença entre a fertilidade dos solos, enquanto que a variabilidade intra-regional pode ser melhor explicada pelas diferenças entre os usos do solo. Orihuela-Belmonte et al. (2013) encontraram resultados similares, uma vez que a taxa de incremento de biomassa nas florestas secundárias tropicais foi correlacionada positivamente com a qualidade dos solos, e negativamente com o grau intensidade de uso da terra. Para o índice de qualidade dos solos os autores associaram as características químicas e físicas que

condicionam a fertilidade e a drenagem dos mesmos, sendo que solos mais férteis e com maior umidade propiciaram um recrescimento mais rápido das florestas.

Outro fator importante é a utilização do fogo como parte do sistema produtivo. Nogueira et al. (2005) analisando a estrutura e o estoque de biomassa de uma floresta secundária da região de Manaus concluíram que, dez anos após corte raso seguido de fogo, apenas 16% da biomassa original foi recuperada. Além disso demonstraram que para a floresta estudada retornar ao seu estoque original serão necessários mais 51 anos (da floresta primária). Gehring et al. (2005) realizaram um estudo na região central da Amazônia que descreveu a sucessão secundária em áreas agrícolas, onde se utiliza o corte e queima para limpeza do terreno. Os autores utilizaram 22 áreas com uma sequência cronológica de 2 a 25 anos de recrescimento e concluíram que, ao mesmo tempo em que ocorre rápido incremento de biomassa no primeiro ciclo de regeneração, existe alta degradação dos solos, reduzindo o crescimento ao longo dos anos.

2.3 Impactos da vegetação secundaria no balanço das emissões do carbono

Alguns estudos estimaram as emissões de CO_2 adivindos de mudanças de cobertura da terra, utilizando-se dados não espacializados, calculando-se as diferenças nos estoques de biomassas entre os anos com auxílio de mapas de biomassa e dados de desmatamento (De FRIES et al., 2002; ARCHARD et al., 2004; HARRIS et al., 2012). Nesses estudos, os pesquisadores consideraram o fluxo do carbono ao longo do tempo, para processos de desmatamento como um todo, sem compartimentar os cálculos entre os eventos que ocorrem na floresta primária e floresta secundária.

O modelo INPE-EM (AGUIAR et al., 2012), utiliza um componente específico para floresta secundária que emprega parâmetros particulares para demonstrar o impacto dessas vegetações no balanço do carbono. Na aplicação do modelo INPE-EM ao contexto Amazônico, os autores contabilizaram que as emissões de CO_2 na vegetação secundária foram 5% menor do que o valor encontrado no componente floresta primária, mostrando uma pequena contribuição do recrescimento no balanço final. Fernarside (1995) explica que a pequena diferença no balanço final, se deve ao fato de

que quase toda a absorção de carbono atmosférico resultante da regeneração da vegetação é compesada pelas emissões advindas da sua derrubada.

Houghton et al. (2001) mostraram que o fluxo anual de carbono do desmatamento e abandono das terras agrícolas na Amazônia brasileira foi uma fonte de cerca de 0,2 $PgC.ano^{-1}$ ao longo do período 1989 ± 1998. Os autores ainda estimaram que extração de madeira pode adicionar outros 5 ± 10% a essa estimativa e o fogo pode dobrar a magnitude das emissões nos anos seguintes a uma seca.

Hirsch et al. (2004) estimaram o fluxo líquido do carbono entre desmatamento e regeneração das florestas a partir de um modelo baseado em processo (CARLUC) e encontraram um valor de 0,35 $PgC.ano^{-1}$ in 1990, com um lançamento cumulativo de aproximadamente 7 PgC de 1970 to 1998.

Pan et al. (2011) estimaram uma fonte de 1,3 ± 0,7 $PgC.ano^{-1}$ em função de mudanças de uso da terra no trópicos, consistindo de uma emissão bruta pelo desmatamento de 2,9 ± 0,5 $PgC.ano^{-1}$, parcialmente compensada pela absorção do carbono durante a regeneração da vegetação secundária de 1,6 ± 0,5 $PgC.ano^{-1}$.

Baccini et al. (2012) calcularam as estimativas de emissões de carbono e encontraram um valor de assimilação de 0,48 $PgC.ano^{-1}$ pelas florestas secundárias consolidadas e 0,71 $PgC.ano^{-1}$ durante o pousio do sistema produtivo, compensando em parte as emissões brutas entre 2000 e 2010.

Em suma, o impacto do crescimento das vegetações secundárias pode ser positivo ou negativo de acordo com as taxas de incremento, que por sua vez dependem de fatores como histórico de uso e qualidade de sítio, e a ocorrência de distúrbios que, alem de limitar crescimento, pode ocasionar emissões diretas. Assim, a necessidade de estudos da dinâmica da vegetação secundária fica evidente quando se foca no seu papel regulador das emissões de CO_2 (AGUIAR et al., 2012).

De acordo com AGUIAR et al. (2016) a magnitude do sumidouro de carbono depende da redução a níveis mínimos do desmatamento de florestas primárias, da degradação e

da supressão da vegetação secundária. Ao mesmo tempo, a área florestal expandida e preservada também poderia desempenhar um importante papel no balanço das emissões, bem como na prestação de serviços ecossistêmicos, mantendo a diversidade genética e funcionamento hidrológico (Almeida et al., 2010).

3. CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE TRAJETÓRIAS E DE BIOMASSA

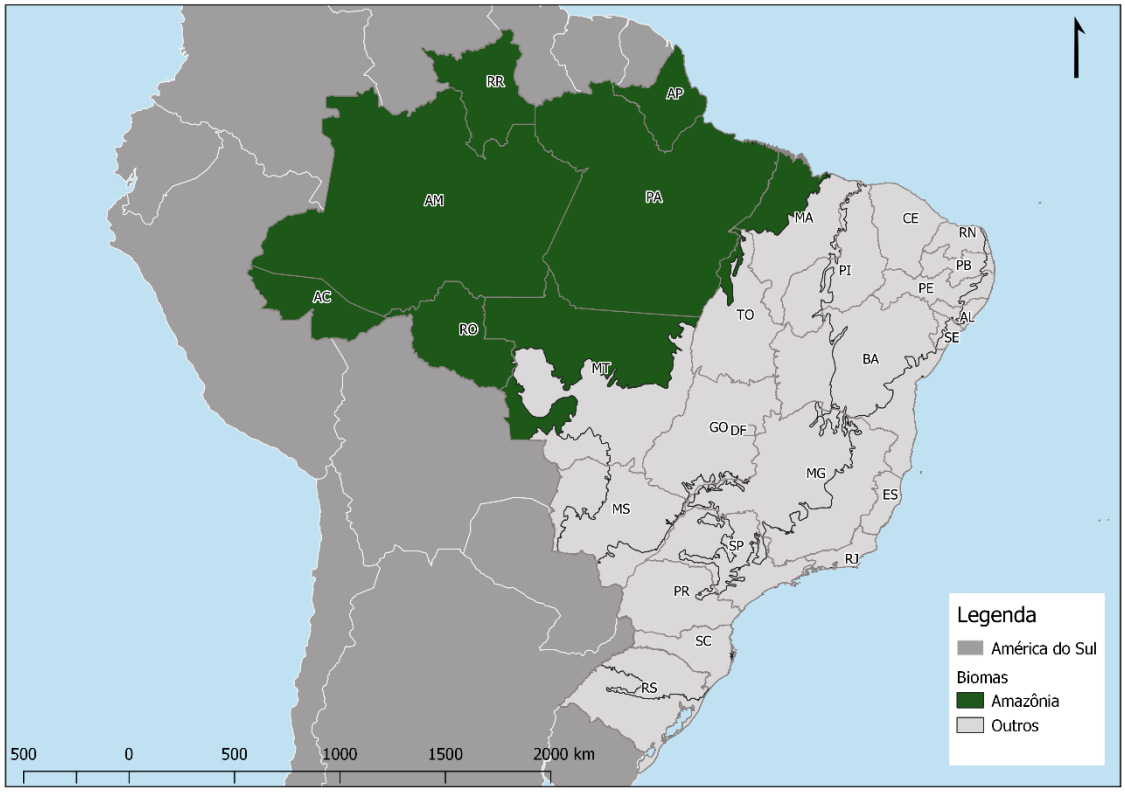
Neste capítulo são detalhadas a área de estudo (Seção 3.1), modelo conceitual e mapa de trajetórias (Seção 3.2) e o processo de conceção dos mapas de biomassa acima do solo (Seção 3.3). Os mapas produzidos nas seções 3.2 e 3.3 serão utilizados nas análises dos do capítulos 4.

3.1 Área de estudo

A área deste estudo refere-se à Amazônia brasileira, que se extende por uma área de 4.196.943 Km^2, correspondendo a 53% do território nacional, aproximadamente (IBGE, 2004). O bioma Amazônico é um conjunto de ecossistemas interligados pela Floresta Amazônica e pela Bacia Hidrográica do Rio Amazonas, a mais densa de todo o planeta. Este bioma caracteriza-se pela sua vasta extensão territorial, ocupando quase a metade do território do Brasil, além das áreas territoriais da Bolívia, Guiana, Guiana Francesa, Suriname, Peru, Colômbia, Venezuela e Equador (FIGUEIREDO, 2016). No Brasil o bioma Amazônia engloba os estados de do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e parte do Mato Grosso, Maranhão e Tocantins.

Este estudo focou nas áreas classificadas pelo sistema TerraClass (INPE, 2018) como ‘vegetação secundária’, ‘regeneração como pasto’ e ‘pasto sujo’. Estas classes apresentam algum nível de regeneração, conforme suas definições (Tabela 3.1). Brown e Lugo (1990) definiram a vegetação secundária como aquela formada a partir de distúrbios antrópicos na vegetação original. Nesse trabalho vegetações secundárias consistem em áreas originalmente florestadas que foram desmatadas (corte-raso), usadas para agricultura ou pecuária e depois deixadas para regenerar (ALMEIDA et al, 2016).

Figura 3.1. Área de estudo.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 3. 1. Definições das classes de cobertura com base no projeto TerraClass.

Classe de cobertura da terra	**Definição**
Pasto sujo	Áreas de pastagem em processo produtivo com predominância de forragem e cobertura herbácea entre 50% e 80% de cobertura associadas à presença de vegetação arbustiva com cobertura entre 20% e 50%.
Regeneração com pasto	Áreas que foram desmatadas, usadas como pastagem e estão no início de um processo regenerativo contendo arbustos e vegetação secundária precoce.
Vegetação secundária	Áreas desmatadas e em estágio avançado de regeneração com árvores e arbustos. Inclui áreas que foram utilizadas para silvicultura ou agricultura permanente com uso de espécies nativas ou exóticas.

Fonte: Almeida et al. (2016).

A seguir será mostrada a metodologia para concepção dos materiais que serão utilizados neste estudo. A secao 3.2 apresenta o processo de concepção do modelo de trajetórias derivado das classes de cobertura do projeto TerraClass de 2004, 2008 e 2010. A seção 3.3 apresenta o processo de cálculo dos mapas de BAS (biomassa acima do solo) para os anos de 2007, 2008, 2009 e 2010.

3.2 Mapa de trajetória de classe de cobertura da terra

3.2.1 Modelo conceitual

Alves at al. (2009) referem-se à sequência de mudanças na cobertura da terra, de florestas maduras a usos agrícolas e abandono, como uma trajetória de uso da terra. Dependendo da concepção dessas trajetórias, estas podem representar um determinado

processo, a partir da simulação da dinâmica de classes correlatas, estabelecidas no tempo e no espaço.

Na Amazônia brasileira, a dinâmica da vegetação secundária está diretamente associada aos processos produtivos que são empregados pelos diferentes atores sociais que agem na transformação a paisagem. A pecuária, por exemplo, pode representar uma trajetória direta ao desmatamento, ou pode ser uma transição intermediária, sendo substituída por outro uso, ou simplesmente ser abandonada. Neste caso, tornar-se um tipo de uso possível para o crescimento da vegetação secundária (ALVES et al., 2010).

O sistema TerraClass identifica duas classes de pasto que podem ser associadas a algum nível de regeneração, consoante suas definições: ‘pasto sujo’ e ‘regeneração com pasto’. Sendo assim, juntamente com a classe ‘vegetação secundária’ propriamente dita, essas classes podem representar variações sucecionais do processo de regeneração de áreas abandonadas, e compor um modelo de trajetórias que represente esse processo em termos de acúmulo de biomassa no tempo.

De acordo com o modelo de trajetórias de Ramankutty et al. (2007), a biomassa da vegetação em regeneração pode permanecer menor do que da floresta original, permanecer em algum nível intermediário associado à vegetação secundária, ou re-acumular ao mesmo nível de antes do desmatamento. Para representar o processo de regeneração por meio de trajetórias de cobertura da terra neste estudo, partiu-se da premissa que o pasto sujo é uma classe anterior à regeneração com pasto, que por sua vez é anterior à vegetação secundária. Assim, cada trajetória, dependendo da sequência temporal das classes, pode indicar a biomassa potencial acumulada, em um dado momento no tempo.

Apoiando-se nessa lógica, foram definidas sete trajetórias de cobertura da terra a partir das classes ‘pasto sujo’, ‘regeneração com pasto’ e ‘vegetação secundária’. Em cada trajetória, essas classes foram colocadas em uma sequência crescente de biomassa potencial (de acordo com a definição delas), usando mapeamento do TerraClass de 2004, 2008 e 2010. Em suma, *este estudo testou a hipótese de que as trajetórias representam uma sequência de acúmulo de biomassa na vegetação em regeneração que*

permeiam a paisagem amazônica, de acordo com a classe anterior e o tempo de regeneração.

Para verificar a consistência das trajetórias em relação à BAS e ajudar a interpretar os estágios de regeneração de cada uma, foram construídas duas trajetórias adicionais representadas pelas classes de 'Pasto limpo' e 'Floresta'. A classe de floresta foi definida como uma vegetação primária que não foi perturbada por disturbios climáticos ou antrópicos, e os pastos limpos foram definidos como pastagens produtivas com predominância de forragem, entre 90 e 100%, por diferentes espécies de herbácea, e portanto, nao apresentam nenhum tipo de regeneração natural (ALMEIDA et al., 2016). Tais trajetórias foram chamadas de testemunhas, representando os limiares mínimo (testemunha 1, formada por 'pasto limpo') e máximo (testemunha 2, formada por 'floresta') da biomassa que ocorre na Amazônia Brasileira. Assim, a testemunha 2 caracteriza o estágio de clímax do crescimento, representando o BAS máximo entre todas as demais trajetórias, e no outro extremo, a testemunha 1 caracteriza o mínimo de BAS devido a ausência de regeneração. As sete trajetórias propostas estão na Tabela 3.2. As trajetórias 1, 4 e 7 capturam diferentes estágios da mesma classe ao longo do tempo (Ps, Rp e Vs, respectivamente). As outras trajetórias registram mudanças de biomassa nas transições entre as classes, em 2 anos (2008/2010) ou 4 anos (2004/2008).

Tabela 3. 2. Sequência das classes de cobertura da terra em cada trajetória e nas testemunhas.

Trajetória / Testemunha	Classe 2004	Classe 2008	Classe 2010
Testemunha 1 (Te1)	Pl	Pl	Pl
Trajetória 1 (Tr1)	Ps	Ps	Ps
Trajetória 2 (Tr2)	Ps	Ps	Rp
Trajetória 3 (Tr3)	Ps	Rp	Rp
Trajetória 4 (Tr4)	Rp	Rp	Rp
Trajetória 5 (Tr5)	Rp	Rp	Vs
Trajetória 6 (Tr6)	Rp	Vs	Vs
Trajetória 7 (Tr7)	Vs	Vs	Vs
Testemunha 2 (Te2)	Fl	Fl	Fl

As classes estão identificadas por abreviação: Fl = Floresta (crescimento antigo); Vs = Vegetação secundária; Rp = Regeneração com pasto; Ps = Pasto sujo; Pl = Pasto limpo.

A partir da definição das trajetórias, foram gerados mapas para cada uma delas, como descrito na secao 3.2.2.

3.2.2 Metodologia

Foram utilizados mapas do TerraClass de 2004, 2008 e 2010 na resolução original de 30m x 30m, o sistema de projeção utilizado foi o SAD 69 / Brazil policônica (EPSG 29101). As classes pasto limpo (Pl), pasto sujo (Ps), regeneração com pasto (Rp), vegetação secundária (Vs) e floresta (F) foram reclassificadas para obtenção de mapas distintos para cada uma delas, resultando em 5 mapas para cada ano, no total de 15 mapas. As demais classes (‘agricultura anual’, ‘área não observada’, ‘área urbana’, ‘mineração’, ‘mosaico de ocupações’, ‘pasto com solo exposto’, ‘reflorestamento’, ‘outros’) foram excluídas da análise. Utilizando ferramentas de geoprocessamento, cada um desses mapas foi sobreposto ao outro de acordo com a trajetória ou testemunha representada. Dessa forma, cada célula do mapa representa um ponto de coincidência das classes entre os anos de 2004, 2008 e 2010, conforme sequência definida em cada trajetória ou testemunha.

Figura 3. 2. A. Mapa temático baseado no TerraClass 2004. B. Área ocupada por cada classe de cobertura.

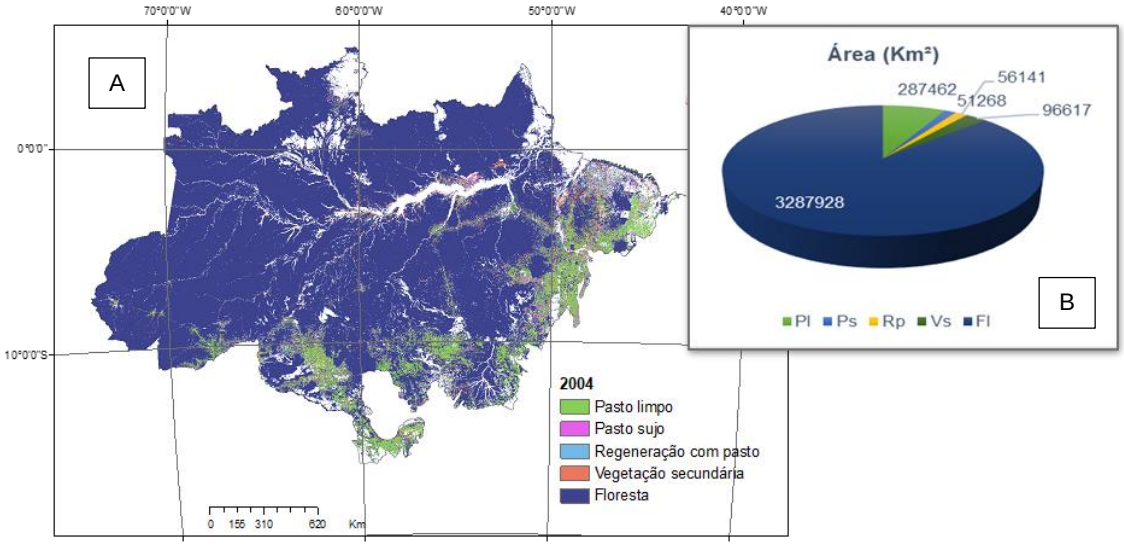


Figura 3. 3. A. Mapa temático baseado no TerraClass 2008. B. Área ocupada por cada classe de cobertura

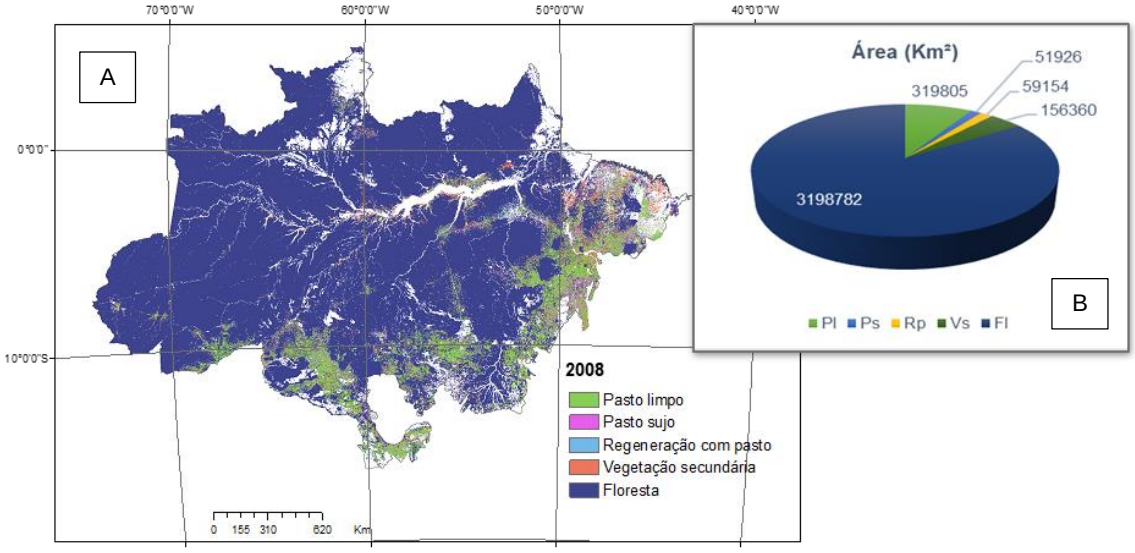
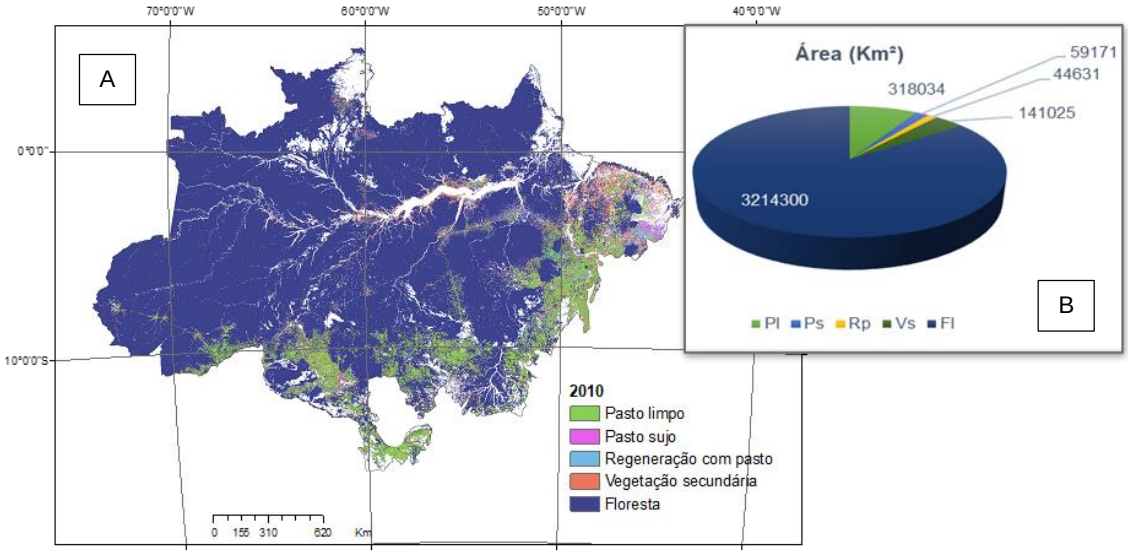


Figura 3. 4. A. Mapa temático baseado no TerraClass 2010. B. Área ocupada por cada classe de cobertura



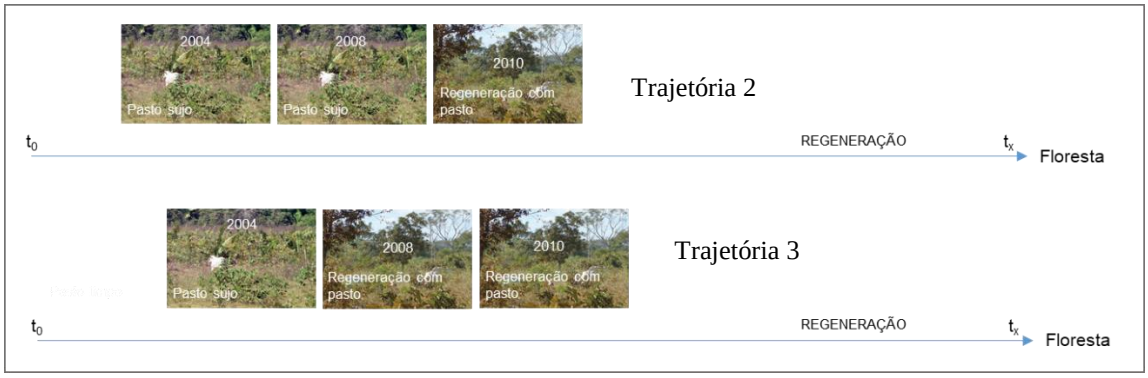
3.2.3 Mapas de Trajetorias

I. Trajetórias 2 e 3

As trajetórias 2 e 3 representam a transição entre pasto sujo e regeneração com pasto, em 2 anos e 4 anos, respectivamente. Ao contrário da testemunha 1 (Te1) onde espécies herbáceas predominam, nas trajetórias 2 e 3 a classe final (2010) é a 'regeneração com pasto', indicando uma mudança na estrutura da vegetação. Em relação à biomassa potencial, a trajetória 3 está em nível superior, visto que a classe 'regeneração com pasto' está há mais tempo na paisagem (4 anos) do que na trajetória 2 (2 anos) (Figuras 3.5).

