

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
Programa de Pós-Graduação em Ciências de Floresta Tropicais - CFT

**CICLO DE VIDA DE POPULAÇÕES DE BAMBU (*GUADUA* SPP.)
NO TEMPO E NO ESPAÇO, NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA**

ANELENA LIMA DE CARVALHO

MANAUS – AM
2009

ANELENA LIMA DE CARVALHO

**CICLO DE VIDA DE POPULAÇÕES DE BAMBU (*GUADUA* SPP.)
NO TEMPO E NO ESPAÇO, NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA**

Orientador: Dr. Bruce Walker Nelson

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais.

**MANAUS – AM
2009**

Ficha Catalográfica

C972

Carvalho, Anelena Lima de

Ciclo de vida de populações de bambu (*Guadua* spp.), no tempo e no espaço, no sudoeste da Amazônia / Anelena Lima de Carvalho.--- Manaus : [s.n.], 2010.

v, 49 f. : il. color.

Dissertação (mestrado)-- INPA, Manaus, 2010

Orientador : Bruce Walker Nelson

Área de concentração : Ciências de Florestas Tropicais

1. Bambu – Amazônia. 2. Ciclo de vida. 3. Padrão espectral. 4. Ondas de florescimento. 5. Sensoriamento remoto. I. Título.

CDD 19. ed. 574.52642

Sinopse:

Estudou-se o comportamento temporal, espacial e espectral do ciclo de vida de populações de bambu (*Guadua* spp.) no sudoeste da Amazônia, através da interpretação de imagens de sensores orbitais ópticos. Foi descrito o comportamento espectral do dossel florestal em cada fase do ciclo. Foi determinada a duração do ciclo. Populações próximas no espaço tendem a reproduzir próximas no tempo, mesmo não havendo troca de genes entre estas populações atualmente. Entre populações vizinhas os florescimentos, embora próximos no tempo, nem sempre ocorrem na forma de ondas.

Aos meus amados pais, Josué e Maria do Carmo Carvalho, a minha irmã Poliana Carvalho e ao meu namorado Ney Araújo.

DEDICO

Agradecimentos

Gostaria de agradecer em especial aos meus pais e toda minha família, por todo apoio, dedicação e amor, sem os quais eu não teria conseguido chegar até aqui.

Ao meu orientador Bruce Nelson, por todo seu apoio e dedicação em todos os momentos e principalmente por ter compartilhado seus conhecimentos.

Ao meu namorado Ney Araújo, por todo seu amor e companheirismo que me fizeram sentir mais forte a cada dia.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPQ) pela bolsa concedida.

Aos professores do PPG-CFT, os doutores Niro Higuchi, Gil Vieira, Paulo de Tarso, Antenor, Wilson Spironella, Eduardo Venticinque, Elizabeth Franklin por todos os ensinamentos.

Aos membros da banca os doutores Paulo Maurício Graça, Eduardo Venticinque e Eduardo Pinheiro pelas sugestões e contribuições.

A secretaria do PPG-CFT na pessoa de Ana Clycia por todo seu empenho em resolver nossos problemas.

A Cara Rockwell, doutoranda da Universidade da Flórida, pela oportunidade da visita aos bambuzais acreanos.

A Ângela Bastos, que contribuiu no georreferenciamento de inúmeras imagens

Aos meus ex e eternos professores da Universidade Federal do Acre, pois tudo começou por aí.

Aos meus ex-orientadores e amigos, Evandro Ferreira e Joanna Tucker Lima que mesmo longe se preocuparam e estiveram torcendo pela minha vitória.

Aos meus amigos da Engenharia Florestal da Universidade Federal do Acre, por toda a amizade e incentivo.

Aos companheiros de república, Raquel, Marcela, Ricardo, Ivan e Mário que tornaram essa estada muito mais agradável.

Aos colegas do mestrado CFT, Aurora, Michel, Hada, Flávia, Peter, Henrique, Ricardo, Adriana, Milena, Janaína, Paulo, Gabriel, Daniel, Rafael e Cecília por compartilharem os momentos de apoio, tensão e descontração.

Aos novos amigos que ganhei em Manaus, Priscila, Patrícia, Ian, Tércia e Sumaia, por todo incentivo.