De acordo com definição do TerraClass, a classe 'regeneração com pasto' representa estágios iniciais de vegetação secundária, representando o início da colonização por espécies arboreo-arbustivas. Esse processo promove mudanças na qualidade do sítio, favorecendo o surgimento de espécies de sucessão tardia, que dependem de sombra e micro-clima mais úmido (UHL, 1987). Ao mesmo tempo, ocorrem mudanças em relação à ocupação espacial dos indivíduos na área, mensuradas em função de parâmetros como densidade (número de indivíduos/área) e dominância (soma de área basal por hectare) (SCOLFORO, 1998). Assim, as trajetórias 2 e 3 indicam a evolução do processo de regeneração à medida que existe um incremento progressivo de espécies arborea-arbustivas, aumentando a contribuição do sub-bosque na biomassa. A área ocupada pela trajetória 2 foi de 935 Km^2 e da trajetória 3 de 1733.7 Km^2. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram a concentração das áreas ocupadas pela trajetória 2 e 3, respectivamente.

Figura 3. 5. Representação esquemática do processo de regeneração das trajetórias 2 e 3.



t_0 = tempo inicial do processo de regeneração; t_x = tempo final até regeneração total (Floresta).

Figura 3. 6. Densidade das áreas ocupadas pela trajetória 2. Células em 100m x 100m.

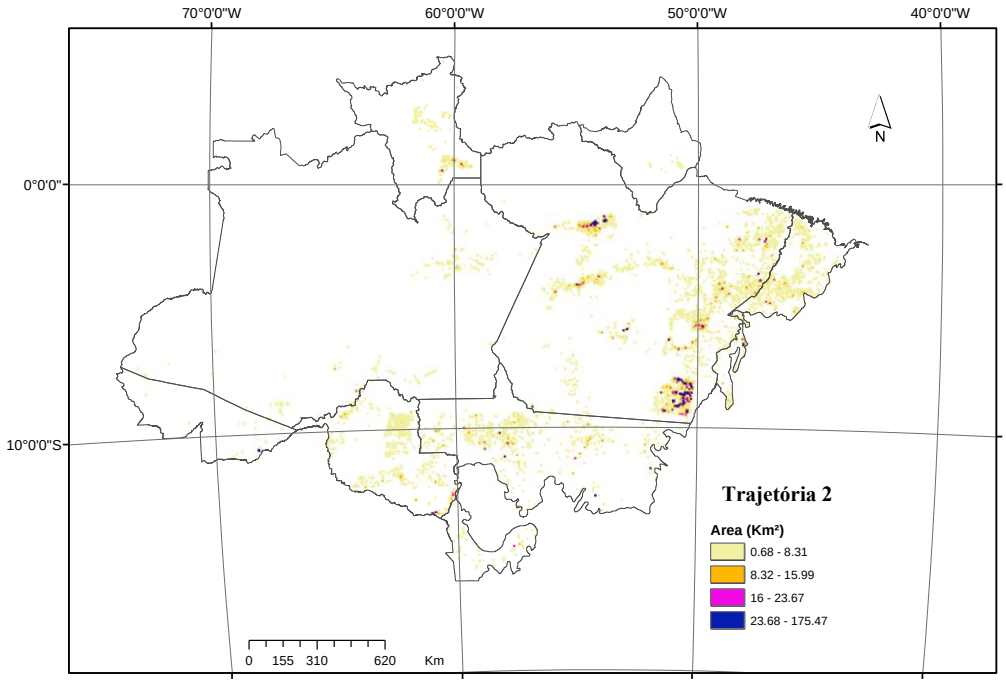
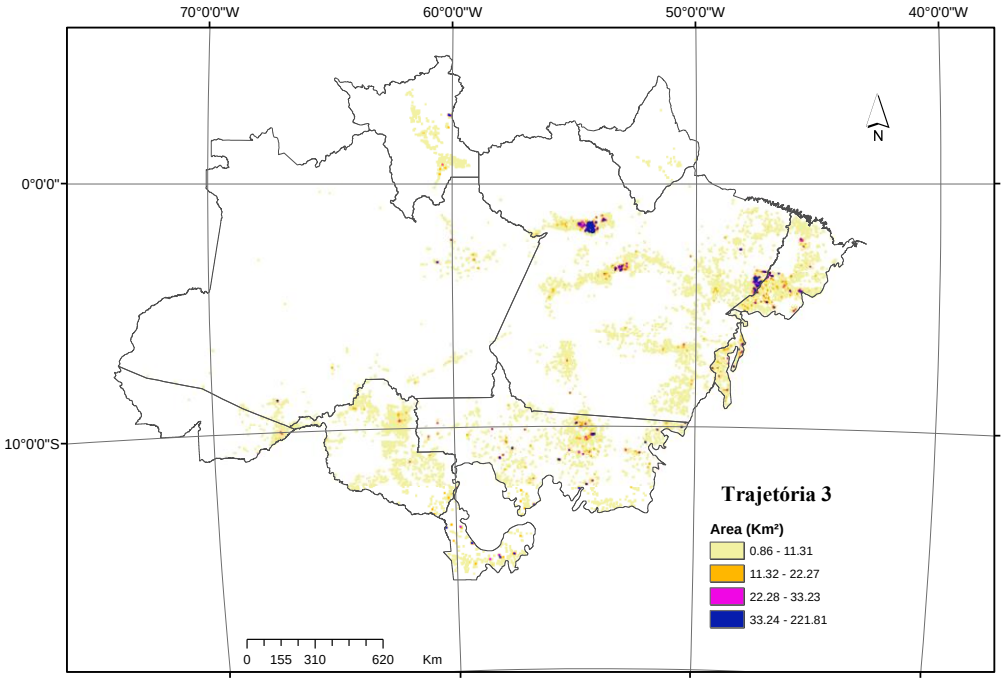


Figura 3.7. Densidade das áreas ocupadas pela trajetória 3. Células em 100m x 100m.



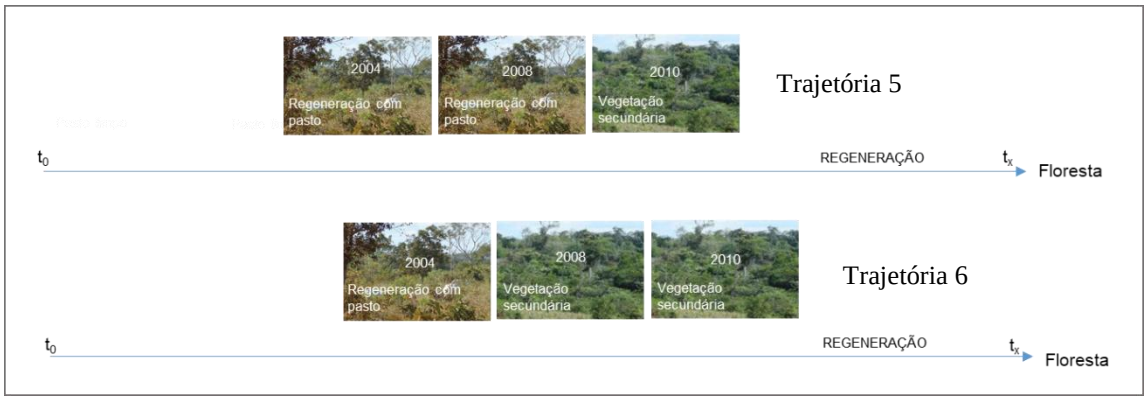
II. Trajetórias 5 e 6

Trajetórias 5 e 6 mostram a transição entre regeneração com pasto e vegetação secundária em 2 e 4 anos, respectivamente. Esta é uma mudança significativa no processo de regeneração, visto nessas trajetórias prevalecem espécies arbóreas.

Obsevando a linha temporal das mudanças (Figura 3.8) é possível inferir que a biomassa potencial da trajetória 6 é maior do que em 5. Essas são trajetórias que representam estágios iniciais da vegetação secundária, com mais biomassa acumulada e mais avançadas no tempo de regeneração (t_x), em comparação com as anteriores. No processo de sucessão de vegetações arboreo-arbustivas para florestas jovens ocorre o aumento dos estratos verticais, determinados pela proporçao entre espécies dominantes, intermediárias e dominadas (SCOLFORO, 1998). Nesse contexto, as diferenças estruturais se tornam mais intensas em relação às trajetórias 2 e 3, e à medida que o processo de regeneração avança, a proporção de espécies dominantes torna-se maior, aumentando a contribuição do dossel na biomassa total.

A trajetória 5 apresentou uma área de 1505,05 Km^2 e a trajetória 6, 14256,06 Km^2. As Figuras 3.9 e 3.10 mostram a concentração das áreas ocupadas pela trajetória 5 e 6, respectivamente.

Figura 3. 8 Representação esquemática do processo de regeneração das trajetórias 5 e 6.



t_0 = tempo inicial do processo de regeneração; t_x = tempo final até regeneração a patamares de floresta original.

Figura 3. 9. Densidade das áreas ocupadas pela trajetória 5. Células em 100m x 100m.

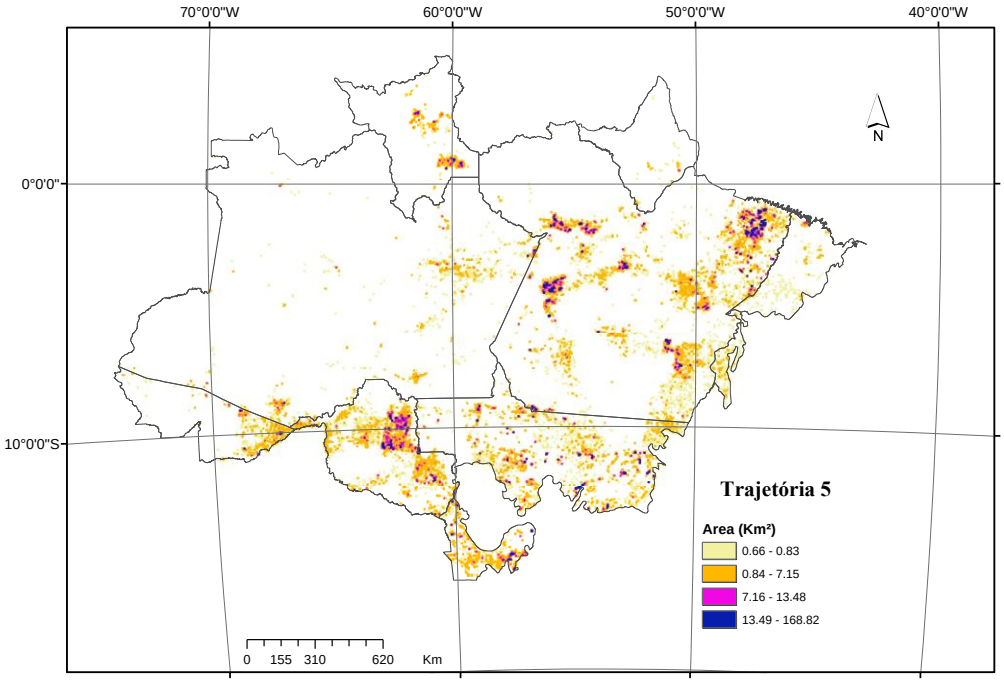
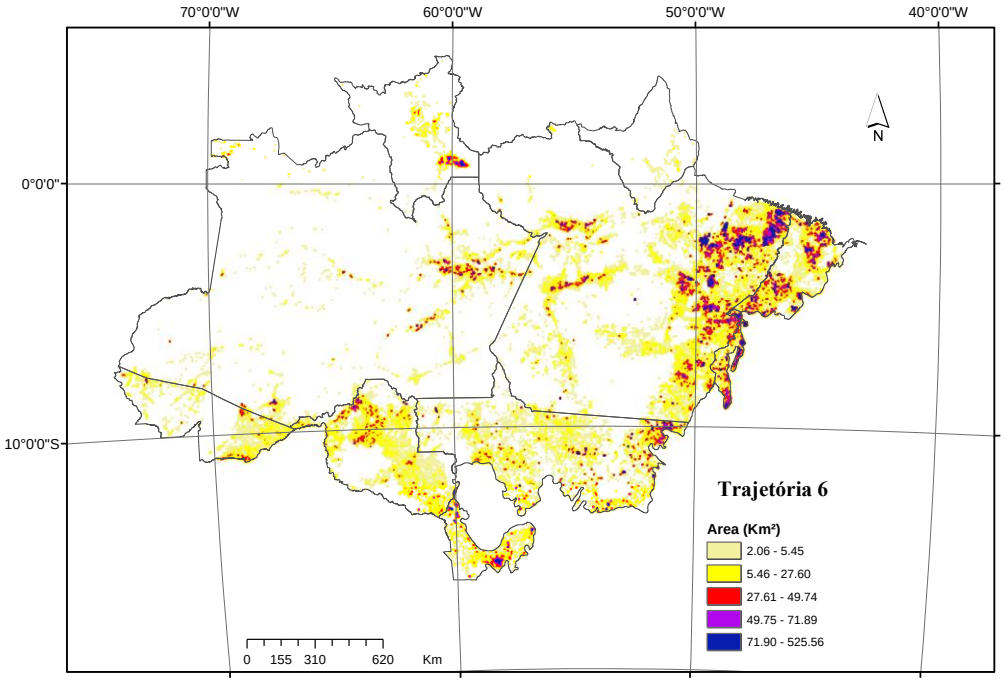


Figura 3. 10. Densidade das áreas ocupadas pela trajetória 6. Células em 100m x 100m.



III. Trajetórias 1, 4 e 7

Nestas trajetórias não ocorrem transições entre classe, mas elas mostram a evolução do crescimento da mesma classe entre 2004 e 2010. A Trajetória 1 mostra a evolução do pasto sujo, trajetória 4, da regeneração com pasto e a trajetória 7, da vegetação secundária.

No caso da trajetória 1, áreas há seis anos (2004-2010) classificadas como pasto sujo, pode indicar que essas áreas estão em processo produtivo ou foram abandonadas. Na primeira opção, a dinâmica da regeneração não estaria ocorrendo, e portanto o ganho em biomassa seria mínimo ou estagnado no tempo. Na segunda opção, essas áreas estão em regeneração, porém em locais que não favorecem o crescimento da vegetação, retardando a transição para outras classes. Esta trajetória é considerada neste estudo com o primeiro estágio de regeneração a partir de pastos abandonados, e está em nível inferior à trajetória 2, que apresentou transição para regeneração com pasto entre 2008 e 2010.

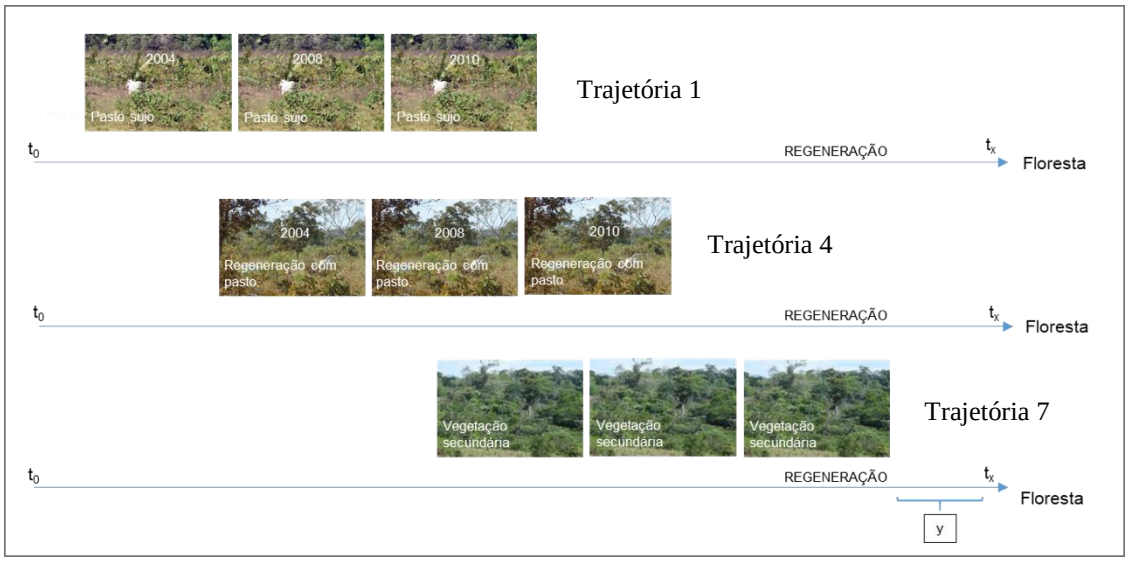
O mesmo raciocínio se aplica à trajetória 4, onde a regeneração também ocorre de forma mais lenta, visto que estas áreas estão há pelo menos 6 anos como ‘regeneraçao com pasto’, sem mudanças entruturais suficientes para se converter em vegetação secundária (de acordo com o sistema TerraClass). Diversos fatores podem retardar o crescimento das vegetações, tais como o histórico do uso da terra, os distúrbios, e o ambiente, que interagem em complexos caminhos que irão determinar os processos de recuperação da vegetação local (OLIVEIRA; SILVA JUNIOR, 2011). Em termos de biomassa potencial, o estágio da trajetória 4 está entre a trajetória 3 (o pasto sujo muda pra regeneração com pasto há entre 2008 e 2010) e a trajetóra 5 (a regeneração com pasto muda para vegetação secundára entre 2008 e 2010).

Já a trajetória 7 está em último estágio de regeneração em relação à todas as trajetórias, pois representam a vegetação secundária desde 2004. À idade delas em 2010 (6 anos), soma-se os anos correspondentes às transições prévias que ocorrem desde ‘pasto sujo’, de acordo com a descrição das trajetórias anteriores. Como não se sabe o ano a partir do qual essas vegetações sofreram transição de classes (isto é, sua idade), as mesmas podem estar vários estágios de desenvolvimento. Contudo, a sucessão secundária avançada representa a transição para níveis estruturais de floresta madura, o que inclui a redução do sub-bosque e a dominância de espécies arbóreas maiores (MORAN et al., 2000).

Neste contexto, a trajetória 7 se mostra mais próxima da floresta original na linha temporal da regeneração (Figura 3.11). Entretanto, não é possível presumir o valor de ‘y’ (tempo de regeneração até atingir o patamar de biomassa da floresta primária), já que a máscara do Prodes aplicada ao mapeamento do TerraClass não permite a definiçao de trajetórias que mostrem a transição entre a classe ‘vegetação secundária’ e a classe ‘floresta’.

A área ocupada pela trajetória 1 foi de 1706,15 Km^2, da trajetória 4, 1999,35 Km^2, enquanto a trajetória 4 ocupou 56038.9 Km^2.

Figura 3. 11. Representação esquemática do processo de regeneração das trajetórias 1, 4 e 7.



t_0 = tempo inicial do processo de regeneração; t_x = tempo final até regeneração total (Biomassa semelhante à Floresta).

Figura 3. 12. Densidade das áreas ocupadas pela trajetória 1. Células em 100m x 100m.

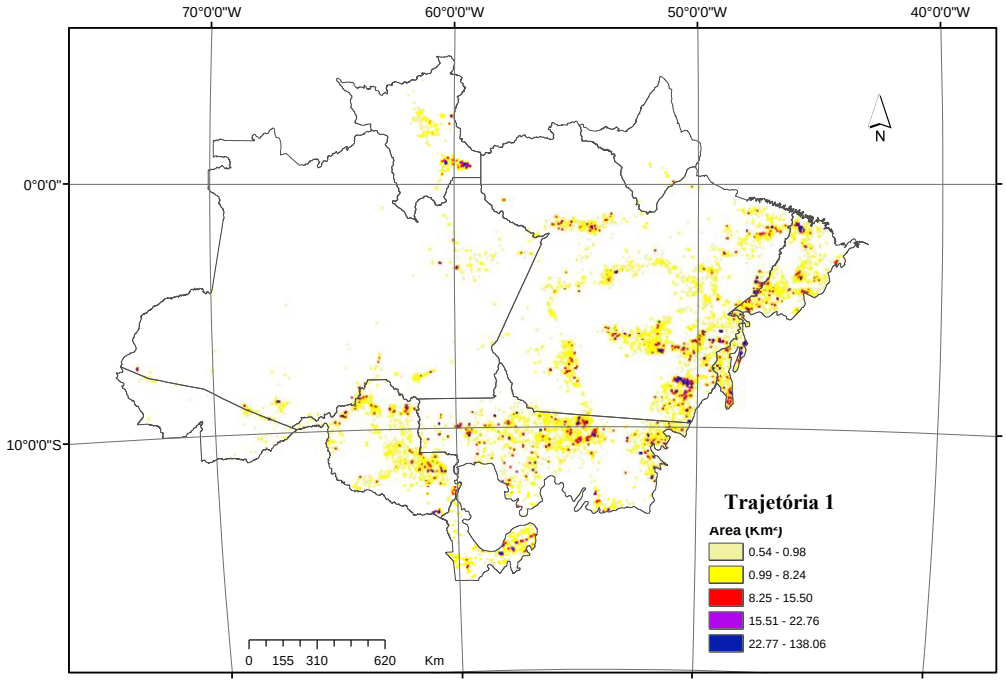


Figura 3. 13. Densidade das áreas ocupadas pela trajetória 4. Células em 100m x 100m.