Resumo

No sudoeste da Amazônia, as florestas dominadas por bambus semi-escandentes do gênero *Guadua* Kunth. estão distribuídas em um mosaico de grandes manchas de 10^2 a 10^4 km². Cada mancha representa uma população semelpara sincronizada – os indivíduos florescem e frutificam apenas uma vez na vida e depois morrem, abrindo espaço para a nova coorte de plântulas que lentamente reconquista o dossel da floresta.

Na fase adulta, as áreas dominadas por *Guadua* são detectadas em imagens de satélite por possuírem um padrão espectral semelhante ao das florestas secundárias, distinguindo-as das florestas sem bambu e das áreas com a coorte de juvenis ainda escondida no sub-bosque. As imagens permitem também a distinção da curta fase senescente pós-reprodutiva, devido aos ramos secos iluminados. O presente trabalho teve como objetivo examinar o comportamento temporal, espacial e espectral do ciclo de vida de populações de *Guadua* no sudoeste da Amazônia, através da interpretação de imagens de sensores orbitais ópticos captados entre 1975 e 2008. Foram empregados dados dos sensores LANDSAT MSS (*ultispectral Scanner*), TM (*Thematic Mapper*), ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) e o Terra/Aqua MODIS (*erate Resolution Imaging Spectrometer*).

Para descrever o padrão espectral do bambu nas diferentes fases de vida, foram obtidos os valores de reflectância das populações com diferentes idades, para cada banda óptica do sensor MODIS. Escolheram-se os mosaicos do produto 43B4 -- reflectância ao nadir, sem atmosfera, com correção dos efeitos de ângulo de visada e de iluminação. Foram utilizadas três imagens, uma de cada ano 2001, 2002 e 2003, sendo um mosaico temporal dos 16 dias consecutivos mais livres de nuvens e de névoa em cada ano. A contaminação por nuvens impediu a utilização dos mosaicos de 2004 a 2008. As mudanças com a idade das populações do bambu foram reportadas para as sete bandas ópticas do MODIS e para os índices de vegetação NDVI e EVI. As idades das populações foram determinadas pela data de eventos de mortalidade da coorte anterior, detectados em mais de 200 imagens MSS e TM obtidas do INPE dos

anos de 1975 a 2000. Como esperado as bandas do MODIS localizadas na região do infravermelho próximo (centrados em 858.5 e 1240 nm), apresentaram maior diferença entre a reflectância dos diferentes estágios de vida. O EVI mostrou maior sensibilidade na discriminação das diferentes fases da vida do bambu. Já o NDVI demonstrou uma pequena variação entre as fases analisadas. Todos os estágios de vida apresentaram um padrão típico de folhas verdes saudáveis, indicando que durante um evento de mortalidade a floresta dominada por bambu é atualmente dominada por árvores com folhas verdes. Apesar da filtragem dos pixels ruins, vícios consistentes (possíveis erros de processamento) foram encontrados nas três imagens do MODIS produto 43B4.

Estimamos o tempo do ciclo de vida com dois métodos. O primeiro foi a procura direta de dois eventos distintos de mortalidade síncrona dentro de uma mesma mancha geográfica, pela análise visual das 200 imagens MSS e TM (anos 1975 a 2008) e as imagens MODIS 43B4 dos anos de 2001 a 2008. O segundo método foi indireto/inferencial, utilizando mapas temáticos dos contornos das populações no estágio adulto, dentro de uma área de 34.000 km² na fronteira centro-sul do Acre. Foram confeccionados mapas para 21 datas entre 1975 e 2008 e avaliou-se a congruência entre os 210 pares. A duração do ciclo de vida é a distância temporal entre os pares mais congruentes. O ciclo foi 28 anos de acordo com este método e 27 a 28 anos em três casos de observação direta.

Finalmente, foi examinada a relação entre a proximidade no espaço e a proximidade no tempo para os eventos de reprodução de populações distintas. Uma vez que essas populações não partilham genes, não é esperada nenhuma relação entre proximidade no tempo e no espaço para o florescimento de diferentes populações. O florescimento em si não é visível, apenas os eventos de mortalidade pós-reprodutiva foram mapeados usando os mosaicos anuais do MODIS que cobrem o sudoeste da Amazônia entre os anos de 2001 a 2008. Eventos reprodutivos de cada mancha (cada população) ocorreram em uma forma altamente contagiosa, formando super manchas de eventos temporalmente agrupados. Uma possível explicação para isto é a troca

de informação genética entre diferentes populações contíguas ou talvez uma sucessão de derivações de uma única população ancestral, um processo similar à especiação aloclônica. Dentro de uma mancha de populações com eventos de mortalidade espacialmente contagiosas, nem sempre foram observadas ondas de florescimento, isto é, o florescimento não segue sempre no mesmo sentido.

Abstract

Open forests dominated by semi-scandent woody bamboos of the genus *Guadua* Kunth. are found in the southwest Amazon as a mosaic of patches, each being 10^2 to 10^4 km² in size. Each patch is a single population of semelparous plants with a synchronized life cycle. The individuals flower and fruit only once in their lifetime then die, opening canopy space for the new cohort of juveniles that will gradually regain dominance of the forest canopy. At the adult stage, areas dominated by *Guadua* can be detected on images captured by orbital sensors equipped with bands in the optical portion of the spectrum. Adult bamboo patches exhibit a spectral pattern similar to that of secondary forests, distinct from the darker areas covered by forest without bamboo or with juvenile bamboo still confined to the forest understory. The short post-reproductive stage is also spectrally distinct due to the leafless sunlit stems of dead bamboo.

This study examined temporal and spatial patterns in the spectral behavior of *Guadua* populations over their life cycle in the southwest Amazon, using images acquired by optical orbital sensors between 1975 and 2008. The sensors were LANDSAT Multispectral Scanner (MSS), LANDSAT Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper (ETM+) and the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS).

To describe the spectral pattern of bamboo at different life stages, reflectance values for populations of different ages were obtained from the MODIS sensor. Product 43B4 was chosen as it provides atmosphere-free reflectance adjusted to emulate nadir view and solar angles, thus removing most confounding artifacts. Temporal mosaics of MODIS 43B4 for the prior 16 days are produced every 8 days. For each year, one mosaic was chosen, being that with the least cloud and haze over the SW Amazon. Three images were used, one from each year 2001, 2002 and 2003. Cloud contamination prevented collecting reflectances from mosaics for the years 2004 to 2008. Changes with the age of a bamboo population are reported for all seven optical MODIS bands and for the vegetation indices NDVI and EVI. Ages were

determined by finding mortality patches in over 200 LANDSAT and MODIS images from 1975 to 2002. As expected, the two MODIS bands located on the near-infrared plateau of a typical green leaf spectrum, showed the greatest absolute differences in reflectance between the different life stages. EVI showed greater sensitivity than did NDVI for distinguishing different ages of bamboo. All life stages had a spectral pattern typical of healthy green leaves, indicating that even during a mortality event the bamboo-dominated forest is actually dominated by trees with green leaves. Despite filtering bad pixels, consistent biases (possible processing errors in the product) were found between the three best images of MODIS product 43B4.

Length of the bamboo life cycle was estimated by two methods. First, repeated mortality events in the same geographic patch were observed directly, by examining over 200 LANDSAT images of the SW Amazon from 1975 to 2008 and annual MODIS 43B4 images from 2001 to 2008. Life cycles of 27 and 28 years were found. Second, the life cycle was inferred for all populations within a 34,000 km² area that had almost no man-caused deforestation. Patches with bamboo dominant in the forest canopy were mapped within this area for 21 different dates spanning 1975–2008. The pair of maps with highest spatial congruence was taken to be one life cycle apart in time. This method gave a life cycle of 28 years.

The final question examined was whether separate bamboo populations time their flowering events independently from their neighbors. Because these populations do not share genes, no relationship is expected to be found between proximity in time and proximity in space, for the flowering of different populations. Flowering itself is not visible, so all post-reproductive dieback events were mapped using the annual wall-to-wall MODIS coverage of the SW Amazon for 2001-2008. Reproductive events of each patch (each population) occurred in a highly contagious fashion, forming super-patches of temporally clustered events. A possible explanation for the shared genetic knowledge between several contiguous populations may be a succession of derivations from a single ancestral population, a process similar to allochronic speciation. One flowering wave was also observed, i.e., contiguous patches flowering like

falling dominoes. But most temporally and spatially proximal flowering events did not occur in this fashion.