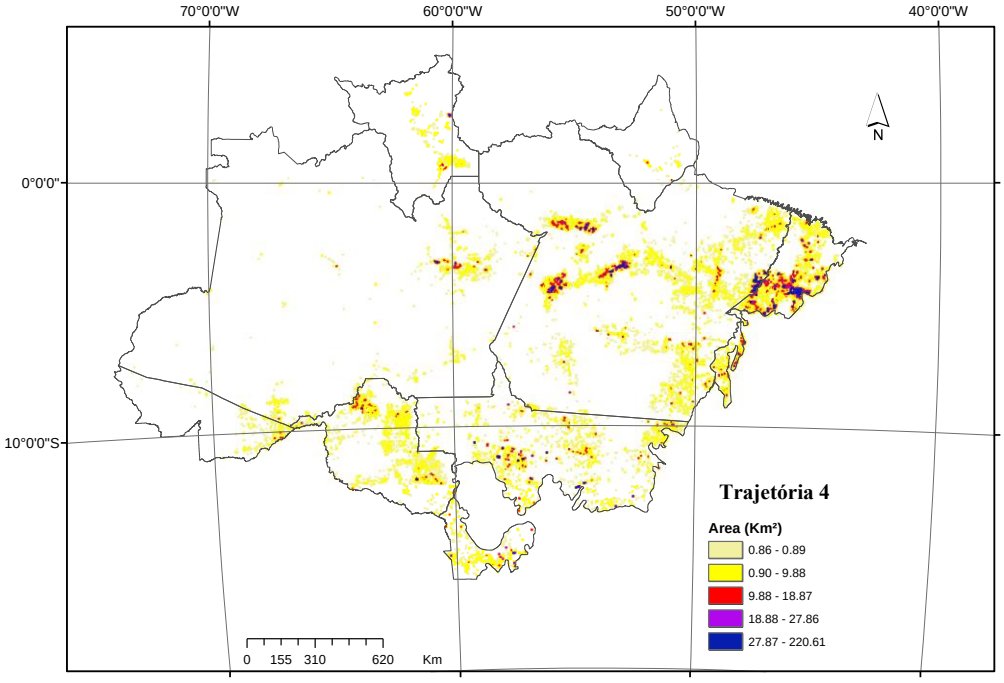
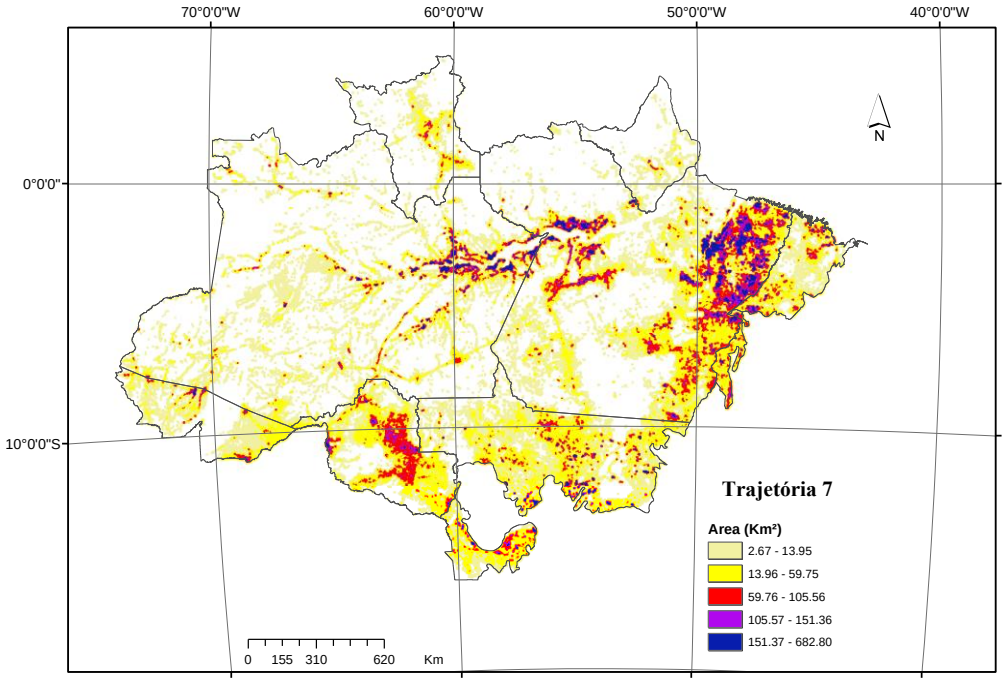


Figura 3. 14. Densidade das áreas ocupadas pela trajetória 7. Células em 100m x 100m.



As premissas referentes ao comportamento da BAS nas trajetórias, fundamentadas a partir das definições de cada classe, bem como nos conceitos de sucessão e comunidade florestais, serão corroboradas com a estimativa de biomassa de cada trajetória (Capitulo 4), estimada com base em mapas de biomassa gerados de acordo com a metodologia descrita na seção 3.3.

3.3 Mapas de biomassa acima do solo (BAS)

3.3.1 Base conceitual

O satélite avançado de observação da terra (*Japan's Advanced Land Observing Satellite* (ALOS)), que é o maior satélite desenvolvido no Japão, foi lançado pela Agência de Exploração Espacial Japonesa (JAXA) em 24 de janeiro de 2006. O ALOS transporta três instrumentos de sensoriamento remoto, entre eles o *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR). PALSAR é um instrumento totalmente polarimétrico, que opera em banda L com Frequência central de 1270 MHz (23.6 cm). Um dos produtos consiste em duas bandas polarimétricas em direções HV

(horizontal/vertical) e HH (horizontal/horizontal), com resolução espacial de 25 m, geométrica e radiometricamente corrigidos e normalizados para topografia (HANDAN et al., 2014).

Geralmente, as superfícies vegetais que contêm estruturas mais complexas e com maior BAS apresentam maior sinal de retorno, devido às múltiplas fontes de espalhamento (VAN DER SANDEN, 1997; JONES; VAUGHAN, 2010). Assim, o retroespalhamento do sensor é sensível a variações na estrutura da vegetação, como o estágio sucessional, pois influencia o mecanismo de dispersão (IMHOFF, 1995; LUCAS et al., 2010). Assim, a dispersão reversa é alta e ocasiona saturação do radar em áreas de vegetações densas e ricas em biomassa (GIBBS et al., 2007; MAGNUSSON et al., 2007). Diversos estudos estimaram a sensibilidade da biomassa do retroespalhamento da banda L na mensuração da biomassa e encontraram valores variando entre 75 e 150 $Mg.ha^{-1}$ (CARTUS et al, 2012; NEUMANN et al., 2012; MERMOZ et al., 2015; ROBINSON et al., 2013). A despeito disso, Mermonz et al. (2015) alegaram que a banda L não perde inteiramente a sensibilidade em áras de alta biomassa e propõem o uso de fontes independentes de informação, tais como mapas de cobertura da terra, como máscara sobre áreas vegetacionais densas.

3.3.2 Metodologia

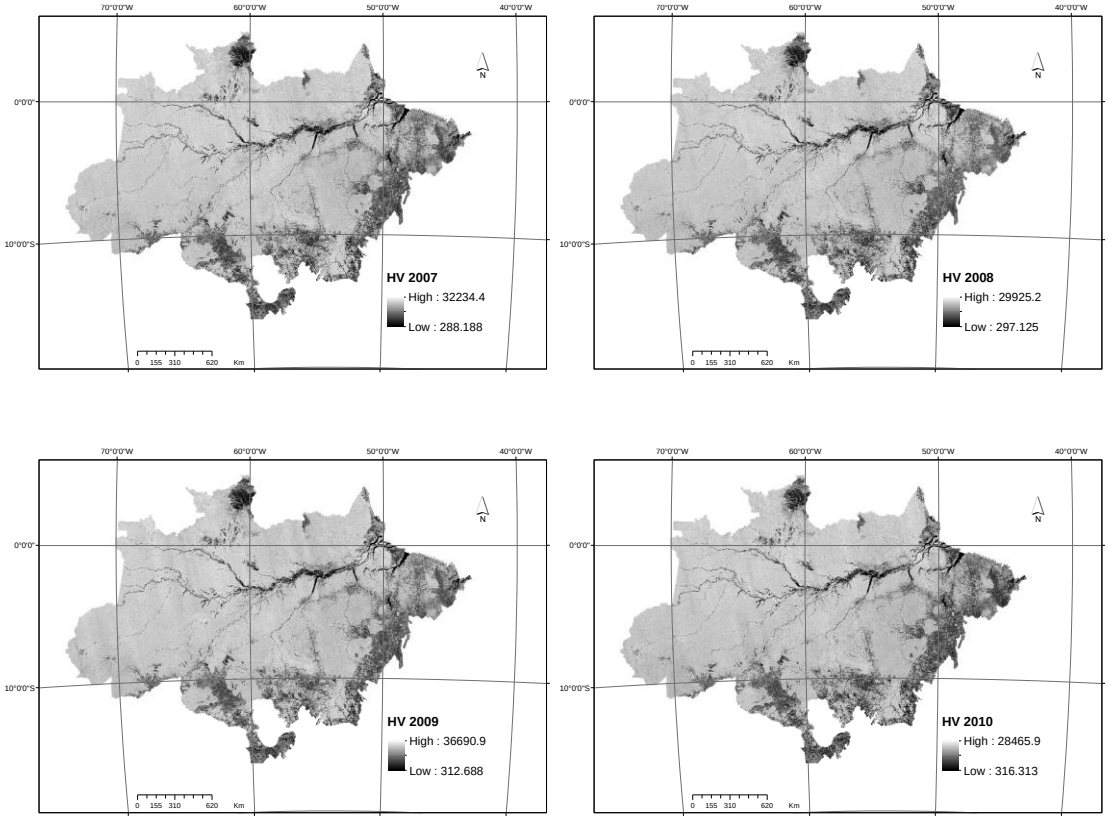
Os mapas de biomassa acima do solo (BAS) foram construídos a partir de dados de retroespalhamento do tipo HV (horizontal-vertical) do *Phased Array L-Band SAR* (PALSAR) a bordo do *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS), disponibilizados pela Agência de exploração espacial japonesa (JAXA), para os anos de 2007, 2008, 2009 e 2010. Segundo Le Toan et al. (2004) e LUCAS et al. (2006), as polarizações HV são mais sensíveis à biomassa que HH, além de ter maior alcance dinâmico e serem menos afetadas pelas condições de superfície do tipo e do solo.

Antes do cálculo da BAS propriamente dito, foram realizadas quatro etapas de pré-processamento:

1) Agregação da polarização de HV da resolução original de 25 m para uma

resolução de 100 m usando uma média simples com uma janela de 4 x 4, para reduzir o ruído da dispersão dos dados quando estão em escalas espaciais menores que 1.0 ha (SAATCHI et al, 2011; YU; SAATCHI, 2016).

Figura 3.15. Dados anuais de polarizações na direção horizontal/vertiral (HV), obtidos a partir do sensor PALSAR/ALOS, em resolução de 100m x 100m, para os anos de 2007, 2008, 2009 e 2010. Valores em números digitais de retrodifusão (DN).



2) Cálculo da normal padronizada dos dados obtidos na etapa 1, a fim de excluir células fora do intervalo entre -1 e +1 desvio padrão (σ), como forma de eliminar possíveis *outliers* inerentes aos dados do radar, ou seja, os valores extremos do dado, tanto superiores (que podem estar relacionados à saturação do

radar) quanto inferiores (influenciados pela umidade do solo).

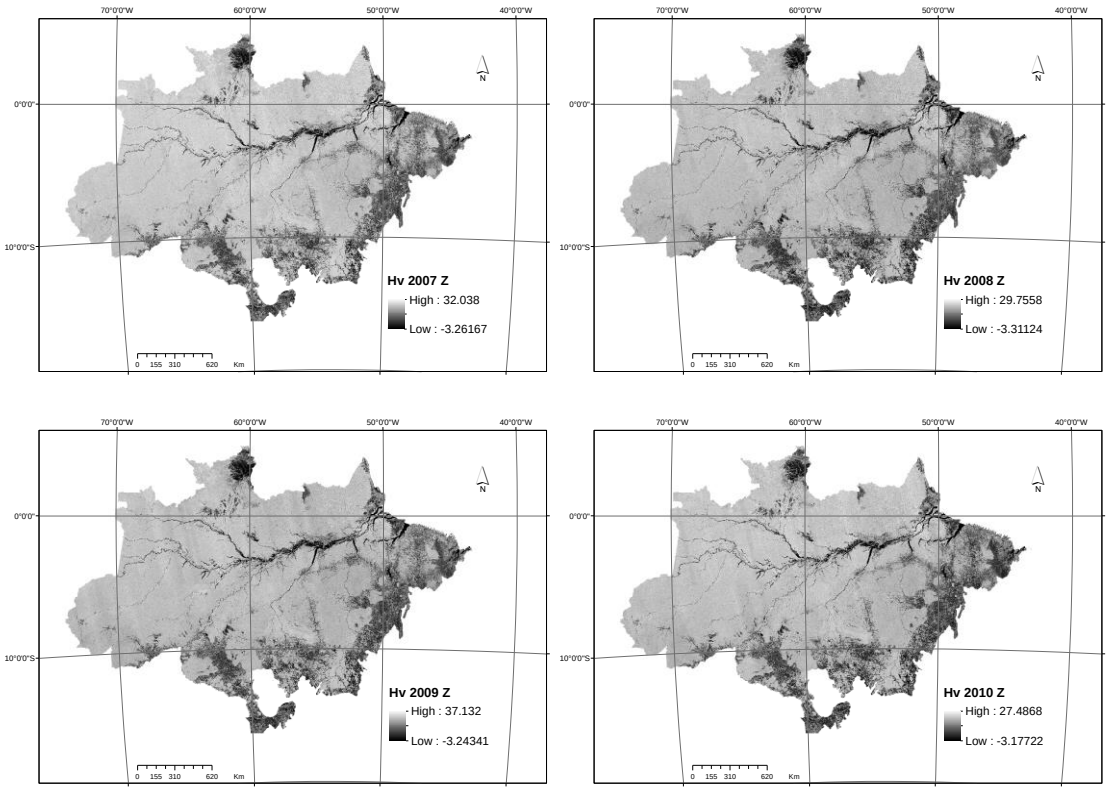
Este cálculo se dá pela fórmula:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Onde, x é o valor da célula, μ é a média e σ é o desvio padrão.

A distribuição padronizada facilita o cálculo das probabilidades mediante tabela z. O intervalo de dados contido entre -1 σ e +1σ representa cerca de 68% da frequência total dos dados.

Figura 3.16. Dados anuais de polarizações na direção horizontal/vertiral (HV), obtidos a partir do sensor PALSAR/ALOS, em resolução de 100m x 100m, para os anos de 2007, 2008, 2009 e 2010. Valores de Z baseado no cálculo da normal padronizada.



Os mapas resultantes (Figuras 3.17) foram usados como máscara sobre os dados de HV obtidos na etapa 1, resultando nos mapas anuais de HV (Figuras 3.18) que serão usados na etapa 3.

Figura 3.17. Dados anuais de polarizações na direção horizontal/vertiral (HV), obtidos a partir do sensor PALSAR/ALOS, em resolução de 100m x 100m, para os anos de 2007, 2008, 2009 e 2010, após a exclusão dos valores Z fora do intervalo de -1 σ e +1 σ.

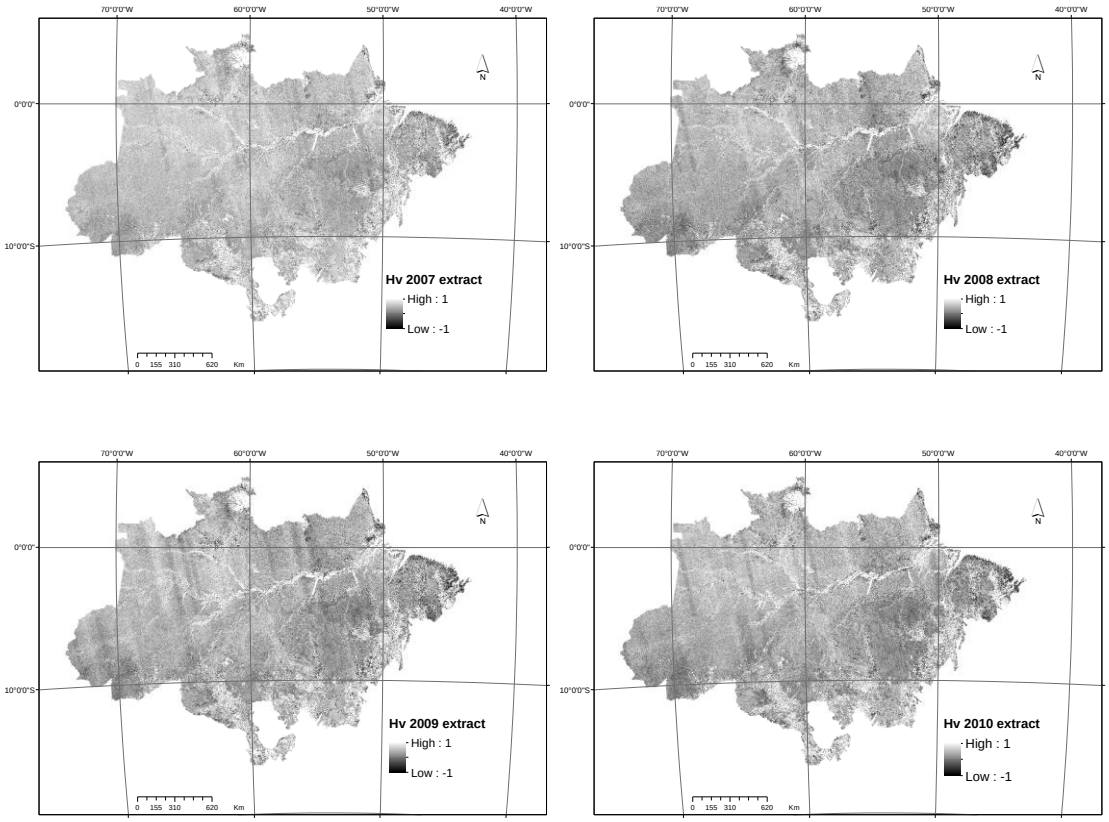
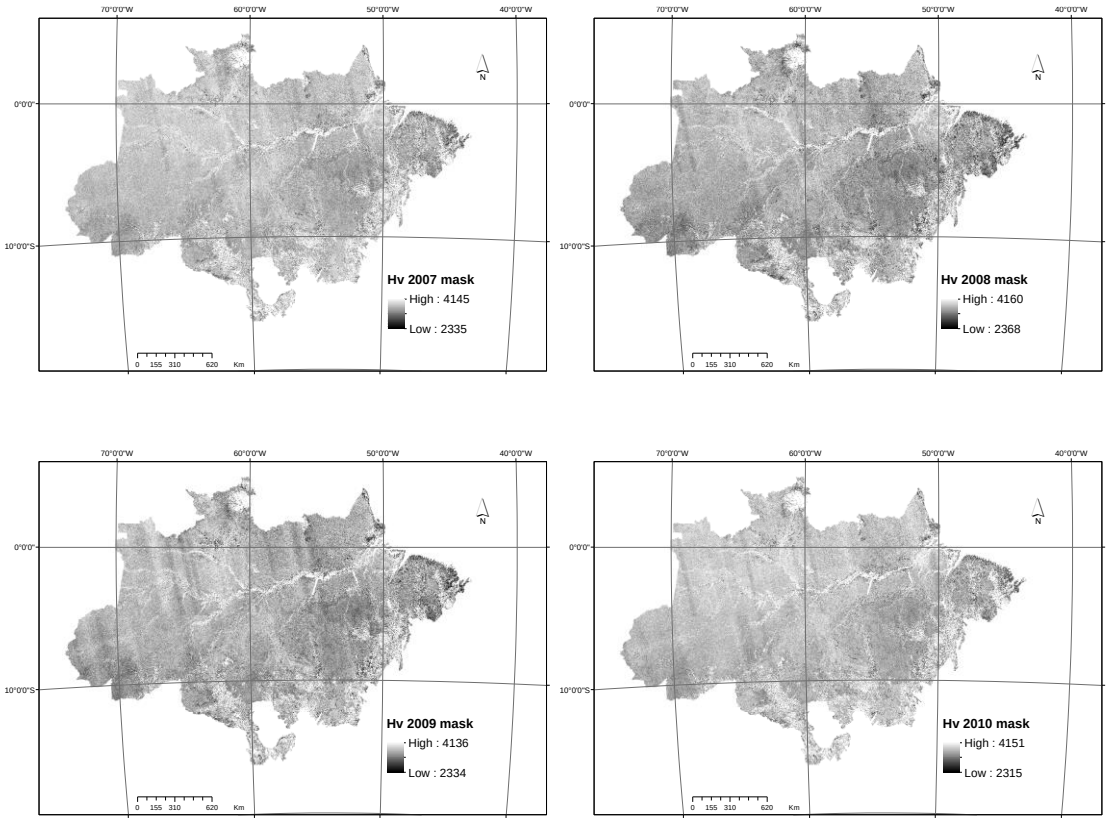


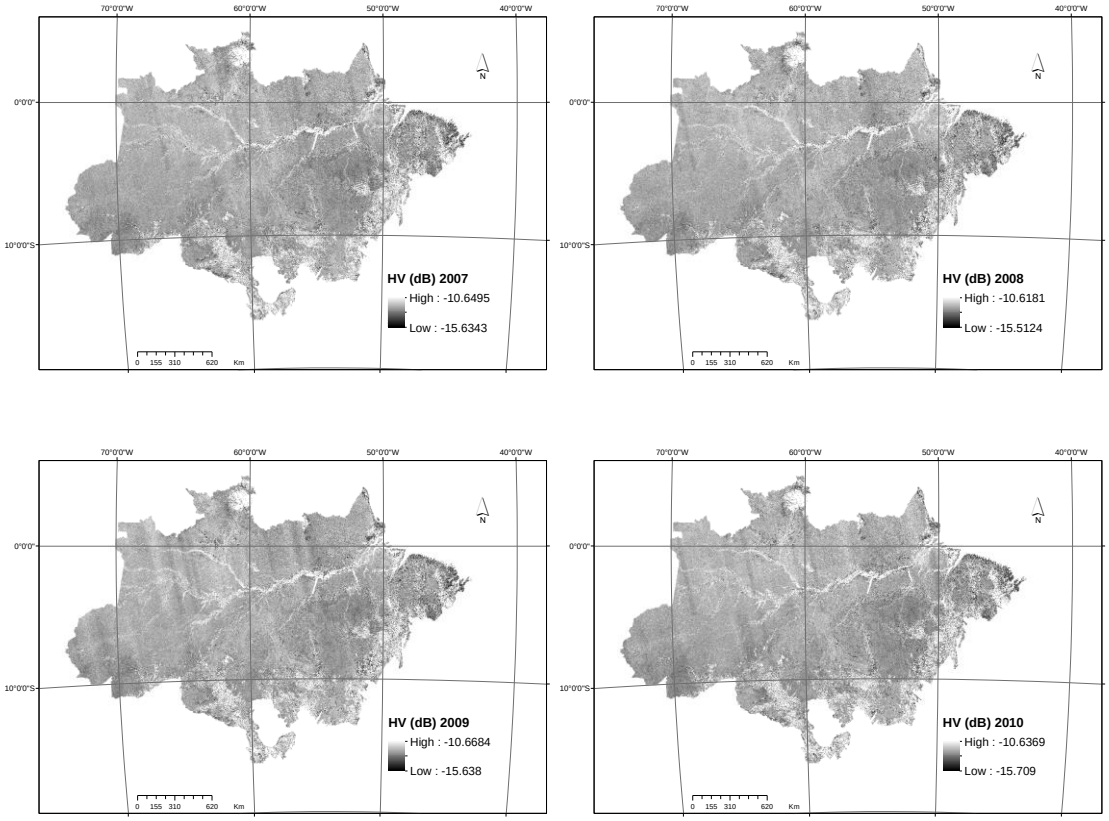
Figura 3.18. Mapas anuais de polarização HV após a exclusão das células fora do intervalo -1 σ e +1 σ do dado obtido na Etapa 1 (Figura 3.15).



3) Conversão dos números digitais de retrodifusão (DN) do dado obtido em ‘2’ (Figuras 3.18) para o coeficiente de retrodifusão em unidades de decibéis (dB).

HV-dB = 20*Log10 (HV-DN) - 83

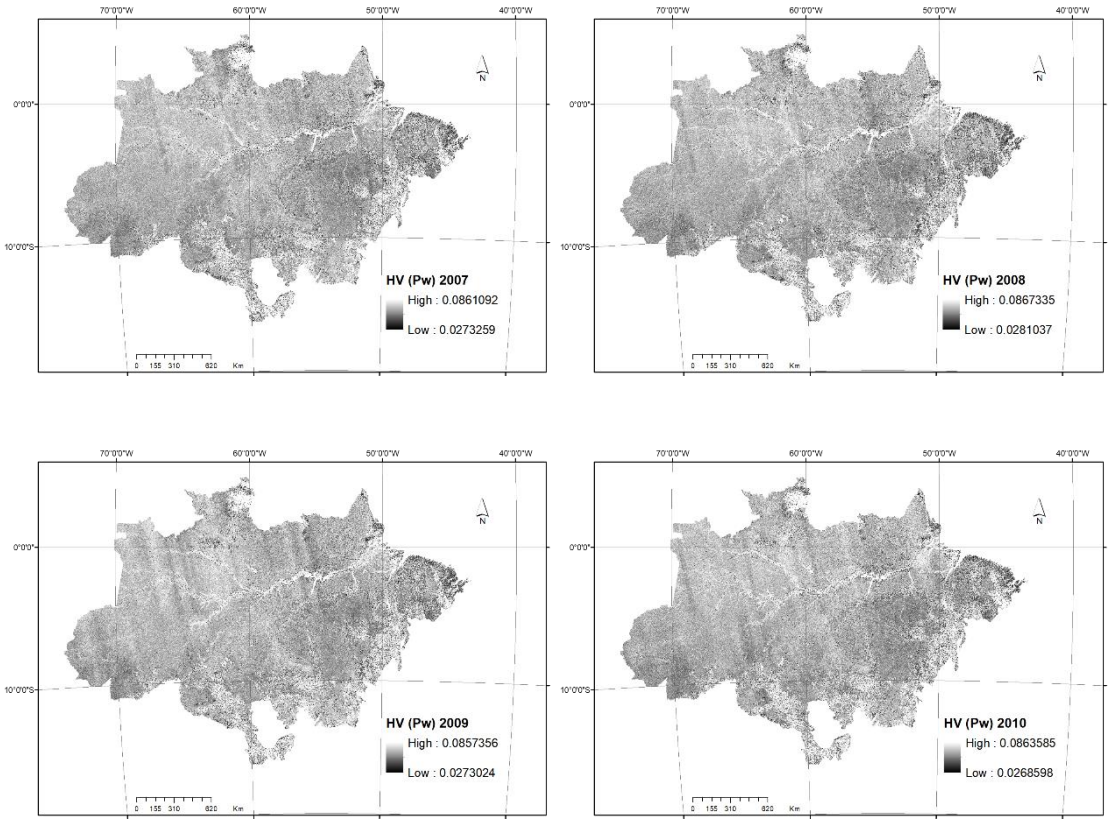
Figura 3.19. Mapas anuais de polarização HV mostrados na Figura 3.18 , convertidos em valores de decibéis (dB).



4) Conversão de unidades de decibéis (dB) para potência linear (sigma-0 m^2/m^2) a partir dos dados mostrados na Figura 3.19.

$$\text{HV-power} = \exp10^{(\text{HV_dB}/10)}$$

Figura 3. 20. Dados anuais de polarização Hv mostrados na Figura 3.19, convertidos em potência linear (sigma).



Após estes 4 passos iniciais foi calculada a biomassa acima do solo (BAS em $Mg.ha^{-1}$) a partir do dado Hv Pw (Figura 3.20). Yu e Saatchi (2016) relataram que as florestas inundáveis mostram uma forte retrodifusão da reflexão especular da superfície da vegetação devido à umidade, e que precisa ser tratada separadamente daqueles em 'terra firme'. Dessa forma, foram aplicadas 2 equações para calcular os mapas: (1) floresta 'terra firme'; (2) floresta em Várzea.

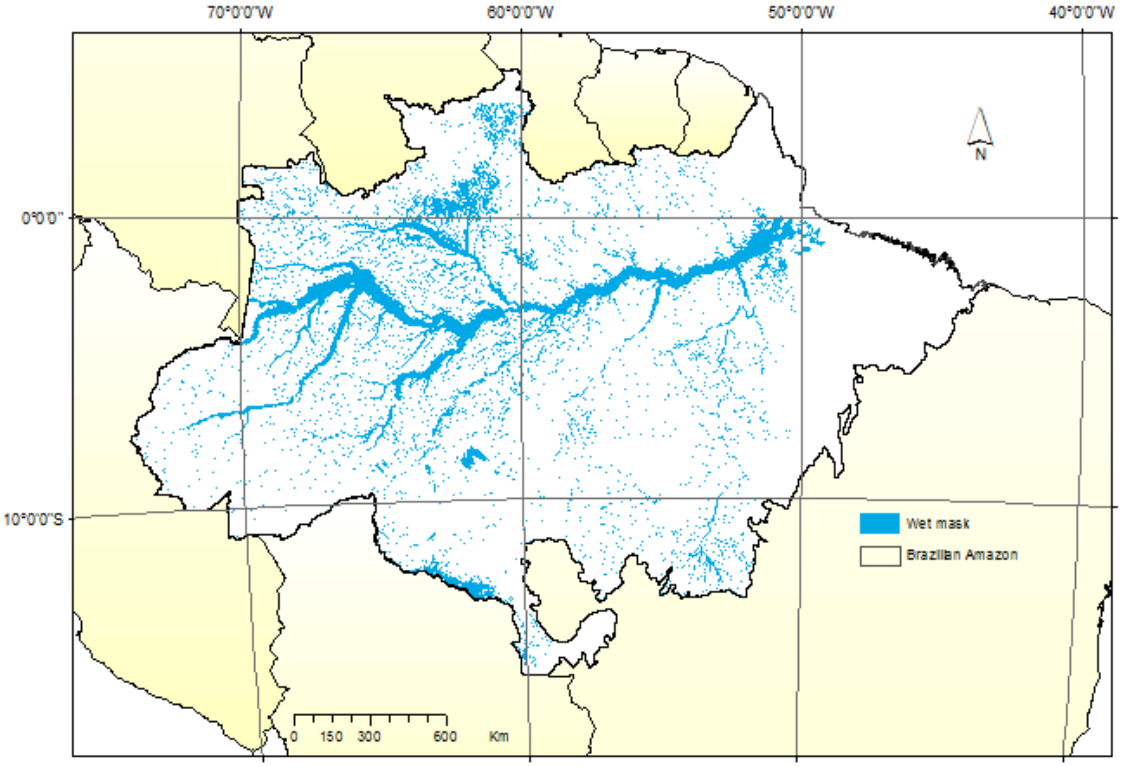
$$BAS = 0.40478 * \exp(88.43 * Hv\ Pw) \quad (1)$$

$$BAS = 0.57843 * \exp(75.051 * Hv\ Pw) \quad (2)$$

Para estratificação da área entre 'terra firme' e 'varzea', foi utilizado um mapa produzido por ferramentas de sensoriamento remoto (HESS et al., 2003) e posteriormente corrigido geometricamente (RENNO et al., 2003), como mostrado na

Figura 3.21.

Figura 3. 21. Mapeamento das áreas potencialmente inundáveis na Amazônia usado para estratificar a área de estudo para aplicação de uma das equações de BAS.



3.3.3. Mapas de biomassa acima do solo (BAS)

As Figuras seguintes (3.22 e 3.23) mostram o resultado do cálculo de BAS para áreas de terra firme e várzea. Após o cálculo da BAS dessas áreas, os mapas anuais foram mosaicados, resultando nos mapas anuais de biomassa acima do solo para toda área de estudo (Amazônia brasileira).

Figura 3. 22. Mapas anuais de biomassa acima do solo, em $Mg.ha^{-1}$, para as áreas de Terra firme, obtidos a partir da equação 1.

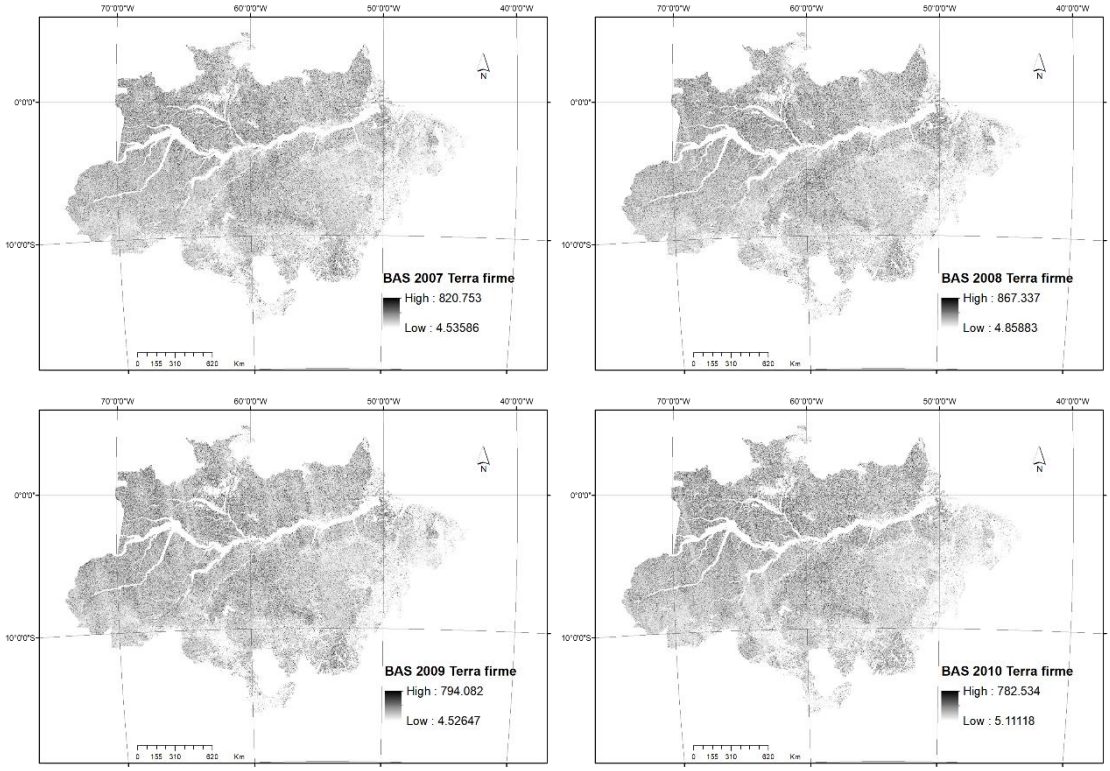


Figura 3. 23 Mapas anuais de biomassa acima do solo, em Mg.ha^{-1}, para as áreas de Várzea, obtidos a partir da equação 2.

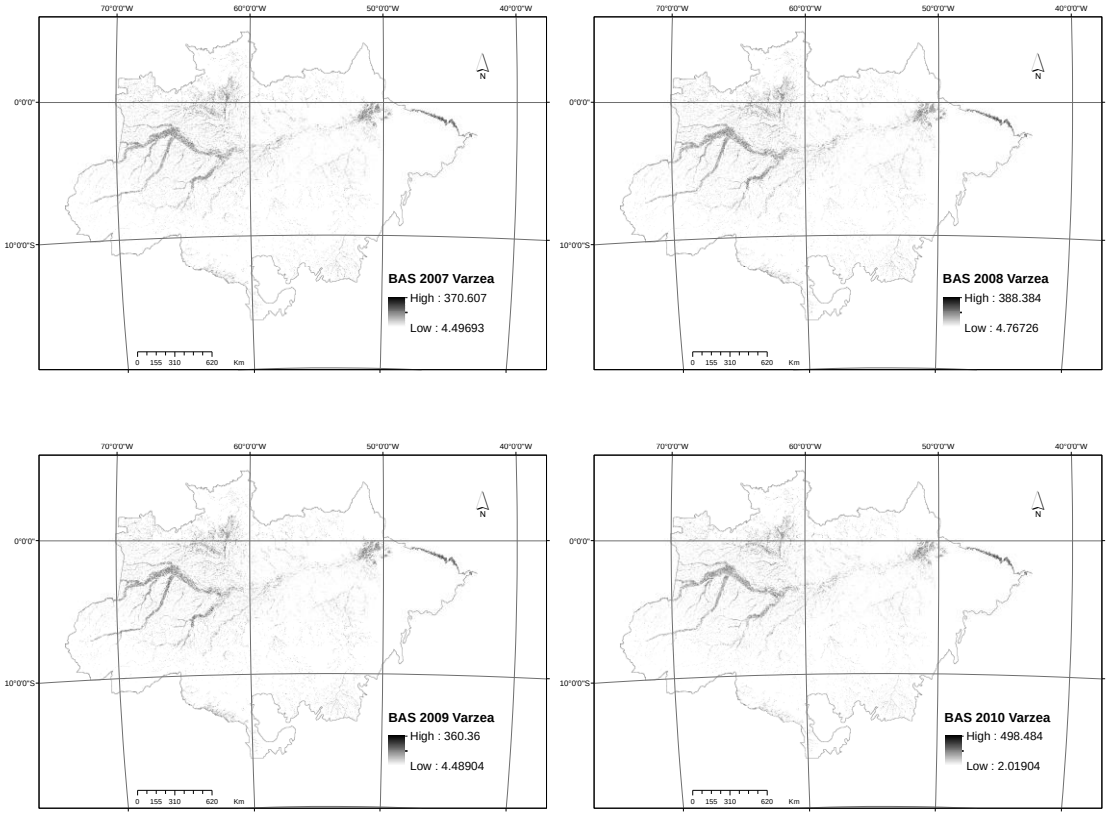
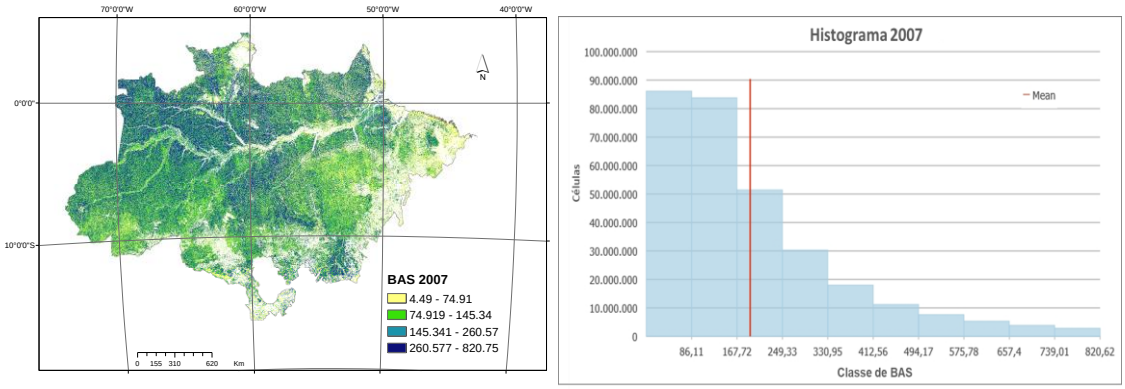
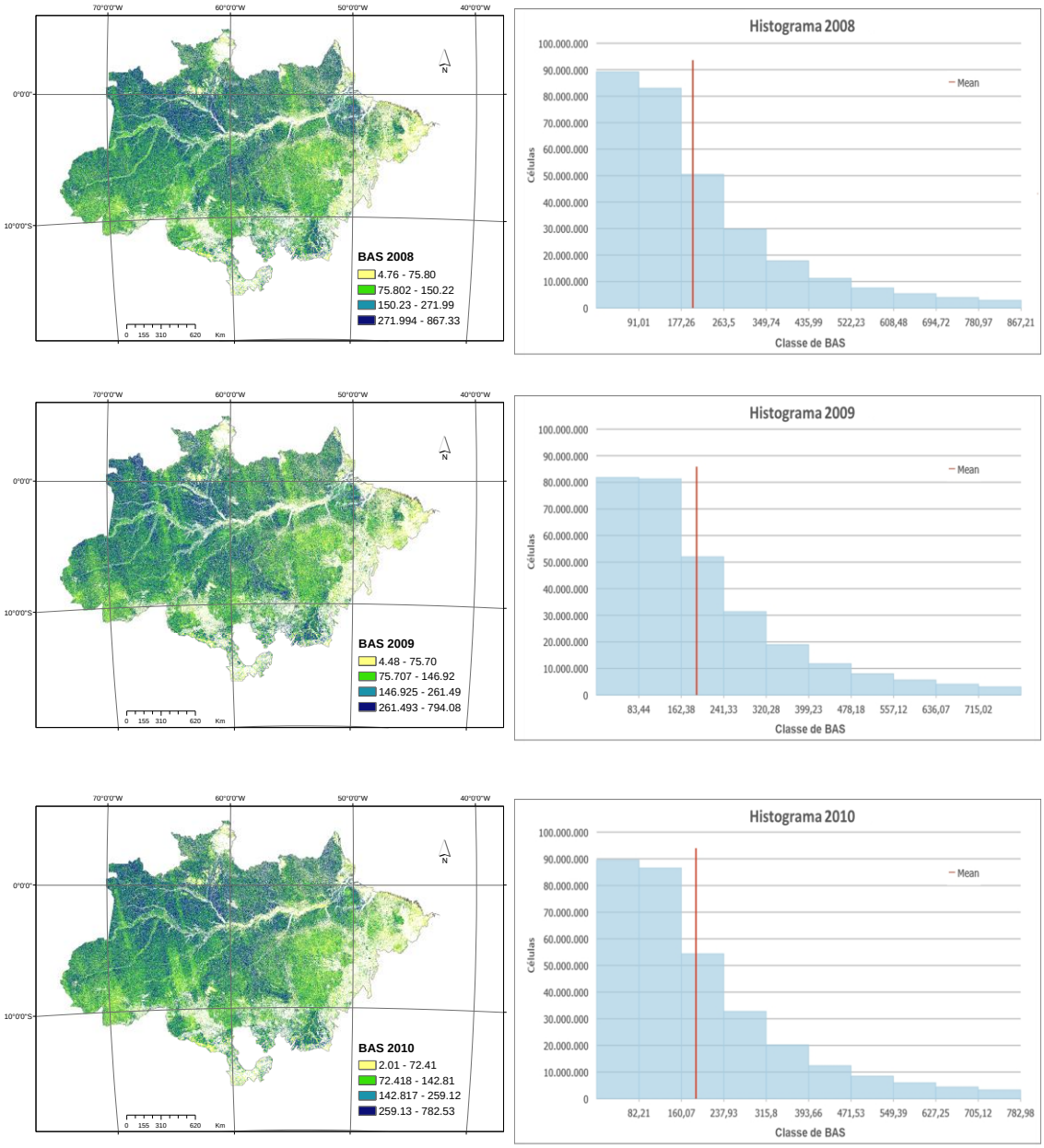


Figura 3.24. Mapas anuais de biomassa acima dos solo (BAS) e respectivos histogramas de distribuição de frequência de células. BAS, em Mg.ha^{-1}, classificada em função do quartil.



continua

Figura 3.24 – Conclusão.



Linha vermelha nos histogramas representa a média.

Esses mapas anuais de BAS serão utilizados nas análises seguintes, sendo combinados ao mapa das trajetórias produzido na seção 3.2, afim de estratificar as diferentes vegetações em regeneração na Amazônia Brasileira, em função do histórico de cobertura da terra.

4. BIOMASSA ACIMA DO SOLO EM DIFERENTES ESTÁGIOS DE REGENERAÇÃO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

A partir dos mapas de biomassa acima do solo (BAS) e de trajetórias apresentados no Capitulo 3, será estimado o valor médio da BAS para cada trajetória. A partir disso, duas analises serão realizadas: (a) *Padrão geral da BAS entre as trajetórias,* a fim de analisar os estágios de regeneração. A partir dessa análise será verificado a consistência do modelo conceitual de trajetórias adotado, ou seja, se a premissa de que trajetórias ordenadas a partir do 'pasto sujo', regeneração com pasto' e 'vegetação secundaria', podem representar estágios de regeneração, em termos de biomassa. (b) *Padrão de crescimento da BAS dentro das trajetórias,* por meio de uma análise multi-temporal dos dados de biomassa, de forma a identificar o padrão de crescimento em BAS em cada trajetória (que irá subsidiar a análises dos Capítulos 5 e 6, por sua vez).

4.1 Metodologia

4.1.1 Padrão geral da BAS entre as trajetórias

O mapa de trajetória foi usado como uma máscara sobre os mapas anuais de BAS, e a partir disso foram obtidos 4 mapas de BAS (2007 - 2010) para cada trajetória. Nesta etapa, esses mapas anuais foram compilados em um único arquivo, sendo assim, as estatísticas calculadas representam valores médios desses anos. Após essa estratificação, foram realizadas as seguintes análises:

i. Foram extraídos os seguintes parâmetros estatísticos para cada trajetória: média, mediana, primeiro e terceiro quartil e valores mínimo e máximo da BAS.
ii. Para testar as diferenças estatísticas entre as trajetórias, foi realizado um teste não-paramétrico para amostras múltiplas independentes que compara as distribuições: teste de Kruskal Wallis (*one-way ANOVA on ranks*).
iii. Adicionalmente, foi realizada uma análise com base nos valores médios de BAS de 2008 e 2010 e suas respectivas classes. O intuito foi verificar se as classes de cobertura responderam às variáveis 'classe anterior' e 'tempo de regeneração'. O tempo de regeneração foi analisado em dois períodos: a) 2 anos, usando o dado

de 2010 e considerando a classe de 2008 como referencial de tempo; b) 4 anos, usando dado de 2008 e considerando a classe de 2004 como referencial; c) 6 anos, usando o dado BAS de 2010 e considerando a classe de 2004 como referencial. Em relação à classe anterior foram testadas as duas possibilidades: transições entre classes e crescimento contínuo dentro da mesma classe.

4.1.2 Padrão de crescimento da BAS dentro das trajetórias

Esta análise visou estimar a evolução do crescimento (acúmulo de biomassa) em cada trajetória, comparando os intervalos de tempo 2007-2008, 2008-2009 e 2009-2010.

i. Foi estimada uma classe de cobertura para ser associada aos mapas de biomassa de 2007 e 2009, visto que não há mapeamento TerraClass para estes anos. Sendo assim, para 2007 foi considerada a mesma classe de 2008, e em 2009 foi considerada a mesma classe de 2008 e 2010, quando estas era iguais, ou um *blend* entre elas, quando eram diferentes.

ii. Foi estimada uma idade potencial para cada classe, de acordo com a classe anterior e usando a classe de cobertura de 2004 como referencial. Por exemplo, na trajetória 1, a classe foi o ‘pasto sujo’ em todo o período de análise (2004/2010), portanto, a contagem começa em 2007 com, pelo menos, 3 anos, uma vez que não é possível saber quando este pasto sujo passou a existir antes de 2004. Já na trajetória 2, a classe entre 2004 e 2008 foi o ‘pasto sujo’, mas em 2010 era ‘regeneração com pasto’, que tinha no máximo 2 anos de idade. Na trajetória 3, a classe foi ‘regeneração com pasto’ de 2007 a 2010, mas em 2004 era ‘pasto sujo’, então tinha, no máximo, 3 anos de idade em 2007. E assim, sucessivamente. Para esta classificação, bem como em todas as interpretações feitas neste estudo, partiu-se da premissa que não houve corte da vegetação ou limpeza do terreno entre 2004 e 2007.