Índice

FICHA CATALOGRÁFICA	III
AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	V
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	2
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.2 METODOLOGIA GERAL	3
1.2.1 <i>Área de estudo</i>	3
1.2.2 <i>Sensores orbitais</i>	4
CAPÍTULO II – COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS POPULAÇÕES DE GUADUA SEMI-ESCADENTES DO SUDOESTE AMAZÔNICO.....	8
2.1 INTRODUÇÃO.....	8
2.2 METODOLOGIA	11
2.3 RESULTADOS	14
2.4 DISCUSSÃO.....	20
CAPÍTULO III - CICLO DE VIDA DAS POPULAÇÕES DE GUADUA SPP. DO SUDOESTE DA AMAZÔNIA	25
3.1 INTRODUÇÃO.....	25
3.2 METODOLOGIA.....	26
3.2.1 <i>Método Inferencial</i>	28
3.2.2 <i>Método de Observação Direta</i>	31
3.3 RESULTADOS	31
3.4 DISCUSSÃO.....	37
CAPÍTULO IV – ONDAS DE FLORESCIMENTO DE GUADUA SEMI- ESCADENTE DO SUDOESTE AMAZÔNICO.....	39
4.1 INTRODUÇÃO.....	39
4.2 METODOLOGIA	40
4.3 RESULTADOS	43
4.4 DISCUSSÃO.....	45
CONCLUSÕES GERAIS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

Lista de Figuras

Figura 1. A área de estudo, em imagem do produto MODIS 43B4, bandas 6-2-1 (R-G-B), Composição temporal de 16 dias, finalizada dia 28 de julho de 2001.....	3
Figura 2. Comprimento de onda das bandas dos sensores MODIS e LANDSAT TM e MSS, valores de reflectância da vegetação sadia, água e argila seca.....	6
Figura 3. Representação das diferentes fases do bambu em imagem do produto MODIS 43B4, composição falsa-cor bandas 6-2-1 (R-G-B), Composição temporal de 16 dias, finalizada dia 28 de julho de 2001.....	7
Figura 4. Fluxograma com as etapas realizadas para o primeiro objetivo.....	11
Figura 5. Padrão espectral para as 16 idades observadas das populações de bambu do Sudoeste da Amazônia.....	15
Figura 6. Padrão espectral para as fases mais distintas do ciclo das populações de bambu do Sudoeste da Amazônia.....	16
Figura 7. Composição RGB, onde as matizes típicas de cada fase da vida do bambu onde cada um dos padrões espectrais na Imagem Modis 2001 está associado com a respectiva mancha onde a reflectância foi coletada. População de bambu com 0,5 anos matiz magenta escuro, 7 anos verde escuro, 13 anos amarelo, 25 anos verde claro.....	16
Figura 9. Índice de vegetação NDVI, obtido a partir de imagens MODIS do dia Juliano 209 dos anos 2001, 2002 e 2003, para as diferentes fases da vida das populações de bambu do Sudoeste Amazônico.....	18
Figura 10. Índice de vegetação EVI, obtido a partir de imagens MODIS dia Juliano 209 dos anos 2001, 2002 e 2003, para as diferentes fases da vida das populações de bambu do Sudoeste Amazônico.....	19
Figura 11. Densa camada de <i>Guadua sarcocarpa</i> sobre o dossel aberto da floresta próximo a Sena Madureira, Acre.....	19
Figura 12. Padrão de duas diferentes fases da vida de populações de bambu do Sudoeste Amazônico.....	20
Figura 13. Fluxograma com as etapas realizadas para o objetivo 2.....	27

Figura 14. Série temporal completa de mapas temáticos do dossel dominado por bambu maduro, representadas por oito datas ao longo de 33 anos..	33
Figura 15. Grau de concordância entre o mapa de bambu maduro em 1976 e cada data posterior.....	34
Figura 16. Grau de concordância entre todos os mapas de bambu maduro.....	35
Figura 17. Cena 3-67 do <i>World Reference System 1</i> . Representação (delimitadas pelas rachuras brancas) de um evento de mortalidade ocorrido entre os anos de 1975-1976 em imagens MSS, ocorrendo novamente entre os anos de 2003-2004 dentro da mesma mancha de bambu, em imagens MODIS.	36
Figura 18. Fluxograma com as etapas realizadas para o objetivo 3.....	41
Figura 19. Distribuição das manchas de mortalidade das populações de bambu do Sudoeste da Amazônia.	43
Figura 20. Onda de florescimento de bambu em um agrupamento de eventos de reprodução na região do extremo oeste do Estado do Acre.....	44
Figura 21. Freqüência dos normalizada contágios de mortalidade das populações de bambu do Sudoeste da Amazônia.	45
Figura 22. Inflorescência em um colmo de bambu observada na região leste do Estado do Acre em Julho de 2009.....	45