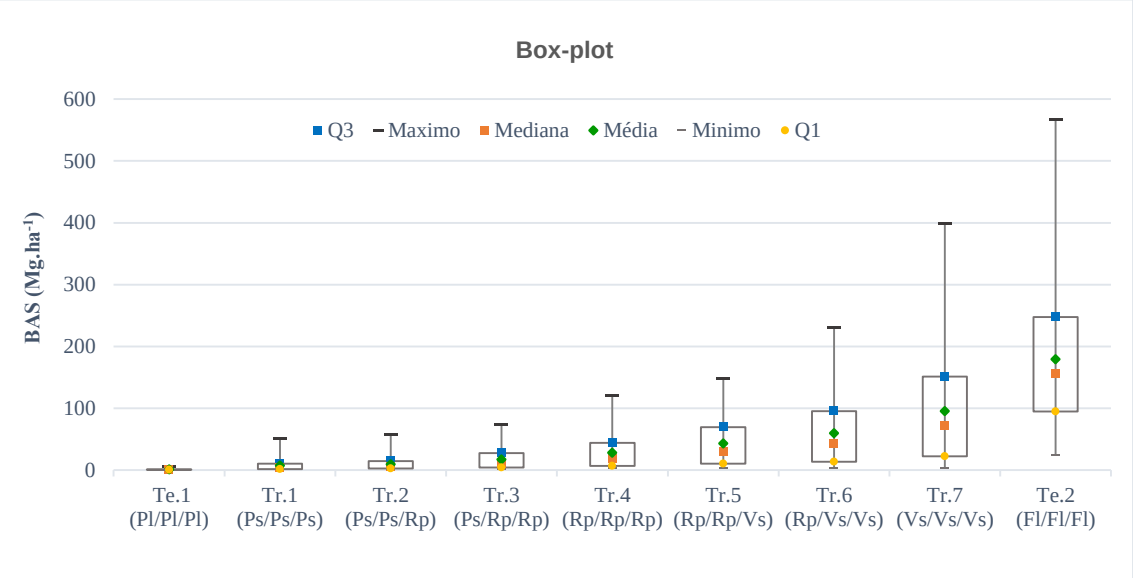
iii. Para testar diferenças estatísticas entre os anos, dentro de cada trajetória, foi realizado um teste não-paramétrico para múltiplas amostras dependentes: ANOVA Friedman (*one-way repeated measures ANOVA on ranks*).

4.2 Resultados

4.2.1 Padrão geral da BAS nas trajetórias

O box-plot (Figura 4.1) resume os resultados das estatísticas de BAS por trajetória. A análise não paramétrica de Kruskal Wallis mostrou que todas as distribuições foram diferentes entre si, ao nível de 95% ($p < 0.0001$). Dessa forma, o comportamento dos dados de BAS entre as trajetórias está de acordo com a hipótese inicial, e podemos relacionar as trajetórias com estágios de regeneração, não só em função da definição conceitual, mas em relação à BAS acumulada.

Figura 4. 1. Gráfico mostrando as estatísticas para trajetórias (Tr) e testemunhos (Te).



O eixo X apresenta as trajetórias e testemunhas e a sequência de classes do TerraClass de 2004, 2008 e 2010 que elas representam. As classes são identificadas por siglas: Fl = Floresta; Vs = vegetação secundária; Rp = Regeneração com pasto; Ps = Pasto sujo; Pl = Pasto limpo.

Os valores médios, todos em $Mg.ha^{-1}$, da trajetória 1 à 7 foram: 7,52; 9,37; 17,03; 27,79; 42,84; 59,44 e 95,28. A Testemunha 1 apresentou 0,9 $Mg.ha^{-1}$de BAS média e a Testemunha 2, 179,28 $Mg.ha^{-1}$. Assim, os resultados foram consistentes com o modelo conceitual das trajetórias, uma vez que a trajetória 1 apresentou o menor valor de BAS e a trajetória 7, o maior. As testemunhas, como esperado, mostraram os extremos da BAS

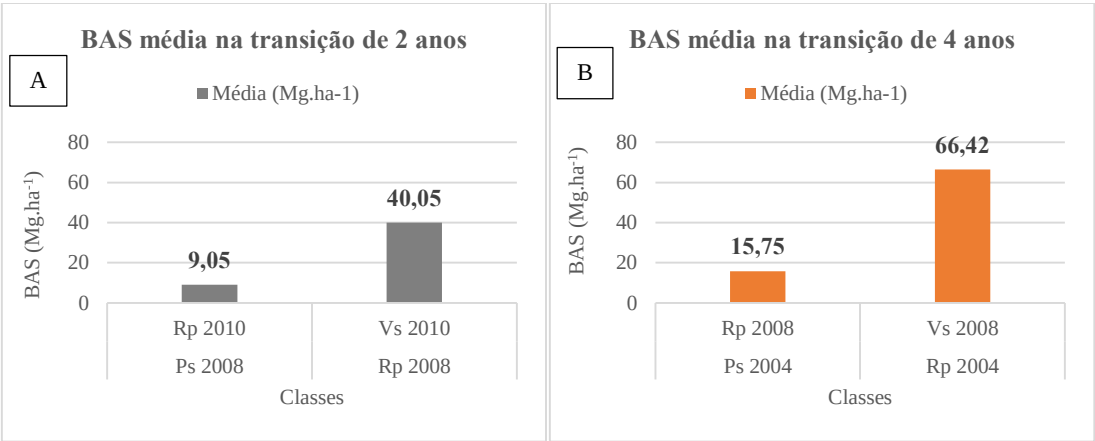
que ocorrem na Amazônia Brasileira, e assim, corroboram os resultados encontradas nas trajetórias.

Variações relacionadas à classe anterior e ao tempo de regeneração

A sequência temporal das classes apresentadas em cada trajetória mostrou a evolução do crescimento em *função do tempo e da classe anterior*, representando o papel do histórico do uso da terra no processo regeneração das vegetações. As transições entre classes podem ocorrer em 2 anos (2008-2010), caso das trajetórias 2 e 5, ou 4 anos (2004-2008), no caso das trajetórias 3 e 6; enquanto que o crescimento da mesma classe pode ocorrem em 4 (2004-2008) ou 6 anos (2004-2010), utilizando dados das trajetórias 1, 4 e 7 que mostraram o crescimento dentro da mesma classe, Pasto sujo, Regeneração com pasto e Vegetação secundária, respectivamente.

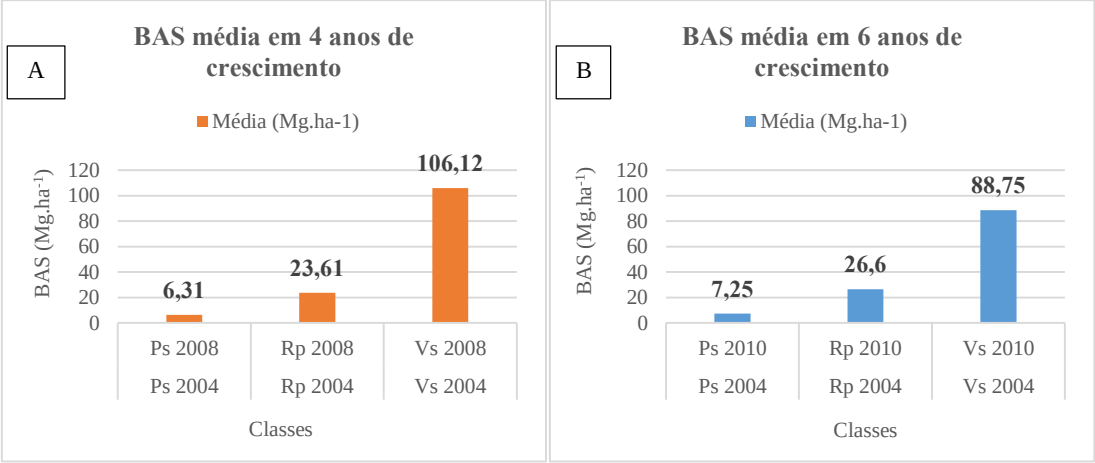
As Figuras 4.2 A e B mostram os valores médios de BAS alcançado em transições de 2 e 4 anos, respectivamente, entre o Pasto sujo e Regeneração com pasto, e entre este e a Vegetação secundária. Já as Figuras 4.3 A e B mostram a BAS média acumulada por período de tempo (4 e 6 anos) no crescimento da mesma classe de cobertura.

Figura 4. 2. BAS acumulada em transições de 2 (A) e 4 anos (B).



A = Transições de 2 anos entre Pasto sujo e Regeneração com pasto (Trajetória 2) e de Regeneração com pasto para Vegetação secundária (Trajetória 5) B = Transições de 4 anos entre Pasto sujo e Regeneração com pasto (Trajetória 3) e entre Regeneração com pasto e Vegetação secundária (Trajetória 6) .

Figura 4. 3. BAS acumulada em 4 anos (A) e 6 anos (B) de crescimento dentro da mesma classe.



(A) Crescimento de 4 anos da classe Pasto Sujo (Trajetória 1), Regeneração com pasto (Trajetória 4) e Vegetação secundária (Trajetória 7). (B) Crescimento de 6 anos da classe Pasto Sujo (Trajetória 1), Regeneração com pasto (Trajetória 4) e Vegetação secundária (Trajetória 7).

Comparando transições de 2 e 4 anos (Figuras 4.2A e 4.2B) ficou confirmada a influência do tempo de regeneração no acúmulo de BAS visto que após 4 anos o valor é maior do que em 2 anos, em todas as transições. O tempo de regeneração no crescimento da mesma classe apresentou comportamento consistente, uma vez que a biomassa média acumulada em 6 anos foi maior do que em 4 anos, nas classes Pasto sujo e Regeneração com pasto. Porém, houve discrepância em relação à classe de vegetação secundária, uma vez que a biomassa alcançada em 6 anos (88,75 $Mg.ha^{-1}$) foi menor que em 4 anos (106,12 $Mg.ha^{-1}$). Uma hipótese para esse resultado seria a influência negativa de distúrbios sobre o crescimento das vegetações secundárias. Esta hipótese será melhor explorada no Capítulo 5, quando será associado dados de fogo e déficit hídrico aos dados de biomassa das vegetações secundárias, representadas pelas Trajetórias 5, 6 e 7.

Por fim, analisando a variável ‘classe anterior’ o resultado foi o esperado, ou seja, houve influência na quantidade de biomassa acumulada, diferenciando o estágio de regeneração de cada classe, em um mesmo período de tempo. Em 4 anos de crescimento

(Figuras 4.2B e 4.3A) da classe Regeneração com pasto a partir de Regeneração com pasto (23,61 $Mg.ha^{-1}$) foi maior do que em Regeneração com pasto advindo de Pasto sujo (15.75 $Mg.ha^{-1}$), ou seja, da classe anterior no processo de regeneração. O mesmo ocorreu com Vegetação secundária, visto que o crescimento dentro dessa mesma classe apresentou maior valor de BAS média (106,12 $Mg.ha^{-1}$) do que na transição a partir de Regeneração com pasto (66,42 $Mg.ha^{-1}$), comparanto o mesmo horizonte temporal (4 anos). Assim, as classes que já sofreram a transição a partir da classe antecedente, de acordo com o modelo conceitual, estão acumulando biomassa há mais tempo, seguindo para estágios mais avançados, tanto em termos estruturais quanto em relação à biomassa acumulada.

Esses resultados comprovam que a dinâmica do processo de regeneração das áreas desmatadas pode ser interpretada em relação às classes do projeto TerraClass, mas a quantidade de biomassa acumulada dependerá da classe anterior e do tempo de regeneração, variáveis que são implícitas ao modelo conceitual das trajetórias.

4.2.2 Padrão de crescimento da BAS dentro das trajetórias

A Figura 4.4 apresenta os valores médios de BAS dentro de cada trajetória, para cada ano de biomassa calculado (2007, 2008, 2009 e 2010), bem como a idade potencial de cada classe associada. Assim, os gráficos indicam as mudanças temporais ao longo do tempo, em função do incremento médio calculado pela diferença entre os anos subsequentes. Esses incrementos estão sumarizados na Tabela 4.1.

Figura 4. 4. Valores de BAS média por trajetória em cada ano de análise. O eixo ‘x’ mostra as classes associadas a cada ano, em cada trajetória.

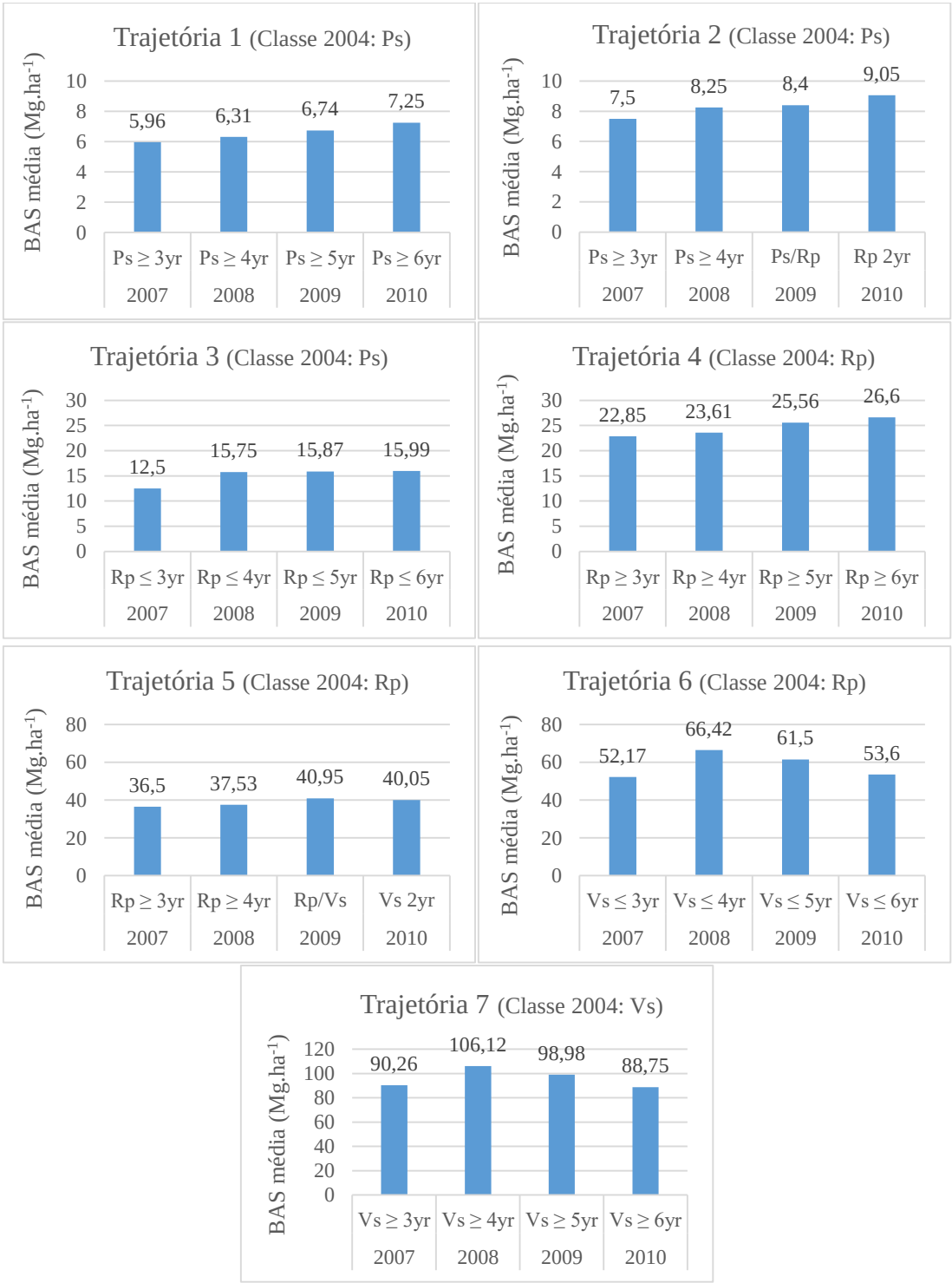


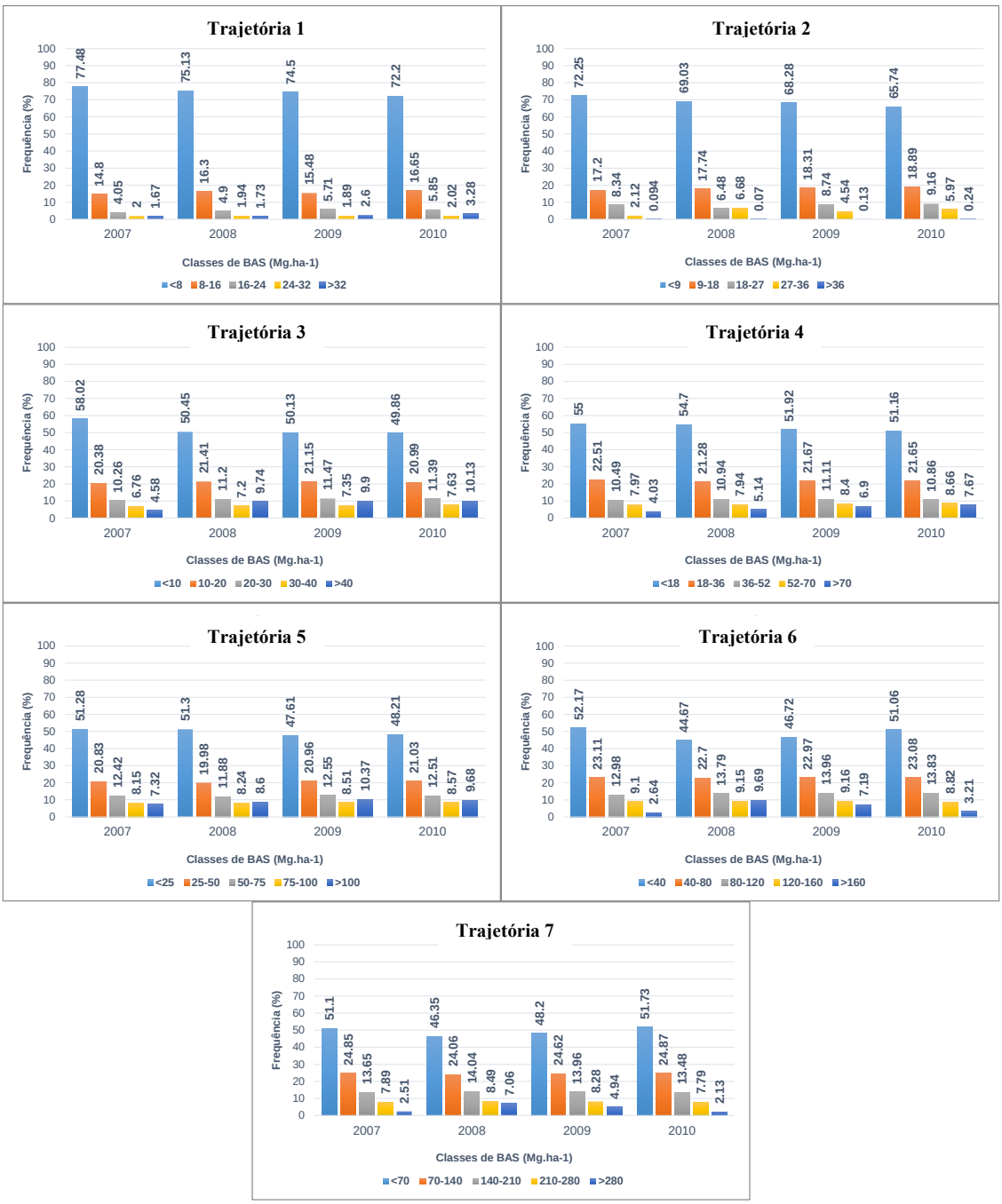
Tabela 4. 1. Diferenças anuais de BAS média em todas as trajetórias, calculadas com base nos valores mostrados na Figura 4.6. Incrementos em valores de $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$.

	2007 - 2008		2008 - 2009		2009 - 2010	
Trajetórias	Incremento	Transição	Incremento	Transição	Incremento	Transição
Traj 1	0,35	Ps - Ps	0,43	Ps - Ps	0,51	Ps - Ps
Traj 2	0,75	Ps - Ps	0,15	Ps - Ps/Rp	0,65	Ps/Rp - Rp
Traj 3	3,25	Rp - Rp	0,12	Rp - Rp	0,12	Rp - Rp
Traj 4	0,76	Rp - Rp	1,95	Rp - Rp	1,04	Rp - Rp
Traj 5	1,03	Rp - Rp	3,42	Rp - Rp/Vs	-0,9	Rp/Vs - Vs
Traj 6	14,25	Vs - Vs	-4,92	Vs - Vs	-7,9	Vs - Vs
Traj 7	15,86	Vs - Vs	-7,14	Vs - Vs	-10,23	Vs - Vs

As trajetórias 1 (Ps/Ps/Ps), 2 (Ps/Ps/Rp), 3 (Ps/Rp/Rp) e 4 (Rp/Rp/Rp) mostraram uma evolução na regeneração, demonstrado pelos incrementos positivos em todos os períodos. No entando, nem todas as trajetórias apresentaram esse comportamento. As trajetórias 5 (Rp/Rp/Sv), 6 (Rp/Sv/Sv) e 7 (Sv/Sv/Sv) apresentaram redução da biomassa média em pelo menos um dos períodos. A trajetória 5 mostrou que a biomassa média reduziu entre 2009 e 2010, enquanto que as trajetórias 6 e 7 perderam biomassa entre 2008 e 2009 e entre 2009 e 2010. Ou seja, as vegetações secundárias, desde as mais jovens (Tr5) até as mais avançadas (Tr7), não tiveram crescimento contínuo em todo período de análise.

Para uma melhor compreensão dos resultados apresentados pela BAS média foram calculados os histogramas de frequência para análise da distribuição dos dados por classe de biomassa, em todas as trajetórias. (Figura 4.5).

Figura 4. 5. Distribuição de frequências nas trajetórias em todos os anos. BAS foi dividida em 5 classes iguais, de acordo com a amplitude máxima em cada trajetória.



Conforme verificado por meio da BAS média, da trajetória 1 à trajetória 4 houve

crescimento em todos os períodos analisados. Nessas trajetórias, o padrão da distribuição mostrou redução da frequência da classe de menor biomassa, ao mesmo tempo em que as frequências das classes de maior biomassa aumentaram ao longo do tempo. Por exemplo, na trajetória 1, a classe de BAS < 8 $Mg.ha^{-1}$ apresentou 77,48% dos dados em 2007, e em 2010, esse percentural caiu para 72,2%. Já a classe de BAS > 32 $Mg.ha^{-1}$ representava 1,67% dos dados em 2007 e passou a representar 3,28%, em 2010. Comportamento semelhante ocorreu nas trajetórias 2, 3 e 4, conforme mostrado nos gráficos da Figura 4.7. Esse padrão sugere que a estrutura dessas vegetações mudou ao longo do tempo, resultando no aumento da biomassa. Dessa forma, essas áreas estão de fato abandonadas, desde 2004 pelo menos, e a partir disso entraram em processo de regeneração. Esse processo resultou em incrementos anuais médios de 0,43 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ (Tr1); 0,52 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ (Tr2); 1,17 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ (Tr3); 1,25 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ (Tr4) calculados a partir dos incrementos médios em cada período, mostrados na Tabela 4.1. Assim sendo, os incrementos aumentaram conforme a regeneração avançou, mostrando o impacto da estrutura da vegetação na mensuração da biomassa.

Já as trajetórias que representam o crescimento da vegetação secundária (5, 6 e 7) apresentaram decréscimo de BAS em algum dos períodos. De acordo com os histogramas (Figura 4.5), a redução da BAS média foi uma resposta à redução da frequência dos dados na classe de maior biomassa em cada trajetória. Na trajetória 5 a frequência aumentou de 7,32% para 10,37% na classe de BAS > 100 $Mg.ha^{-1}$, entre 2007 e 2009, e a partir daí reduz para 9,68% em 2010, resultando em redução da BAS média de 0,9 $Mg.ha^{-1}$ entre 2009 e 2010 (Tabela 4.1).

Na trajetória 6, a frequência dos dados na classe de biomassa > 160 $Mg.ha^{-1}$ aumentou de 2,64%, em 2007 para 9,69%, em 2008. A partir daí, a frequência diminuiu atingindo 7,19 %, em 2009 e 3,21%, em 2010. Este comportamento resultou em perdas médias de 4,92 e 7,9 $Mg.ha^{-1}$ nos períodos 2008/2009 e 2009/2010, respectivamente (Tabela 4.1).

Já na trajetória 7, onde estão representadas as vegetações secundárias mais avançadas no processo de regeneração, o percentural de dados na classe de BAS > 280 $Mg.ha^{-1}$ aumentou de 2,51%, em 2007 para 7,06%, em 2008. Contudo, reduziu para 4,94%, em

2009 e 2,13%, em 2010, resultando em perdas médias de 7,14 e 10,23 $Mg.ha^{-1}$ nos períodos 2008/2009 e 2009/2010, respectivamente (Tabela 4.1).

Esses resultados sugerem que essas vegetações perderam biomassa, possivelmente devido a impactos de distúrbios que atingiram, principalmente, as árvores de maior porte. O capítulo seguinte será dedicado a examinar os efeitos do fogo e do deficit hídrico sobre o crescimento e estoques de biomassa das vegetações secundárias representadas pelas trajetórias 5, 6 e 7.

5. IMPACTOS DO DÉFICIT HÍDRICO E DO FOGO SOBRE O CRESCIMENTO DAS VEGETAÇÕES SECUNDÁRIAS

Nesse capítulo foi investigado o impacto do déficit hídrico e do fogo sobre o crescimento das vegetações secundárias, visando responder a duas questões principais:

1) O déficit hidrico e o fogo afetam as taxas de acúmulo de biomassa dentro da trajetória?
2) Esses distúrbios explicam as variações interanuais de biomassa encontradas na análise temporal do capítulo 4?

5.1. Metodologia

5.1.1 Subdivisão da área da Amazônia Brasileira em classes de intensidade de MCWD e de ocorrência de fogo

Foram utilizadas duas categorias de distúrbios para estratificar a Amazônia brasileira: 1) Máximo déficit hídrico acumulado (MCWD) (ARAGÃO et al., 2007); 2) e dados de cicatrizes de queimadas (ARAGÃO et al., 2018).

Máximo déficit hídrico acumulado (MCWD - *Maximum Climatological Water Deficit*) corresponde ao valor máximo do déficit hídrico acumulado que cada pixel (5x5 Km) atingiu dentro do ano, calculado pela diferença entre o máximo valor negativo no ano (obtidos mensalmente) e a evapotranspiração estimada da floresta. A evapotranspiração estimada para floresta tropical úmida é de aproximadamente 100 mm.mês^{-1}. Assim, quando a precipitação mensal é inferior a 100 mm, a floresta entra em déficit hídrico, gerando o valor de MCWD em cada pixel.

Os dados de fogo foram obtidos a partir do mapeamento de cicatrizes de queimada, usando produtos de reflectância diária de superfície MOD09GA e MOD09GQ, bem como produtos de reflectância de superfície de 8 dias, MO09Q1 e MOD09A1, do conjunto de dados MODIS, baseado no modelo de mistura espctral linear (LSMM). A partir das saídas do LSMM, foi usada a imagem de fração de sombra, que contém as informações relevantes para o mapeamento de áreas queimadas. Primeiro, foi aplicado

um procedimento de segmentação usando um limite mínimo de área de 4 pixels (~25 ha). Posteriormente, foi realizada uma classificação não supervisionada, seguida de uma edição de imagem pós-classificação.

O valor do MCWD foi dividido em 5 classes contínuas, representando diferentes intensidades de déficit hídrico: Classe 1 (MCWD = 0mm), Classe 2 (0-100mm), Classe 3 (100-200mm); Classe 4 (200-300mm) e Classe 5 (> 300mm).

Os mapas de cicatrizes de queimadas e MCWD são anuais, e portanto, o processo foi realizado para cada ano de análise, 2007 – 2010, gerando 4 mapas da Amazônia Brasileira sub-dividida em 6 classes, sendo 5 níveis de deficit hídrico e uma classe de ocorrência de fogo.

5.1.2. Estratificação da BAS das trajetórias de acordo com as classes obtidas em 5.1.1

i. Os mapas anuais da Amazônia brasileira sub-dividida nessas 6 classes de distúrbios foram usados para estratificar a biomassa das trajetórias 5, 6 e 7.

ii. Para verificar diferenças estatísticas entre as classes dentro de cada trajetória foi aplicado um teste não-paramétrico para amostras múltiplas independentes para comparar as distribuições: teste de Kruskal Wallis (*one-way ANOVA on ranks*).

iii. Para testar diferenças estatísticas entre os anos, dentro de cada classe de distúrbio de cada trajetória, foi realizado um teste não-paramétrico para múltiplas amostras dependentes: ANOVA Friedman (*one-way repeated measures ANOVA on ranks*).

5.1.3. Análise do impacto do MCWD e do fogo nas taxas de incremento das trajetórias

Para estimativa dos impactos dos distúrbios sobre o crescimento dentro das trajetórias 5, 6 e 7 foi calculada a diferença percentual entre a BAS média em cada classe de distúrbio e a BAS média na classe 1 (MCWD = 0mm). Esta classe funcionou como ‘controle’,

uma vez que não apresenta défici hídrico, e também não apresentou nenhuma ocorrência de queimadas, em nenhum dos anos analisados.

5.1.4 Analise das mudanças interanuais de BAS das trajetórias, por classe de intensidade de MCWD e de ocorrência de fogo.

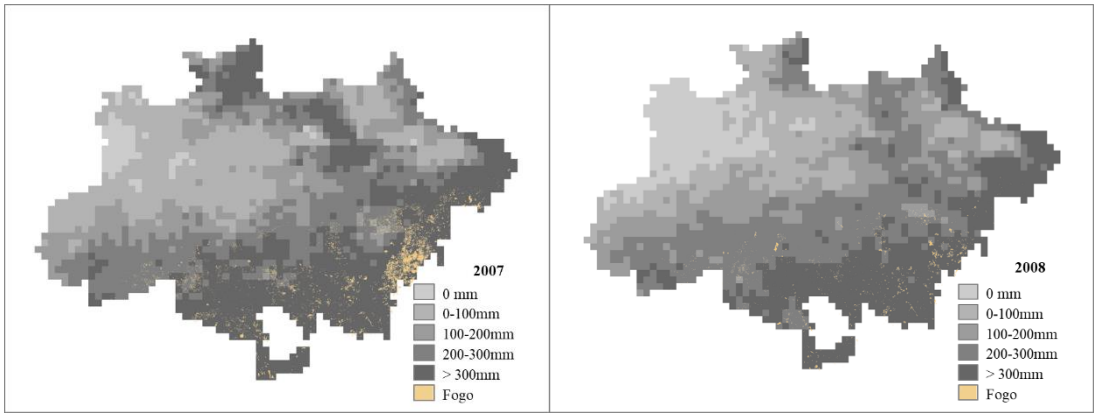
Foram analisadas mudanças interanuais da BAS média em cada classe de distúrbio, entre os anos de 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010, a fim de verificar se os distúbios explicam o padrão de crescimento encontrado nas trajetórias 5, 6 e 7.

5.2. Resultados

5.2.1. Subdivisão da Amazônia Brasileira em classes de intensidade de MCWD e de ocorrência de fogo

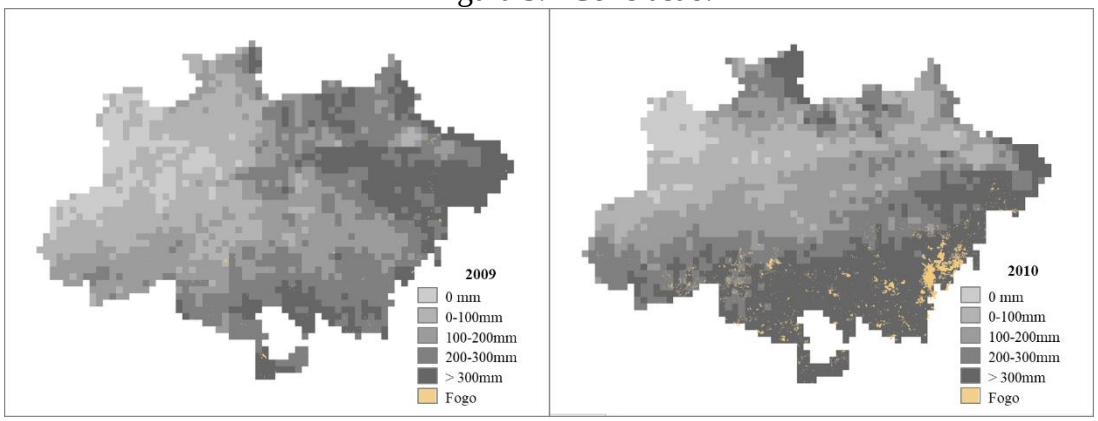
A Figura seguinte mostra a distribuição espacial das classes de distúrbio em cada ano. As áreas foram classificadas em relação à intensidade do déficit hídrico, em função dos valores de MCWD, e em relação à ocorrência de fogo. Esses mapas foram usados para estratificar a BAS dentro de cada trajetória.

Figura 5. 1 Subdivisão da Amazônia brasileira em níveis de MCWD, além das áreas de ocorrência de fogo.



continua

Figura 5.1 Conclusão.



5.2.2. Estratificação da BAS das trajetórias de acordo com os níveis de MCWD e ocorrência de fogo.

Os resultados da BAS estratificada por MCWD e fogo, bem como o valor da média geral das trajetórias (mostrada no Capítulo 4), estão apresentados na Tabela 5.1. A comparação estatística das distribuições dos dados, entre as classes (Kruskal Wallis) e entre os anos, dentro de cada classe (Friedman ANOVA) mostrou diferença significativa ao nível de 95%.

Após a estratifição da BAS de cada trajetória, foi extraída a BAS média dentro de cada estrato e comparada com a média geral da trajetória (apresentada no Capítulo 4). Como esperado, a classe 1 de distúrbio (MCWD = 0mm) apresentou os maiores valores de BAS, dentre as demais classes, em todas as trajetórias. Por outro lado, a classe ‘fogo’ apresentou os menores valores de BAS média, revelando que este evento é mais adverso do que o déficit hídrico, mesmo o mais severo.

Considerando todos os anos, na trajetória 5, a média geral da trajetória foi maior do que a média da classe ‘fogo’ e menor do que a média da classe 1 (MCWD 0 mm). Na trajetória 6, a média geral foi maior do que aquelas apresentadas nas classes 5 (MCWD > 300mm) e ‘fogo’, e menor do que nas classes 1, 2 (MCWD 0-100mm) e 3 (MCWD 100-200). Já na trajetória 7, a média geral foi maior do que nas classes 4 (MCWD 200-300mm), 5 e ‘fogo’, ao mesmo tempo que foi menor do que aquelas apresentadas pelas classes 1, 2 e 3.

Esses resultados mostram que os distúrbios influenciaram o crescimento das vegetações, sugerindo um gradiente de biomassa dentro das trajetórias, de acordo com a intensidade de déficit hídrico e ocorrência de fogo.

Tabela 5.1 BAS média em cada classe de distúrbio, bem como a média geral da trajetória, em todos os anos.

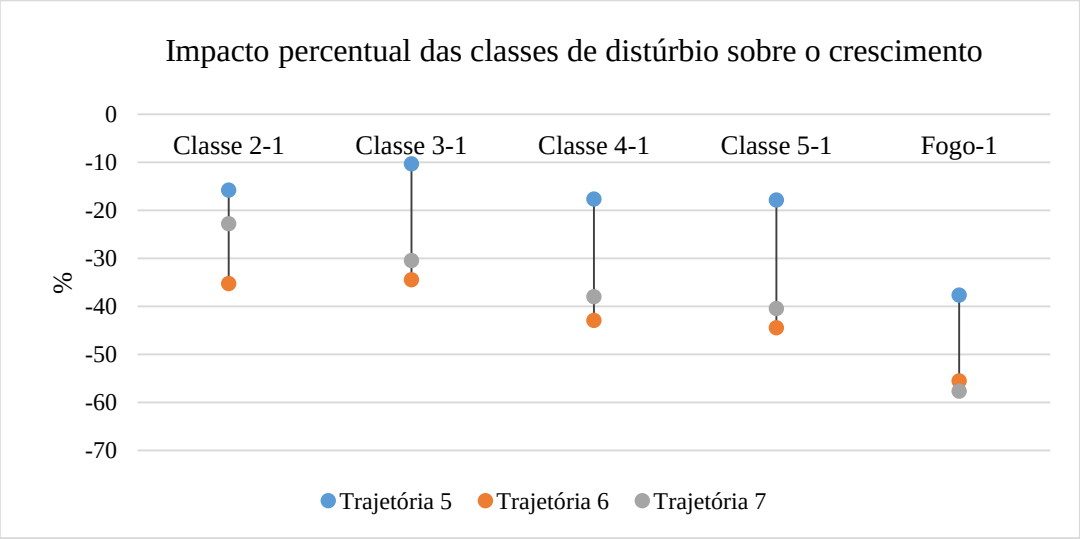
Classes	2007	2008	2009	2010
Trajetória 5				
0	41.37	42.14	48.31	54.52
0-100	34.09	38.45	44.52	38.76
100-200	41.27	40.96	41.6	41.23
200-300	36.66	37.19	34.28	44.42
> 300	34.51	36.6	41.35	39.73
Fogo	26.61	24.23	36.72	28.04
Media	36.5	37.53	40.95	40.05
Trajetória 6				
0	88.85	107.81	105.67	98.1
0-100	55.17	73.33	75.97	55.97
100-200	58.5	73.03	63.78	67.03
200-300	56.8	68	47.93	54.92
> 300	49.63	62.33	57.67	52.77
Fogo	39.21	52.8	42.39	43.8
Média	52.17	66.42	61.5	53.6
Trajetória 7				
0	138.47	157.02	153.38	149.05
0-100	109.2	124.45	123.5	104.65
100-200	100.83	117.4	100.1	97.46
200-300	87.06	100.89	97.78	85.2
> 300	82.81	97.7	92.77	82.84
Fogo	58.4	71.91	63.62	59.41
Média	90.26	106.12	98.98	88.75

5.2.3. Análise do impacto do MCWD e fogo nas taxas de incremento das trajetórias

Conforme verificado na seção 5.2.2, a despeito do tempo de regeneração ser o mesmo dentro de cada trajetória, a BAS média variou significativamente, conforme teste Kruskal Wallis, entre as diferentes classes de distúrbio, indicando que existe impacto do fogo e déficit hídrico nas taxas de incremento em biomassa. Esse impacto foi medido pela diferença percentual entre a Classe 1 e as demais classes de distúrbio (Figura 5.2). Os dados apresentados nesta figura representam a média dos anos, ou seja, o impacto

relativo de cada classe de distúrbio foi calculado para cada um dos anos, 2007 a 2010, e depois foi extraída a média desses anos.

Figura 5. 2. Diferença percentual média entre cada classe de MCWD e de ocorrência de fogo e a Classe 1 (MCWD = 0mm), em cada trajetória.



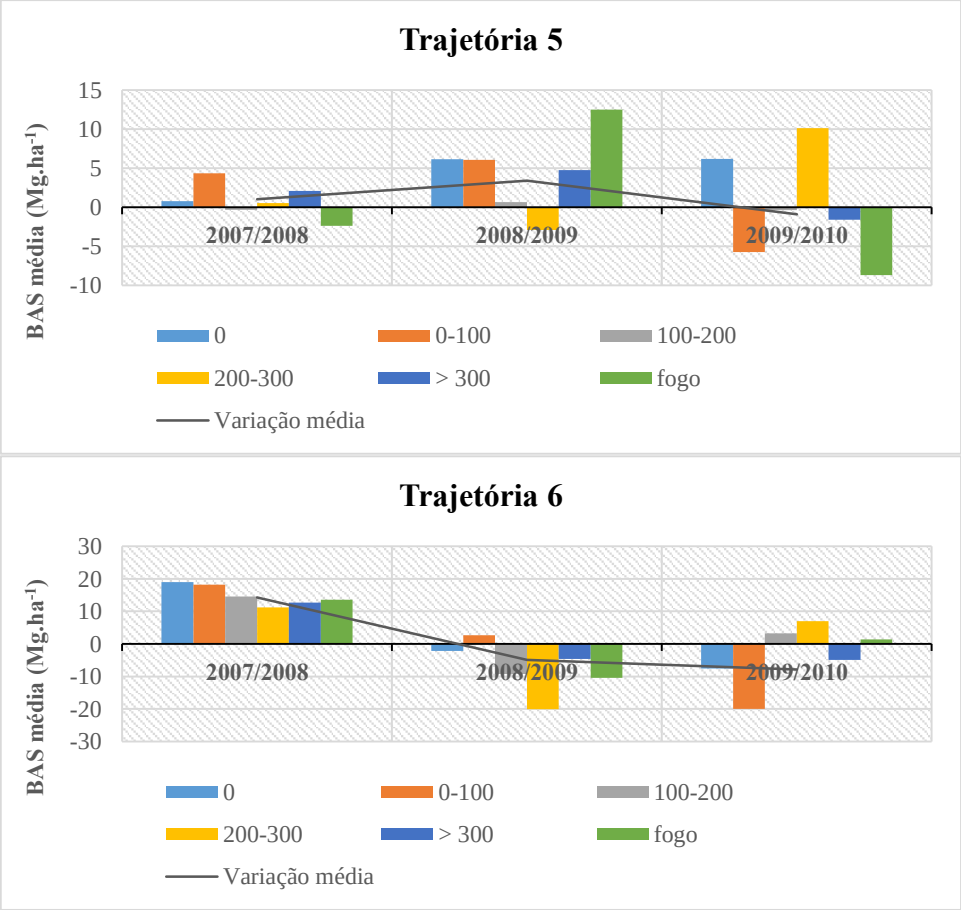
Conforme Figura 5.2, a trajetória 7 sofreu o menor impacto, enquanto que a trajetória 6 sofreu o maior, com exceção da classe 'fogo', onde o maior impacto foi sentido pela vegetação da trajetória 7. Nas três trajetórias, a classe que respondeu pela maior diferença em relação à classe controle (Classe 1) foi o 'fogo', com diferenças de -37,68%; -55,53%; -57,67%, nas trajetórias 5, 6 e 7, respectivamente. As classes que tiveram uma influência menor no crescimento foram a '3' nas trajetória 5 (-10,33%) e 6 (-34,43%), e a '2', na trajetória 7 (-22,79%).

Em suma, os resultados indicam que as taxas de incremento em biomassa sofreram influência negativa do déficit hídrico e fogo, refletindo na BAS acumulada em cada ano de análise. A ocorrência do fogo ocasionou as maiores reduções do potencial de incremento da biomassa, sendo que seu impacto foi maior quanto mais avançado era o estágio de regeneração da vegetação.

5.2.4. Análise das mudanças interanuais de BAS por classe de intensidade de MCWD e de ocorrência de fogo

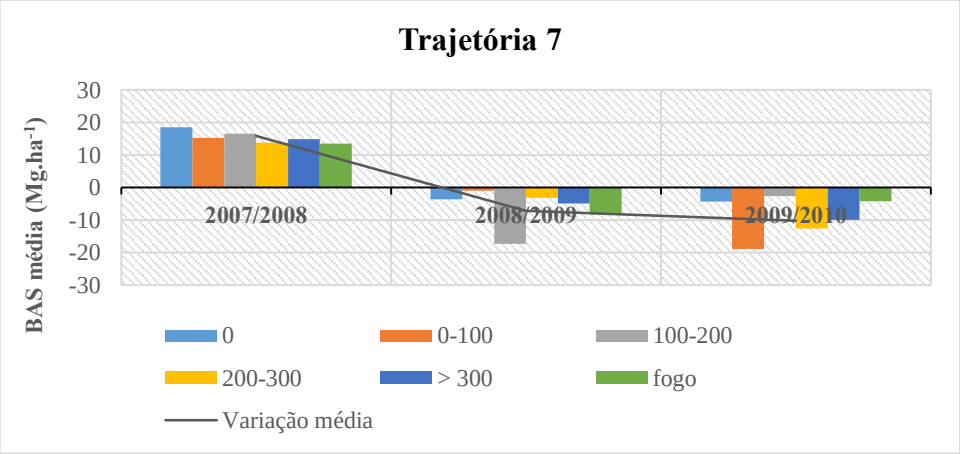
Nesta seção, foi avaliado o impacto dos distúrbios nas variações interanuais das trajetórias 5, 6 e 7, estratificadas em relação às classes de distúrbio. Os resultados, calculados com base naqueles mostrados na Tabela 5.1, estão apresentados nas Figuras 5.3. Nesta figura, também foi mostrada a variação interanual geral da trajetória (valores mostrados no Capítulo 4).

Figura 5. 3. Diferenças interanuais estratificadas por níveis de MCWD e ocorrência de fogo, em cada período de tempo. Linha contínua representa a variação média geral da trajetória. Níveis de MCWD estão em unidades de mm.



Continua

Figura 5.3 Conclusão



Na trajetória 5, o crescimento médio verificado no período 2007/2008 (1,03 Mg.ha^{-1}) foi influenciado pelas classes 1 (MCWD 0mm), 2 (MCWD 0-100mm), 4 (MCWD 200-300m) e 5 (MCWD > 300mm mês^{-1}), visto que nas classes 3 (MCWD 100-200mm) e 'fogo' houve redução da BAS entre 2007 e 2008. No período 2008/2009, o crescimento médio de 3,42 Mg.ha^{-1} foi resultado do crescimento em todas as classes, com exceção da classe 4, onde houve redução da BAS. Já no período 2009/2010, a redução média da BAS verificada para o período (-0,9 Mg.ha^{-1}) foi resultado das perdas ocorridas nas classes 2, 3, 5 e 'fogo', uma vez que na classe 1 e 4 houve incremento da biomassa. A classe 'fogo' teve maior influência nas perdas ocorridas entre 2009 e 2010 (-8,68 Mg.ha^{-1}).

Na trajetória 6, o crescimento médio verificado entre 2007 e 2008 (14,25 Mg.ha^{-1}) ocorreu em todas as classes, majoritariamente na classe 1 (18,96 Mg.ha^{-1}). Entre 2008 e 2009, a redução da BAS média (-4,92 Mg.ha^{-1}) foi resultado da redução ocorrida em todas as classes, com exceção da classe 2, onde houve incremento (2,64 Mg.ha^{-1}). Entre 2009 e 2010, a diferença média da trajetória (-7,9 Mg.ha^{-1}) foi resultado das reduções ocorridas nas classes 1, 2, e 5, visto que, nas classes 3, 4 e 'fogo' ocorreu incremento da biomassa média. A classe de maior influência no padrão de decrescimento ocorrido

entre 2008 e 2009 foi a ‘4’ (-20,07 $Mg.ha^{-1}$), enquanto que entre 2009 e 2010 foi a classe 2 (-20 $Mg.ha^{-1}$).

Na trajetória 7, o incremento médio verificado entre 2007 e 2008, bem como o decrescimento ocorrido entre 2008 e 2009, e entre 2009 e 2010 foram reflexo do que ocorreu em todas as classes. Entre 2008 e 2009, a classe de maior influência no padrão foi a ‘3’ (-17,3 $Mg.ha^{-1}$), enquanto que entre 2009 e 2010, a exemplo da trajetória 6, a classe 2 mostrou a maior diferença média na BAS (-18,85 $Mg.ha^{-1}$).

Esses resultados mostram o padrão do crescimento ocorrido em cada subdivisão da Amazônia brasileira, em relação à intensidade do déficit hídrico e ocorrência de fogo, revelando como cada classe influênciou no padrão geral observado em cada trajetória. O comportamento verificado na trajetória 5 foi diferente daqueles das trajetórias 6 e 7, em relação à dois pontos fundamentais: 1) apesar de o fogo ser o agente principal de impacto sobre as taxas de acúmulo de biomassa, em todas as trajetórias, proporcionando os menores valores de BAS em cada ano (Seção anterior), a sua ocorrência foi o principal responsável pelas perdas de BAS apenas da trajetória 5, entre 2009 e 2010, enquanto que em 6 e 7, para o mesmo período, a classe 2 (MCWD 0-100mm) foi a que teve o maior impacto nas reduções de BAS média; 2) os distúrbios analisados responderam pelas reduções de BAS ocorridas na trajetória 5, porém não explicam totalmente as perdas sucedidas nas trajetórias 6 e 7, visto que essa redução ocorreu mesmo na classe sem distúrbios (Classe 1).