Capítulo I – Introdução Geral

As regiões sul e sudoeste da Amazônia possuem uma vegetação caracterizada pela ocorrência de florestas de transição entre a floresta densa e o cerrado (Prance, 1989), predominando nesse cenário, a Floresta Ombrófila Aberta - FOA (IBGE, 1997). De acordo com a classificação de Veloso *et al.* (1991), a FOA é dividida em quatro sub-tipos, dominados por uma de quatro formas de vida que se misturam entre as árvores – palmeiras de grande porte, bambus lenhosos, lianas ou sororocas (*Phenakospermum guianense*).

Na região sudoeste ocorrem grandes extensões de florestas monodominantes de bambus lenhosos semi-escandentes do gênero *Guadua*, inexistentes ou pouco expressivos em outras partes da Amazônia. Entre as espécies escandentes mais importantes estão *Guadua weberbaueri* e *G. sarcocarpa*. Estas florestas cobrem aproximadamente 165.000 km² na Amazônia ocidental, contando com 92.000 km² no Brasil (Bianchini, 2005).

A floresta aberta com bambu encontra-se distribuída principalmente no Estado do Acre, e as partes adjacentes do Amazonas e da Amazônia peruana (Bianchini, 2005). Cobre cerca de 50% da área total do Estado Acre. Dentre as onze tipologias florestais identificadas no Acre, o bambu ocorre em cinco (Governo do Estado do Acre, 2000).

Olivier *et al.* (2009) descreve que o gênero *Guadua* é um gênero endêmico de bambu neotropical, estando presente na Amazônia muito antes do que qualquer pressuposto de atividade humana, descartando as teorias onde o estabelecimento das florestas dominadas por bambu são atribuídas a causas antropogênicas.

Estes bambus são semelparas e monocárpicos, possuem longos ciclos de vida, de aproximadamente 28 a 32 anos (Nelson & Bianchini, 2005). Reproduzem de forma sincronizada dentro de cada população, logo após o evento reprodutivo, ocorre a mortalidade sincrônica de todos os indivíduos da população, acumulando grande quantidade de matéria seca, altamente inflamável (Nelson *et al.*, 2006). Produzidas em grande quantidade, as sementes não exibem dormência. A nova coorte de bambus germina e cresce também de maneira sincronizada.

As florestas dominadas por bambus escandentes no estado do Acre estão distribuídas de forma contínua e em grandes manchas. Cada mancha representa uma população ocupando desde dezenas até mais de dez mil km². Na fase adulta, essas áreas dominadas por bambu podem ser detectadas em imagens de satélite por possuírem um padrão espectral semelhante ao das florestas secundárias, distinguindo-as das florestas sem bambu. As imagens permitem também a distinção da fase senescente, pós-reprodutiva (Nelson *et al.*, 2006), devido aos ramos secos iluminados.

Esta fase seca é efêmera. Os ramos e colmos mortos logo apodrecem e se desmembram, caindo ao chão, ocultos pelas árvores. Dois anos após um evento de reprodução sincronizada a floresta assume um padrão espectral similar à floresta sem bambu. Até cerca de 10 anos após a germinação, a floresta de bambu, com a nova corte ainda confinada ao sub-bosque, não pode ser distinguida de uma floresta sem bambu nas imagens de sensores orbitais (Nelson *et al.*, 2006).

Apesar de sua grande extensão, a taxonomia dos bambus e sua ecologia são pouco conhecidas. Como os ciclos de vida são longos e o acesso a grande parte destes bambuzais é ainda restrito, poucas coletas de material fértil foram feitas, o que torna difícil o reconhecimento das espécies (Smith, 2000).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Examinar o comportamento temporal, espacial e espectral do ciclo de vida de populações de *Guadua* spp. semi-escandentes no Sudoeste da Amazônia, por meio da interpretação de imagens de sensores orbitais ópticos.

1.1.2 Objetivos específicos

Capítulo II - Descrever o comportamento espectral do dossel florestal em cada etapa do ciclo de vida;

Capítulo III - Determinar a duração do ciclo de vida por meio de observação direta do ciclo completo e através de um método indireto/inferencial, complementando estudo realizado anteriormente;

Capítulo IV - Examinar a relação entre a proximidade no espaço e a proximidade no tempo para os eventos de reprodução de populações distintas.