Discussão com base na literatura

De forma resumida, os resultados mostraram que os incrementos são altamente influenciados pelo déficit hídrico e ocorrência de fogo, resultando em estoques de biomassa variáveis dentro da mesma trajetória. Ao mesmo tempo, a análise temporal da BAS estratificada por distúrbio mostrou que o déficit hídrico foi o principal causador das perdas nas trajetórias 6 e 7, enquanto a ocorrência de fogo resultou nas maiores perdas da trajetória 5.

Alguns estudos mostram que variáveis bioclimáticas como a precipitação anual, o

déficit de precipitação e a sazonalidade de precipitação são os principais condicionantes de variação no acúmulo de BAS (CHAZDON et al., 2016; POORTER et al., 2016). Os efeitos do stress hídrico sobre o crescimento pode ser dividido em: i) a cessação temporária do aumento da biomassa e (ii) perda de biomassa através da mortalidade da árvores (LEWIS et al., 2011). O padrão geral apresentado demonstrou a relação entre umidade e biomassa, uma vez que mostrou decrescimento no acúmulo da biomassa conforme se aumenta a deficiência hídrica local, demonstrado pelo MCWD.

Em relação às variações anuais de biomassa, uma possível explicação para as maiores perdas verificadas em 2010 é a ocorrência da seca, que foi uma das mais severas do século na Amazônia, impulsionada pelo fenômeno do El ninõ (MARENGO et al., 2011). A vegetação não passa incólume por este tipo de evento, sofrendo alterações fisiológicas e estruturais (NEPSTAD et al., 2004; TOOMEY et al., 2011), que refletem na sua capacidade de assimilar o carbono atmosférico, nas taxas de mortalidade e na vulnerabilidade ao fogo (PHILLIPS et al., 2009; XU et al., 2011; COSTA et al., 2010; ARAGÃO et al., 2007).

Conforme discutido por Nepstad et al. (2004), a principal consequência da restrição hídrica na vegetação é o aumento da taxa de mortalidade. Segundo Philips et al. (2010) secas de curto prazo do tipo ENSO (Oscilação Sul-El Niño) na Amazônia e outras áreas tropicais, têm mais influência sobre as árvores maiores, que são mais vulneráveis à mortalidade induzida pela stress hídrico. Ao mesmo tempo em que se estabelecem de forma promissora no processo competitivo (KEELING et al., 2008), as árvores tropicais de maiores dimensões também recebem um maior impacto nas condições de seca. Entre as possíveis razões para isso incluem a maior demanda de evapotranspiração (ET) e aumento da temperatura nas copas de árvores dominantes (FISHER et al., 2010) e falha hidráulica (NIKLAS; SPATZ, 2004; McDOWELL et al, 2002; McDOWELL et al., 2008).

A falha hidráulica, por sua vez, é uma hipótese que prevê que a reduzida disponibilidade de água no solo, aliada a alta demanda evaporativa, causa dessecamento dos tecidos vegetais que, quando completa, leva à morte celular (RYAN; YODER, 1997). Falha

hidráulica pode ser particularmente provável se a seca for suficientemente intensa e as plantas ficarem sem água, antes de ficarem sem carbono (*carbon starving*) (McDOWELL et al, 2008), e as consequencias para a dinâmica do crescimento vão depender da sensibilidade das árvores ao stress hídrico. Para Rowland et al. (2015) a falha hidráulica, mais do que a *carbon starving*, desencadeia a morte de árvores pela seca nas florestas tropicais.

O fogo, por sua vez, teve mais impacto sobre as vegetações secundárias jovens (Trajetória 5). Estudos tem sugerido aumento da frequência e intensidade do fogo durante períodos de seca extensiva em função do aumento da inflamabilidade da floresta (ALENCAR et al., 2006; ARAGAO et al., 2007; MORTON et al., 2013). Uma das causas é que a morte das árvores é precedida pela queda das folhas (ANDERSON et al., 2010), provocando acúmulo de serrapilheira que, associado ao aumento da abertura do dossel e da insolação do sub-bosque, facilita a secagem desse material, o que torna a floresta altamente sensível a incêndios de sub-bosque (LAURENCE; WILLIAMSON, 2001). Em comparação, a vegetação secundária jovem experimenta incêndios duas vezes mais frequentemente que as mais velhas, exatamente pela estrutura do dossel mais aberta (ALENCAR et al., 2015), sobretudo em anos de El Ninõ (DAVID et al., 2005).

A resposta das vegetações aos impactos induzidos por perturbações naturais ou antrópicas, associado a variações espaciais das taxas de recuperação da biomassa, poderia indicar o potencial de resiliência ou tendências de longo prazo a nível ecossistêmico. Assim, uma análise do espacial seria necessária para melhor entender os resultados em relação aos padrões de ocorrência dos distúrbios e adaptabilidade da vegetações, contudo os resultados encontrados sugerem que a umidade tem um papel fundamental no crescimento em biomassa das vegetações secundárias.

6. ANÁLISE DO IMPACTO DA REGENERAÇÃO DAS VEGETAÇÕES NO BALANÇO DO CARBONO

Conforme analisado nos capítulos anteriores, as classes do TerraClass são indicadoras de sucessão e, quando colocadas em sequência cronológica, permitem inferir o estágio de regeneração em termos estruturais e de biomassa acumulada. As trajetórias indicadoras do crescimento dos pastos sujos abandonados e regenerações com pasto mostraram incremento entre os anos, já as vegetações secundárias foram afetadas por distúrbios e apresentaram perda de biomassa. A análise das mudanças temporais por classe de distúrbio mostrou que o déficit hídrico foi o fator preponderante na perda de biomassa, notadamente sobre as vegetações de maior porte, e o fogo foi o principal fator sobre as vegetações mais joveis, representada pela trajetória 5.

Neste capitulo, foi analisado a biomassa total, adquirida ou perdida, em todas as trajetórias, para estimar os fluxos de carbono no período analisado, contribuindo para avançar no conhecimento sobre o papel do crescimento da vegetação secundaria no ciclo de carbono na Amazonia.

6.1 Metodologia

Duas análises são desenvolvidas neste capítulo:

6.1.1. Balanço total de carbono relacionados ao processo de abandono de pastos e regeneração da vegetação secundária no período 2007 a 2010, combinando dados de área de cada trajetória e valores médios de ganho e perda de biomassa, foram estimados o incremento ou perda de biomassa total e carbono (considerando uma relação de 50% da biomassa) por trajetória e o balanço geral por ano em relação a todas as trajetórias.

6.1.2. Análises de taxas de crescimento para modelos de emissão, combinando resultados de múltiplas trajetórias (Tr1 a Tr7 e a classe 'Foresta'), foi plotado um gráfico com os valores médios (conforme mostrado no capítulo 4) indicando os incrementos médios anuais (dentro do mesmo estágio de regeneração, ou seja, trajetória), os incrementos envolvidos na passagem de um estágio para outro (entre estágios de regeneração), além dos incrementos envolvidos na transição de uma classe

para outra, ou seja, quando ocorre a mudança estrutural da vegetação.

6.2 Resultados

6.2.1 Variações interanuais da biomassa total e carbono

A tabela 6.1 mostra a BAS média e área de cada trajetória, em cada ano, enquanto que a tabela 6.2 apresenta a estimativa de ganho e perda de biomassa total nas trajetórias, calculadas a partir dos dados da tabela 6.1.

Tabela 6. 1. Biomassa média e área de cada trajetória, em cada ano, que serviram de base para o cálculo da biomassa total em Tg.

	BAS ($Mg.ha^{-1}$)				Area (ha)				Biomassa total (Tg)			
Trajetórias	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**
Traj 1	5,96	6,31	6,74	7,25	9240	9213	9303	9207	0,06	0,06	0,06	0,07
Traj 2	7,5	8,25	8,4	9,05	57561	59470	59765	59052	0,43	0,49	0,50	0,54
Traj 3	12,5	15,75	15,87	15,99	110843	112115	111356	110917	1,39	1,76	1,77	1,78
Traj 4	22,85	23,61	25,56	26,6	9657	9573	9731	9937	0,22	0,22	0,25	0,26
Traj 5	36,5	37,53	40,95	40,05	101385	99713	102338	102607	3,70	3,74	4,19	4,11
Traj 6	52,17	66,42	61,5	53,6	991612	1013118	1002094	991802	51,73	67,29	61,63	53,16
Traj 7	90,26	106,12	98,98	88,75	4074488	4126572	4083157	4066778	367,76	437,92	404,15	360,93

Tabela 6. 2. Mudanças interanuais da biomassa total, a partir da biomassa calculada na Tabela 6.1. O fator de conversão do Carbono usado foi de 50%.

	Mudança anual da biomassa (Tg)			Mudança anual do Carbono (Tg)		
Trajetórias	**2007/2008**	**2008/2009**	**2009/2010**	**2007/2008**	**2008/2009**	**2009/2010**
Traj 1	0,0031	0,0046	0,0040	0,0015	0,0023	0,0020
Traj 2	0,0589	0,0114	0,0324	0,0295	0,0057	0,0162
Traj 3	0,3803	0,0014	0,0063	0,1901	0,0007	0,0032
Traj 4	0,0053	0,0227	0,0156	0,0027	0,0114	0,0078
Traj 5	0,0417	0,4485	-0,0813	0,0208	0,2242	-0,0407
Traj 6	15,5589	-5,6625	-8,4682	7,7795	-2,8312	-4,2341
Traj 7	70,1486	-33,7609	-43,2243	35,0743	-16,8804	-21,6122
Total	86,1968	-38,9348	-51,7155	43,0984	-19,4674	-25,8577

Entre 2007 e 2008, o balanço foi positivo e envolveu um acúmulo de carbono de 43,0984 Tg, sendo que cerca de 81% desse valor foi oriundo das vegetações secundárias

da trajetória 7 e 16% da trajetória 6. Entre 2008 e 2009 o balanço foi negativo de -19,4674 TgC, sendo que a contribuição da trajetória 7 foi cerca de 84%. Já entre 2009 e 2010, as perdas se intensificaram, resultando em balanço negativo –25,8577 TgC. Aproximadamente 83% desse valor foi resultado do que ocorreu na trajetória 7. Dessa forma, apesar do crescimento das trajetórias 1 a 4, a biomassa não foi suficiente para compensar as perdas ocorridas nas vegetações secundárias que ocorreram entre 2008 e 2009 e entre 2009 e 2010.

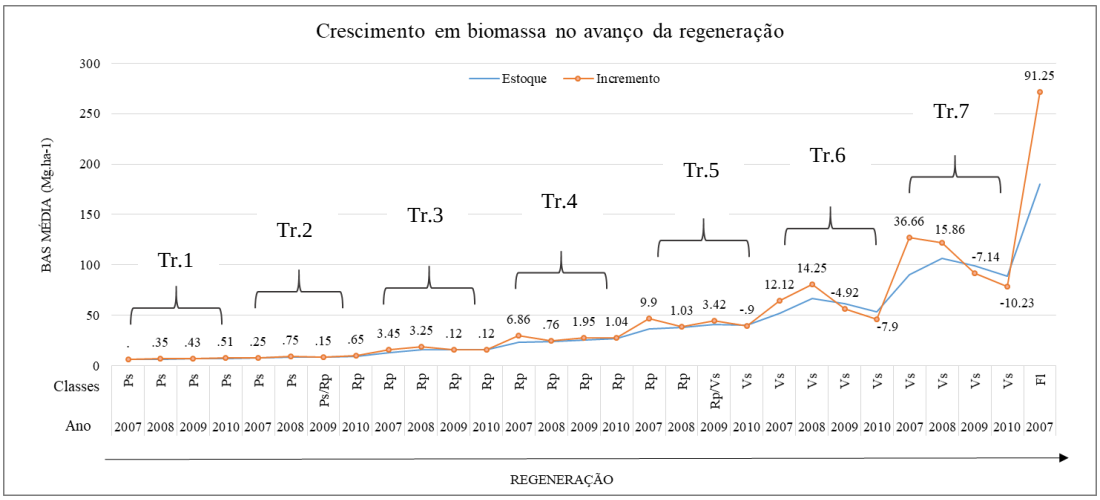
O balanço final do carbono foi marcadamente influenciado pela trajetória 7, seguida da trajetória 6. Demais trajetórias não tiveram impacto significativo, funcionando como parâmetros de incremento potencial que pode ocorrer quando as áreas abandonadas seguem no processo de regeneração.

O potencial de emissão de carbono das vegetações secundárias, quando atingidas por distúrbios, é significativa. As perdas de biomassa ocasionadas podem levar a um efluxo sustentado de dióxido de carbono da decomposição da madeira, com perturbação da troca líquida e fluxos de carbono. Com a incidência do fogo, os impactos são pronunciados em função das emissões imediatas de carbono.

6.2.2 Incremento potencial na regeneração da vegetação

A Figura 6.1 ilustra uma simulação do processo de acúmulo de biomassa a partir da classe Pasto sujo até Vegetação secundária (Trajetória 1 a 7). O gráfico resume dados de estoque de biomassa e os incrementos médios envolvidos no processo de regeneração conforme ela avança, dos pastos sujos abandonados (Tr1/Tr2), passando a regenerações com pasto (Tr3/Tr4/Tr5) e vegetações secundárias (Tr6/Tr7).

Figura 6. 1. Estoques de biomassa e incrementos em um modelo do processo de regeneração das áreas abandonadas com base nas classes do TerraClass.



Os resultados sintetizados na Figura 6.1 ilustram que:

- O incremento necessário para que a vegetação secundária mais avançada alcance os patamares de biomassa de floresta prímaria é 91,25 $Mg.ha^{-1}$, contudo não é possível prever o tempo para isso, visto que não há uma trajetória ligando vegetação secundária e floresta.
- O potencial de incremento, na média dos anos, mostradas nas trajetorias, 1, 2, 3 e 4 foi de 0,43 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$; 0,52 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$; 1,17 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$; 1,25 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$; respectivamente. Assim, os incrementos aumentam conforme a regeneração avança para vegetações com maior proporção de espécies arbóreas (Regeneração com pasto), mostrando a importância da estrutura da vegetação na mensuração da biomassa.
- Já em relação às trajetórias 5, 6 e 7, o potencial de incremento fica toldado em função das perdas de biomassa observadas em alguns períodos. No entanto, é possível mensurar os ganhos nos primeiros anos, onde a Trajetória 5 apresentou um incremento de 3,42 $Mg.ha^{-1}$ entre 2008 e 2009 (transição de Regeneração com pasto para Vegetação secundária). Já nas vegetações secundárias mais avançadas, o incremento se torna mais evidente, sendo de 14,25 $Mg.ha^{-1}$, na

trajetória 6 e 15,86 $Mg.ha^{-1}$ na trajetória 7, considerando o período onde houve crescimento dentro dessas trajetórias, ou seja, de 2007 a 2008.

- Avaliando o crescimento entre os estágios de regeneração, os incrementos devem ser tomados com cautela, visto que entre as trajetórias não há um horizonte temporal definido. O padrão mostrado é apenas uma simulação dos eventos que ocorrem na regeneração, e portanto, o tempo de transição entre os estágios pode ser maior que um ano. Além disso, a evolução da regeneração é altamente dependente das condições ambientais, podendo variar espacial e temporalmente. Entre trajetória 1 e 2 o crescimento em biomassa foi de 0,25 $Mg.ha^{-1}$; entre 2 e 3, 3,45 $Mg.ha^{-1}$; entre 3 e 4, 6,86 $Mg.ha^{-1}$; entre 4 e 5, 9,9 $Mg.ha^{-1}$; entre 5 e 6, 12,2 $Mg.ha^{-1}$ e entre 6 e 7, 36,6 $Mg.ha^{-1}$. Em outras palavras, o avanço da regeneração favorece a absorção do carbono atmosférico, aumentando a contribuição dessas vegetações no balanço final.

Considerações finais

Estas análises refletem os fluxos do carbono na vegetação após o desmatamento quando derivados das classes do TerraClass, com base na proposta conceitual de trajetorias apresentada nesta tese. Evidentemente, essas transições compõem uma simplificação, já que o padrão de crescimento nao é linear, nem no tempo e tampouco no espaço. Contudo, a analise apresentada contribui para entender o *potencial* de acúmulo de carbono na recomposição da biomassa, dependendo da presença ou não de distúrbios de fogo e déficit hídrico. Esses resultados são de suma importância para modelos de crescimento da vegetação e que podem ser incorporados em modelos de emissão.

Além dos distúrbios, uma questão importante a considerar em relação ao impacto da regeneração no balanço de carbono é o tempo de permanência da vegetação secundária em um determinado contexto geografico. Na Amazônia brasileira, a meia vida da classe de vegetação secundária pode variar espacialmente entre 3 e 21 anos, sendo em media 5 anos (ALMEIDA et al., 2009). A meia vida é o tempo que as áreas abandonadas permanecem assim, antes de serem novamente cortadas em pelo menos 50% da área.

Assim, a regeneração pode evoluir ou não, resultando em diferentes impactos no balanço do carbono.

Essa variável é utilizada no modelo de emissões INPE-EM (AGUIAR et al., 2012), que estima as emissões dos gases do efeito estufa (GEE) por mudanças de cobertura da terra, para estimar as taxas de remoção da vegetação secundária. À medida que o tempo de meia vida aumenta, também aumenta a quantidade de carbono atmosférico incorporado à biomassa das vegetações. Por outro lado, quando a vegetação é novamente cortada, o carbono é re-emitido, aumentando o impacto negativo no balanço de emissões. Contudo, o potencial de equilibrar as emissões do desmatamento primário é maior quanto maior o tempo de meia vida, tendo em vista que vegetações secundárias de 5 anos de idade resultam em 5% na compensação das emissões, enquanto que com 21 anos esse percentual sobe para 15% (AGUIAR et al., 2012).

Por outro lado, se os pastos abandonados permanecerem assim, ou seja, em processo de regeneração sem qualquer limpeza ou re-clareamento da área, esse percentual pode atingir os 100%, dependendo da proporção entre área de desmatamento e vegetações secundárias. Sendo assim, é de suma importância que essas áreas que já foram desmatadas, e por que questões diversas foram abandonadas, sejam mantidas em processo de regeneração, tanto em termos de compensação de emissões, quanto na restituição das funções ecológicas e ecossistêmicas locais.

Esses resultados dão legitimidade aos discursos que pregam a necessidade de políticas públicas de proteção e preservação de áreas em processo regenerativo, com ênfase em propostas que envolvam alternativas econômicas e de usos alternativos dos recursos provenientes do componente florestal da Amazônia.

7. CONCLUSÕES

Síntese dos resultados

Esta tese examinou a hipótese de que trajetórias de cobertura da terra, concebidas a partir das classes do TerraClass ‘pasto sujo’, ‘regeneração com pasto’ e ‘vegetação secundária’, podem ser usadas para determinar estágios de regeneração em relação à floresta primária. A partir dos objetivos propostos, as principais contribuições e conclusões são apresentadas a seguir.

Contribuição 1: Modelo conceitual de trajetórias de mudança de cobertura na Amazônia e metodologia para estimativa de BAS em diferentes classes de cobertura e estágios de regeneração

- Foi proposto um modelo conceitual para representação de trajetórias mudanças de cobertura na Amazonia Brasileira, com enfoque em trajetórias relacionadas na formação de vegetação secundaria em áreas de pastagens que permitem simular os caminhos do carbono após o desmatamento.
- Foi explorada uma estratégia metodológica de combinação das trajetórias mencionadas a dados multi-temporais de biomassa acima do solo, derivados de imagens PALSAR-ALOS. Testemunhas que foram utilizadas para delimitar os limiares inferior e superior de biomassa possíveis na Amazônia (pasto limpo e floresta), corroboraram os valores de biomassa encontrada nas trajetórias. Embora os dados SAR tenham limitações devido à sua alta sensibilidade às variações ambientais, os resultados mostraram a confiabilidade dessa estratégia, que se mostrou prática e eficiente, revelando também a capacidade desses dados de captarem as variações estruturais da vegetação.
- Os valores de biomassa encontrados se mostraram coerentes com o design das trajetórias, permitindo determinar estágios de regeneração em termos de biomassa, bem como valores médios de BAS para as classes de cobertura, de acordo com a classe antecedente e o tempo de regeneração entre uma e outra. Este resultado imprime um salto no potencial de utilização dos dados do TerraClass, à medida em que integra características estruturais com a biomassa.

Contribuição 2: Incrementos em biomassa no processo de formação de vegetação secundaria, a partir de pastos abandonados

- A análise temporal das trajetórias, baseada nas mudanças interanuais da BAS média, mostrou que os pastos quando abandonados (Trajetória 1), entram em processo de regeneração, acumulando biomassa à medida que avançam para outras classes de cobertura. Assim, os incrementos médios anuais nas trajetórias 1 a 4 representaram o padrão de crescimento em biomassa nas classes Pasto sujo e Regeneração com pasto. Por outro lado, as trajetórias envolvendo a vegetação secundária (Trajetórias 5, 6 e 7) apresentaram redução da BAS em alguns períodos e não puderam compor o crescimento temporal dessas classes.

Contribuição 3: Influência do déficit hídrico e do fogo nas taxas de crescimento das vegetações secundárias

- A estratificação dos dados das trajetórias em função de classes de distúrbios mostrou que o déficit hídrico e o fogo tiveram influência no acúmulo de biomassa nas vegetações secundárias, mostrando variações da BAS média entre os estratos. Os valores de BAS por nível de déficit hídrico (Classe 1 a 5) sugerem que a disponibilidade hidrica é fator limitante no processo de crescimento. Enquanto que a classe 'fogo' teve o maior impacto nas taxas de incremento, reduzindo-os em pelo menos 37%, conforme estágio de regeneração, em relação à classe controle (Classe 1).
- Assim, o deficit hidrico e o fogo desempenharam papel importante na variação dos incrementos, e por conseguinte, na biomassa acumulada, e esse fato pode resultar em repostas não lineares do crescimento no tempo.

Contribuição 4: Influência do défict hídrico e do fogo nas variações inter-anuais de biomassa das vegetações secundárias.

- Essa análise mostrou que os distúbios influenciaram as perdas ocorridas nas vegetações secundárias, sendo que as vegetações mais avançadas sentiram mais a influência do deficit hídrico, e as mais jovens, a ocorrência de queimadas.

- Entretanto, os decréscimos de biomassa verificadas nas trajetórias 6 e 7 não são totalmente explicadas pelos distúrbios, visto que a redução ocorreu também nas áreas de controle (Classe 1). Este resultado sugere um viés na estimativa da biomassa, em decorrência de variações na sensibilidade do radar, ou a interferência de fatores ambientais não analisados neste estudo.

Questões metodológicas e trabalhos futuros

Modelo conceitual de trajetórias

As trajetórias se mostraram eficientes no intuito de distinguir as diferentes vegetações secundárias na Amazônia brasileira, em função dos histórico de cobertura. Ao mesmo tempo, outros tipos de vegetações (pastagens) foram contempladas nas análises, tendo em vista que o processo de regeneração envolve absorção de carbono atmosférico desde o seu início, que foi representado aqui pela classe 'Pasto sujo' do TerraClass, a partir do momento que são abandonados. A partir daí, o processo de sucessão se inicia, avançando para estruturas vegetacionais com maior proporção de espécies arbóreas (Regeneração com pasto) até que se atinja a estrutura necessária para que seja classificada como 'Vegetação secundária' propriamente dita.