1.2 Metodologia geral

1.2.1 Área de estudo

Os três objetivos foram atingidos em duas escalas de análise. Para os objetivos dos Capítulos II e IV foi considerada toda a região de ocorrência do bambu no Sudoeste da Amazônia (Figura 1). Para uma parte do objetivo do Capítulo III, a análise foi confinada aos limites da cena 3-67 do LANDSAT MSS, cobrindo cerca de 34.000 km² da região Sudoeste da Amazônia (polígono contornado com linha branca na Figura 1).

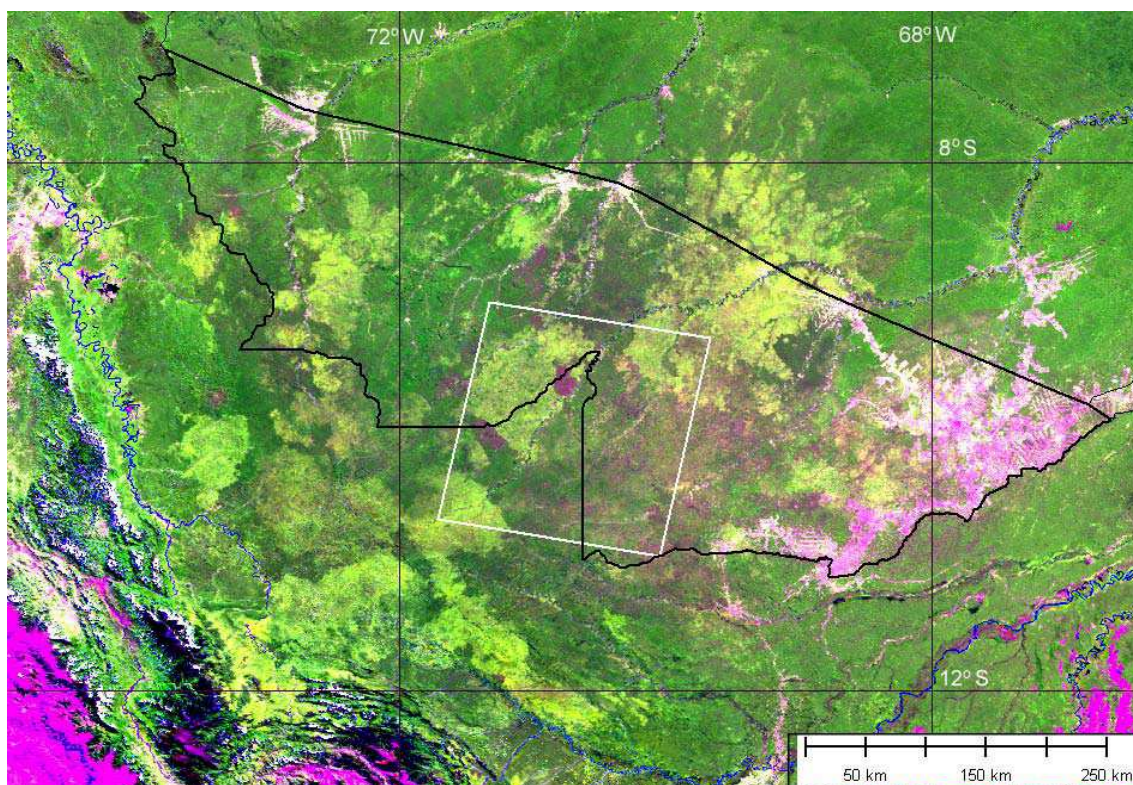


Figura 1. A área de estudo, em imagem do produto MODIS 43B4, bandas 6-2-1 (R-G-B), Composição temporal de 16 dias, finalizada dia 28 de julho de 2001. Quase todas as florestas dominadas por bambus escandentes no SW da Amazônia estão dentro desta figura. Para um dos objetivos do Capítulo III a área de estudo é delimitada pela linha branca. Limites do estado do Acre marcados pela linha preta. Populações de bambu morto recentemente são magenta escuro, floresta com dossel dominado por bambu maduro em amarelo ou verde claro, bambu em estágios mais jovens se confunde com a floresta sem bambu, ambos em verde escuro. O

altiplano andino, as savanas da planície amazônica e o desflorestamento da planície são magenta claro ao branco.

A vegetação da área é predominantemente Floresta Ombrófila Aberta com bambu. O clima da região é quente e úmido, com temperatura média anual em torno de 24,5°C. A precipitação anual atinge valores entre 1750 e 2250 mm e no trimestre mais seco a média mensal não atinge 125 mm (Fonseca *et al.* 1976). A região apresenta dois períodos distintos: um período chuvoso formado nos meses de outubro até meados de maio e um período seco no restante do ano. No centro e leste do Acre ocorrem três meses consecutivos muito secos, com menos de 50 mm/mês (Sombroek, 2001).

O substrato geológico é representado pela Formação Solimões, que, ocupa os interflúvios dos trechos superiores e médios dos rios Juruá e Purus. Segundo Fonseca *et al.* (1976), esta formação representa 80% da superfície do Estado e é formada de várias litologias. Com tamanha extensão e variedade na sua composição litológica, pode-se inferir que esta formação tenha dado origem a diversos tipos de solos (Argissolos, Cambissolos, Latossolos) (Governo do Estado do Acre, 2000). Os Cambissolos são associados com as florestas de bambu e com uma zona de soerguimento tectônico do Arco de Fitzcarraldo (Nelson *et al.*, 2006). Estes solos contêm argilas expansivas que impedem a percolação da chuva, levando ao escoamento superficial e altas taxas de erosão mecânica, mesmo sob cobertura florestal. A erosão é evidenciada pela alta carga de sedimentos em suspensão e alta condutividade dos afluentes dos rios que drenam a província dos bambus, nas cabeceiras dos rios Purus e Juruá. A erosão remove as camadas lixiviadas do solo superficial, expondo depósitos não consolidados, ricos em cátions. A alta fertilidade e a baixa permeabilidade favorecem o estabelecimento espécies de árvores que estariam confiadas à várzea em outras partes da Amazônia.

1.2.2 Sensores orbitais

Neste estudo foram empregados quatro sensores orbitais: o MSS (*Multispectral Scanner*) TM (*Thematic Mapper*) e ETM⁺, (*Enhanced Thematic Mapper*) a bordo das plataformas LANDSAT 5 e LANDSAT 7, respectivamente, e o sensor MODIS, a bordo das plataformas EOS-Terra e EOS-Aqua. Esses sensores possuem bandas na faixa óptica (0,4 e 2,5 μm) posicionadas

estrategicamente para reconhecimento de diferentes objetos, e são úteis para estimar a cobertura de folhas saudáveis. Os dois sensores do LANDSAT (TM e ETM⁺) possuem as mesmas seis bandas nas faixas espectrais do óptico. O MODIS possui sete bandas ópticas (Tabela 1).

Tabela 1. Bandas do sensor MODIS com seus respectivos comprimentos de onda centrados

Banda	Comprimento de onda (µm)
1	0,659
2	0,865
3	0,470
4	0,555
5	1,240
6	1,640
7	2,130

A divisão do espectro eletromagnético em diversas bandas permite que o sensor registre a reflectância do alvo de acordo com seu comprimento de onda, desenvolvendo “assinaturas” espectrais específicas, e assim possibilitando uma melhor discriminação dos elementos da superfície terrestre.

A resolução espacial do sensor LANDSAT MSS é de 80 metros. A resolução espacial dos sensores LANDSAT TM e ETM é de ~ 30m ao nadir. A resolução do produto do MODIS a ser empregado é 1000 m. O MODIS é útil para o mapeamento em escalas de 1:1.000.000 ou menor e para a caracterização espectral de áreas maiores de 50 km², correspondente a pelo menos 50 pixels. Para os sensores MSS, TM e ETM⁺ os valores de brilho de cada pixel em cada banda são “radiância codificada”. Esta tem uma relação linear com a reflectância “topo-de-atmosfera” de cada pixel. Para o produto do sensor MODIS (MOD43B4) os valores de brilho são “reflectância ao nadir” com ângulo de iluminação padronizado e efeitos de atmosfera removidos. Como os sensores do LANDSAT têm uma visada sempre entre 0 e 7 graus fora do nadir, estas correções são menos importantes. O ângulo de visada do MODIS atinge até 55 graus fora do nadir o que introduz fortes artefatos sem as correções disponibilizadas no produto MOD43B4.