Trabalhos futuros podem ser empreendidos para aumento do horizonte temporal das trajetórias utilizando, além os dados de 2004, 2008 e 2010, os dados do TerraClass de 2012 e 2014. Além de aumentar de 6 para 10 anos o tempo de análise, a combinação dos dados de mais 2 anos irá gerar mais trajetórias, possibilitando o refinamento da simulação do processo de regeneração com base nas classes do TerraClass, e melhorando o entendimento da dinâmica do carbono após o desmatamento.

Mapas de biomassa acima do solo

As maiores incertezas são relativas aos mapas de biomassa. Na ausência de amostras sistemáticas e freqüentes de inventário de florestas, as técnicas de sensoriamento remoto, entre elas os dados SAR, são consideradas a abordagem mais promissora para fornecer informações sobre a situação da cobertura florestal e estoques de carbono. Os

pontos fortes do SAR são a sua capacidade de operar em todas as condições meteorológicas e provisão de observações sistemáticas e o estabelecimento de arquivos de dados para estudos de longo prazo. Contudo, os dados de radar são altamente sensíveis a fatores ambientais, principalmente umidade. Além disso, a sensibilidade em tipologias florestais muito ricas em biomassa pode ser limitada devido à saturação do sinal.

O pré processamento dos dados realizados neste estudo - normalização dos dados e exclusão de valores extremos - visou reduzir as incertezas inerentes ao dado, tanto em relação ao efeito da umidade do solo (valores menores) quanto em relação à saturação (valores maiores). A utilização do mapa de trajetória como uma máscara sobre os mapas de biomassa permitiu inferir a sensibilidade do radar em discriminar as variações estruturais, visto que as variações de biomassa entre as trajetórias foram suficientes para diferencia-las enquanto estágios de regeneração distintos. A partir disso, a incerteza na acurácia dos dados de BAS fica restrita às trajetórias 6 e 7 que foram as únicas que mostraram valores superiores a 155 $Mg.ha^{-1}$, assumindo-se este valor como limiar de saturação.

Em suma, a associação entre dados que revelam a estrutura da vegetação associado a mapas de BAS produzidos a partir de dados SAR se mostrou uma estratégia eficaz na descrição dos padrões de biomassa e crescimento nas vegetações. Contudo, a acurácia dos mapas obtidos seriam melhor determinadas com o apoio de dados de campo, a partir de uma validação cruzada e estatísticas associadas.

É importante salientar que os resultados encontrados são amplamente influenciados pelas variações espaciais dos fatores ligados ao acúmulo de biomassa, tais como aqueles relacionados à fertilidade do solo, além da disponibilidade hídrica, que se mostrou fator determinante nas taxas de incremento.

A análise espacializada dos resultados, em função de sub-regiões classificadas com base em outros fatores, é uma questão pertinente para trabalhos futuros, posto que permitirá melhor entender o padrão encontrado e elucidar algumas questões, tais como: *como os estoques de biomassa variam em relação a essas sub-regiões dentro da mesma*

trajetória? Como a curva de incremento pode se comportar em cada sub-região?

Relação distúrbios x crescimento

A metodologia aplicada nesta tese, combinação de dados de fogo e déficit hídrico a partir de ferramentas de geoprocessamento, apesar de simples se mostrou eficiente, visto que possibilitou a estimativa do impacto relativo das diferentes classes de distúrbio sobre o crescimento das vegetações secundárias. Essas análises mostraram como o crescimento pode variar no tempo em função dos impactos ao qual cada ambiente está submetido, e podem ser imporporado aos modelos de crescimento da vegetação secundária.

Como no caso da biomassa, uma análise espacializada baseado em dados de anomalias do déficit hidrico é desejável para melhor entendimento dos resultados, visando responder a questões como: *Como os impactos do déficit hídrico variam em função da sensibilidade diferenciada da vegetação? Como essa sensibilidade pode ser descrita com base nos limiares de déficit hídrico considerados normais para cada ambiente associado à adaptabilidade específica da vegetação?*

As respostas a essas questões, juntamente com àquelas direcionadas à biomassa, podem ajudar a melhor entender a vulnerabilidade das vegetações às mudanças climáticas em curso na Amazônia brasileira, bem como os impactos que isso pode ocasionar no balanço de emissões. O ajuste de curvas de crescimento específicas para cada ambiente, com duas possibilidades de parâmetros, com e sem a presença de distúrbios, constituiria avanço significativo na modelagem do crescimento das vegetações secundárias a serem implementadas nos modelos de emissão de carbono por desmatamento e mudanças de uso e ocupação do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARD, F.; EVA, H. D.; MAYAUX, P.; STIBIG, H. J.; BELWARD, A. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. **Global Biochemical Cycles**, v.18, n. 2. 2004.

AGUIAR, A.P.D., OMETTO, J.P., NOBRE, C. et al. Modeling the spatial and temporal heterogeneity of deforestation-driven carbon emissions: the INPE-EM framework applied to the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 18, p. 3346–3366. 2012

AGUIAR, A. P. D.; GUIMARÃES, V. I. C.; OLIVEIRA, A. T.; L, D. E.; MANN, T. P.; ARAÚJO, O. S. R.; MATEUS, B.; SANTOS, C. A.; KAWAKAMI, S. E.; CRUZ, A. L. E. O.; AFONSO, N. C.; H., O. J. P. Land use change emission scenarios: anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 2, p. 1821–1840. 2016.

ALENCAR, A. A.; BRANDO, P. M.; ASNER, G. P.; PUTZ, F. E. Landscape fragmentation, severe drought, and the new Amazon forest fire regime. **Ecological Applications**, v. 25, p. 1493–1505, 2015.

ALLEN, D. C.; BRESHEARS, D. D., MCDOWELL, G. N. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. **Ecosphere**, v. 6, p. art129, 2015.

ALMEIDA, C. A.; VALERIANO, D. M.; ISABEL, M.; ESCADA, S.; RENNÓ, D. Estimativa de área de vegetação secundária na Amazônia Legal Brasileira. **Acta Amazonica,** v. 40, p. 285–298, 2010.

ALMEIDA, C. A. DE; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; ADAMI, M.; VENTURIERI, A.; DINIZ, C. G.; DESSAY, N.; DURIEUX, L.; GOMES, A. R. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica**, v. 46, p. 291-302. 2016.

ALVES, D. S. Space-time dynamics of deforestation in Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing,** v. 23, p. 2903–2908, 2002.

ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; ARAGAO, L. E. O. C.; LADLE, R., ARAI, E.; BARBIER, N.; PHILIPS, O. Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. **New Phytologist**, v. 187, p. 733-750, 2010.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 7, 2007.

ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; ROSAN, T. M.; VEDOVATO, L. B.; WAGNER, F. H.; SILVA, C. V. J.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ARAI, E.; AGUIAR, A. P.; BARLOW, J.; BERENGUER, E.; DEETER, M. N.; DOMINGUES, L. G.; GATTI, L.; GLOOR, M.; MALHI, Y.; MARENGO, J. A.; MILLER, J. B.; PHILLIPS, O. L.; SAATCHI, S. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, p. 536, 2018.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, 2007.

ASNER, G. P.; ALENCAR, A. Drought impacts on the Amazon forest: the remote sensing perspective. **New Phytologist**, v. 187, p. 569–578, 2010.

BACCINI, A.; GOETZ, S. J.; WALKER, W. S.; LAPORTE, N. T.; SUN, M.; SULLA-MENASHE, D.; HACKLER, J.; BECK, P. S. A.; DUBAYAH, R.; FRIEDL, M. A.; SAMANTA, S.; HOUGHTON, R. A. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Climate Change**, v. 2, p. 182, 2012.

BROWN, S.; LUGO, A. E.: Tropical secondary forests. **Journal Tropical Ecological**. v. 6, p. 1–32, 1990.

CARTUS, O.; SANTORO, M.; KELLNDORFER, J. Mapping forest aboveground biomass in the Northeastern United States with ALOS PALSAR dual-polarization L-band. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 466–478, 2012.

CHAZDON, R. L.; BROADBENT, E. N.; ROZENDAAL, D. M. A.; BONGERS, F.; ZAMBRANO, A. M. A.; AIDE, T. M.; BALVANERA, P.; BECKNELL, J. M.; BOUKILI, V.; BRANCALION, P. H. S.; CRAVEN, D.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; CABRAL, G. A. L.; DE JONG, B.; DENSLOW, J. S.; DENT, D. H.; DEWALT, S. J.; DUPUY, J. M.; DURÁN, S. M.; ESPÍRITO-SANTO, M. M.; FANDINO, M. C.; CÉSAR, R. G.; HALL, J. S.; HERNÁNDEZ-STEFANONI, J. L.; JAKOVAC, C. C.; JUNQUEIRA, A. B.; KENNARD, D.; LETCHER, S. G.; LOHBECK, M.; MARTÍNEZ-RAMOS, M.; MASSOCA, P.; MEAVE, J. A.; MESQUITA, R.; MORA, F.; MUÑOZ, R.; MUSCARELLA, R.; NUNES, Y. R. F.; OCHOA-GAONA, S.; ORIHUELA-BELMONTE, E.; PEÑA-CLAROS, M.; PÉREZ-GARCÍA, E. A.; PIOTTO, D.; POWERS, J. S.; RODRÍGUEZ-VELAZQUEZ, J.; ROMERO-PÉREZ, I. E.; RUÍZ, J.; SALDARRIAGA, J. G.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A.; SCHWARTZ, N. B.; STEININGER, M. K.; et al. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. **Science Advances**, v. 2, n. 5, 2016.

COSTA, F. D. A. Path dependency and the agrarian transformation in the Amazon Biome: the economic significance of the secondary vegetation for the sustainable development. **Novos Cadernos NAEA,** v.7, p.111-158, 2004.

COSTA, F. A. Heterogeneidade estrutural e trajetórias tecnológicas na produção rural da Amazônia. In: BATISTELLA, M.; MORAN, E. F.; ALVES, D. S. (Eds.). **Amazônia:** natureza e sociedade em transformação. São Paulo: Edusp, 2008. p.137-180.

DAVID, R.; DANIEL, N.; PAULO, M. MICROMETEOROLOGICAL AND CANOPY CONTROLS OF FIRE SUSCEPTIBILITY IN A FORESTED AMAZON LANDSCAPE. **Ecological Applications**, v. 15, p. 1664–1678, 2005.

GIBBS, H. K.; BROWN, S.; NILES, J. O.; FOLEY, J. A. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks : making REDD a reality. **Environmental Research Letters,** v. 45023, 2007.

GRACE, J.; MITCHARD, E.; GLOOR, E. Perturbations in the carbon budget of the tropics. **Global Change Biology**, v. 20, p. 3238–3255, 2014.

HESS, L. L.; MELACK, J. M.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; GASTIL, M. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 404–428, 2003.

HOUGHTON, R. A.; LAWRENCE, K. T.; HACKLER, J. L.; BROWN, S. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, v. 7, p. 731–746, 2001.

HOUGHTON, R. A.; SKOLE, D. L.; NOBRE, C. A.; HACKLER, J. L.; LAWRENCE, K. T.; CHOMENTOWSKI, W. H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, v. 40, p. 301–304, 20 jan. 2000.

HIRSCH, I. A., LITTLE, S. W., HOUGHTON, A. R., SCOTT, A. N., WHITE, D. J. The net carbon flux due to deforestation and forest re-growth in the Brazilian Amazon: analysis using a process-based model. **Global Change Biology**, v. 10, p. 908–924, 2004.

HURTIENNE, T. Agricultura familiar e desenvolvimento rural sustentável na Amazônia. **Novos Cadernos NAEA**, v. 8, p. 19-071, 2005.

IMHOFF, M. L. Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, p. 511–518, 1995.

JOHNSON, C. M.; ZARIN, D. J.; JOHNSON, A. H. Post-disturbance aboveground biomass accumulation in global secondary forests. **Ecology, v.** 81, p. 1394–1401, 2000.

LAURANCE, W. F.; WILLIAMSON, G. B. Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon. **Conservation Biology**, v. 15, p. 1529-1535, 2001

LEWIS, S. L.; BRANDO, P. M.; PHILLIPS, O. L.; VAN DER HEIJDEN, G. M. F.; NEPSTAD, D. The 2010 Amazon drought. **Science**, v. 331, p. 554 -554, 2011.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Classification of successional forest stages in the Brazilian Amazon basin. **Forest Ecology and Management**, v. 181, p. 301–312, 2003.

LUCAS, R.; ARMSTON, J.; FAIRFAX, R.; FENSHAM, R.; ACCAD, A.; CARREIRAS, J.; KELLEY, J.; BUNTING, P.; CLEWLEY, D.; BRAY, S.; METCALFE, D.; DWYER, J.; BOWEN, M.; EYRE, T.; LAIDLAW, M.; SHIMADA, M. An evaluation of the ALOS PALSAR L-band backscatter— above ground biomass relationship Queensland, Australia: impacts of surface moisture condition and vegetation structure. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 3 p. 576–593, 2010.

LUCAS, R. M.; CRONIN, N.; LEE, A.; MOGHADDAM, M.; WITTE, C.; TICKLE, P. Empirical relationships between AIRSAR backscatter and LiDAR-derived. **Remote Sensing of Environment,** v. 100, p. 407–425, 2006.

MAGNUSSON, M.; FRANSSON, J. E. S.; ERIKSSON, L. E. B.; SANDBERG, G.; SMITH-, G.; ULANDER, L. M. H. Estimation of forest stem volume using ALOS PALSAR satellite images. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, p. 4343–4346, 2007.

MCDOWELL, N. G.; PHILLIPS, N.; LUNCH, C.K.; BOND, B.J.; RYAN, M.G. Hydraulic limitation and compensation in large, old Douglas-fir trees. **Tree Physiology,** v. 22, p. 763–774, 2002.

MCDOWELL, N.; POCKMAN, W. T.; ALLEN, C. D.; BRESHEARS, D. D.; COBB, N.; KOLB, T.; PLAUT, J.; SPERRY, J.; WEST, A.; WILLIAMS, D. G.; YEPEZ, E. A. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? **New Phytologist**, v. 178, p. 719-739, 2008

MERMOZ, S.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; VILLARD, L.; LE TOAN, T.; ROSSI, V.; GOURLET-FLEURY, S. Decrease of L-band SAR backscatter with biomass of dense forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 159, p. 307–317, 2015.

MITCHARD, E. T. A.; SAATCHI, S. S.; WOODHOUSE, I. H.; NANGENDO, G.; RIBEIRO, N. S.; WILLIAMS, M.; RYAN, C. M.; LEWIS, S. L.; FELDPAUSCH, T. R.; MEIR, P. Using satellite radar backscatter to predict above-ground woody biomass: a consistent relationship across four different African landscapes. **Geophysical Research Letters**, v. 36, 2009.

MORAN, E. F.; BRONDIZIO, E. S.; TUCKER, J. M.; DA SILVA-FORSBERG, M. C.; MCCRACKEN, S.; FALESI, I. Effects of soil fertility and land-use on forest succession in Amazônia. **Forest Ecology and Management**, v. 139, p. 93–108, 2000.

MORTON, D. C.; LE PAGE, Y.; DEFRIES, R.; COLLATZ, G. J.; HURTT, G. C. Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, p.20120163, 2013.

NATE, M.; NEIL, C.; THOMAS, K.; JENNIFER, P.; JOHN, S.; ADAM, W. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? **New Phytologist**, v. 178, p. 719–739, 2008.

NEEFF, T. Spatial modeling of primary and secondary forest growth in Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 219, p. 149–168, 2005.

NEEFF, T.; LUCAS, R. M.; BRONDIZIO, E. S.; FREITAS, C. C. Area and age of secondary forests in brazilian Amazonia 1978 – 2002:an empirical estimate. **Ecossytems,** v.9, p. 609–623, 2006.

NEEFF, T.; SANTOS, J. R. A growth model for secondary forest in Central Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 216, p. 270–282, 2005.

NEUMANN, M.; SAATCHI, S.; ULANDER, L. M. H.; FRANSSON, J. Assessing performance of L- and P-band polarimetric interferometric SAR data in estimating boreal forest above-ground biomass. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, p.714-726, 2012.

NIKLAS, K. J.; SPATZ, H.-C. Growth and hydraulic (not mechanical) constraints govern the scaling of tree height and mass. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 101, p. 15661 -1566, 2004.

ORIHUELA-BELMONTE, D. E.; JONG, B.; MENDOZA-VEGA, J.; VAN DER WAL, H.; PAZ PELLAT, F.; SOTO-PINTO, L.; FLAMENCO-SANDOVAL, A. carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type. **Agriculture, Ecosystems & Environment** v.171, p.72–84, 2013

PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; FANG, J.; HOUGHTON, R.; KAUPPI, P. E.; KURZ, W. A.; PHILLIPS, O. L.; SHVIDENKO, A.; LEWIS, S. L.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; PACALA, S.; MCGUIRE, A. D.; PIAO, S.; RAUTIAINEN, A.; SITCH, S.; HAYES, D. A Large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v.333, p. 988-993, 2011.

PERZ, S. G.; SKOLE, D. L. Social determinants of secondary forests in the Brazilian Amazon. **Social Science Research**, v. 32, p.25- 60, 2003a.

PERZ, S. G.; SKOLE, D. L. Secondary forest expansion in the brazilian Amazon and the refinement of forest transition theory. **Society & Natural Resource,** v. 16, p. 277–294, 2003b

PERZ, S. G.; WALKER, R. T. Household life cycles and secondary forest cover among small farm colonists in the Amazon. **World Development,** v. 30, n. 6, p. 1009–1027, 2002.

PHILLIPS, O. L. et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. **Science**, v. 323, p. 1344 - 1347, 2009.

POORTER, L. et al. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. **Nature**, v.530, p. 211, 2016.

RAMANKUTTY, N.; GIBBS, H.; FRÉDÉRIC, A.; DEFRIES, R.; A. FOLEY, J.; HOUGHTON, R. Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation. **Global Change Biology,** v. 13, p.51-66, 2007.

RYAN, M. G.; YODER, B. J. Hydraulic limits to tree height and tree growth. **BioScience**, v. 47, p. 235–242, 1997.

ROBINSON, C.; SAATCHI, S.; NEUMANN, M.; GILLESPIE, T. Impacts of spatial variability on aboveground biomass estimation from L-band radar in a temperate forest. **Remote Sensing.** v. 5, p.1001 - 1023, 2013.

ROWLAND, L.; COSTA, A. C. L.; GALBRAITH, D. R.; OLIVEIRA, R. S.; BINKS, O. J.; OLIVEIRA, A. A. R.; PULLEN, A. M.; DOUGHTY, C. E.; METCALFE, D. B.; VASCONCELOS, S. S.; FERREIRA, L. V; MALHI, Y.; GRACE, J.; MENCUCCINI, M.; MEIR, P. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. **Nature**, v. 528, p. 119, 2015.

SAATCHI, S.; MARLIER, M.; CHAZDON, R. L.; CLARK, D. B.; RUSSELL, A. E. Impact of spatial variability of tropical forest structure on radar estimation of aboveground biomass. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 2836–2849, 2011.

THAPA, R. B.; WATANABE, M.; MOTOHKA, T.; SHIMADA, M. Remote sensing of environment potential of high-resolution ALOS – PALSAR mosaic texture for aboveground forest carbon tracking in tropical region. **Remote Sensing of Environment**, v. 160, p. 122–133, 2015.

TOOMEY, M.; ROBERTS, D. A.; STILL, C.; GOULDEN, M. L.; MCFADDEN, J. P. Remotely sensed heat anomalies linked with Amazonian forest biomass declines. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 19, 2011.

TRUMBORE, S.; BRANDO, P.; HARTMANN, H. Forest health and global change. **Science**, v. 349, n. 6250, p. 814 - 818, 2015.

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

YU, Y.; SAATCHI, S. Sensitivity of L-band SAR backscatter to aboveground biomass of global. **Remote sensing**, v. 8, p. 8–11, 2016.

ZARIN, D. J.; DAVIDSON, E. A.; BRONDIZIO, E.; VIEIRA, I. C. G.; SÁ, T.; FELDPAUSCH, T.; SCHUUR, E. A. G.; MESQUITA, R.; MORAN, E.; DELAMONICA, P.; DUCEY, M. J.; HURTT, G. C.; SALIMON, C.; DENICH, M. Legacy of fire slows carbon accumulation in Amazonian forest regrowth. **The Ecological Society of America**. v. 3, p. 365 - 369, 2005.

ZARIN, D. J.; DUCEY, M. J.; TUCKER, J. M.; SALAS, W. A. Potential biomass accumulation in Amazonian regrowth forests. **Ecosystems**, v. 4, p. 658–668, 2001.

ANEXO A

Tabela A.1. Estatísticas completas para todas as trajetórias e anos.

Estatísticas (Mg.ha^{-1})	Te 1	Tr 1	Tr 2	Tr 3	Tr 4	Tr 5	Tr 6	Tr 7	Te 2
				2007					
Minimo	0.51	1.03	1.33	1.78	2.76	3.43	4	3.99	24.57
Primeiro quartil (Q1)	0.60	1.79	2.31	3.72	6.81	9.82	14.17	24.43	97.03
Mediana	0.74	3.15	4.41	7.77	15.20	23.95	37.28	68.04	153.59
Terceiro quartil (Q3)	1.01	7.26	9.93	17.72	32.86	54.95	79.36	137.54	238.42
Maximo	5.23	40.54	45.31	52.85	88.99	133.20	203.45	351.50	475.25
Média	0.86	5.96	7.5	12.6	22.85	36.5	52.13	90.26	175.82
Desvio padrão	0.37	6.8	6.96	11.71	20.36	33.24	45.13	78.11	96.59
				2008					
Minimo	0.54	1.10	1.44	2.15	2.60	3.35	5.19	4.76	24.98
Primeiro quartil (Q1)	0.63	1.93	2.57	4.65	6.67	9.4	19.2	28.15	99.12
Mediana	0.83	3.50	4.93	9.88	15.35	23.91	47.81	77.83	159.96
Terceiro quartil (Q3)	1.26	7.96	11.24	22.34	34.88	56.77	99.86	159.68	184.46
Maximo	5.16	41.60	41.47	61.36	95.14	138.84	228.07	377.46	509.75
Média	1.04	6.31	8.25	15.75	23.61	37.53	66.41	106.12	185.41
Desvio padrão	0.53	6.88	7.84	14.6	21.53	35.1	57.26	92.84	104.3
				2009					
Minimo	0.55	1.19	1.51	2.11	2.57	3.81	4.66	4.52	25.05
Primeiro quartil (Q1)	0.65	2.05	2.69	4.60	7.34	11.11	17.65	27.75	97.25
Mediana	0.80	3.67	5.14	9.96	16.87	27.11	44.5	78.18	154.60
Terceiro quartil (Q3)	1.12	8.16	11.40	22.71	37.56	61.4	93	150.05	239.60
Maximo	5.64	48.19	47.02	66.81	101.12	147.9	230.76	399.3	566.65
Média	0.97	6.74	8.40	15.87	25.56	40.95	61.49	98.98	175.90
Desvio padrão	1.47	7.70	7.83	14.68	22.90	37.02	52.69	85.76	96.72

2010									
Minimo	0.50	1.15	1.47	1.94	2.62	3.61	3.83	3.93	24.98
Primeiro quartil (Q1)	0.59	2.11	2.79	4.51	7.62	10.98	14.66	23.75	94.82
Mediana	0.73	39.11	5.50	10.05	17.22	26.59	38.62	66.20	153.00
Terceiro quartil (Q3)	1.00	8.81	12.45	23.08	38.79	60.13	82.00	134.15	240.30
Maximo	5.61	51.00	57.09	74.33	121.31	143.2	219.84	364.87	519.62
Média	0.85	7.25	9.05	15.99	26.6	40.05	53.6	88.75	175.3
Desvio padrão	1.48	8.48	8.52	14.86	24.78	36.05	46.4	77.00	98.87