O sensor MSS não está provido de uma banda no infravermelho médio. Foram utilizadas as bandas espectrais 4 verde (0,5 - 0,6 μm) e 5 vermelho (0,6 - 0,7 μm) e 6 infravermelho próximo (0,7 - 0,8 μm) (Jensen, 2009). Para o sensor TM e ETM⁺ foram empregadas as bandas, correspondentes às faixas espectrais de luz visível 3 -vermelho (0,66 μm), 4 infravermelho-próximo (0,83 μm) e 5 infravermelho-médio (1,65 μm) e para o sensor MODIS foram empregadas as bandas 1 -vermelho (0,659 μm), 2 infravermelho-próximo (0,865 μm) e 6 infravermelho-médio (1,240 μm). As imagens foram visualizadas em composições falsa-cor, atribuindo as três cores primárias aditivas azul (à faixa espectral R), verde (à faixa NIR) e vermelho (à faixa SWIR). Os tecidos não fotossintéticos (folhas e galhos mortos) podem ser visualizados pela alta reflectância nas faixas R e SWIR e folhas vivas pela baixa reflectância na faixa R e alta reflectância nas faixas NIR e SWIR(Figura 2).

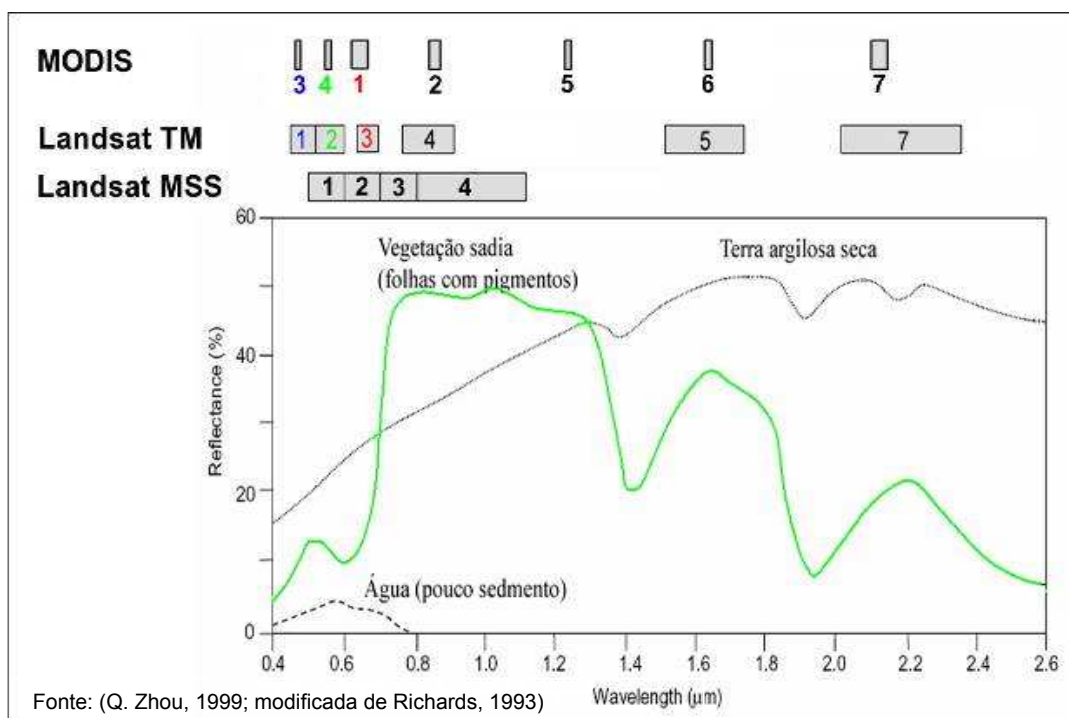


Figura 2. Comprimento de onda das bandas dos sensores MODIS e LANDSAT TM e MSS, valores de reflectância da vegetação sadia, água e argila seca.

Nestas composições de falsa-cor (Figura 3), a matiz amarela é um indicador da presença de bambu maduro ou de capoeira (esta sempre próxima a desmatamentos recentes). As matizes verdes escuro representam floresta primária sem bambu ou com bambu juvenil oculto no sub-bosque. A matiz

ferrugínea ou magenta escuro corresponde aos tecidos não fotossintéticos (caules e/ou folhas secas) de bambu recém morto. O relevo pode ser percebido melhor na faixa SWIR do espectro, que resalta as sombras topográficas.

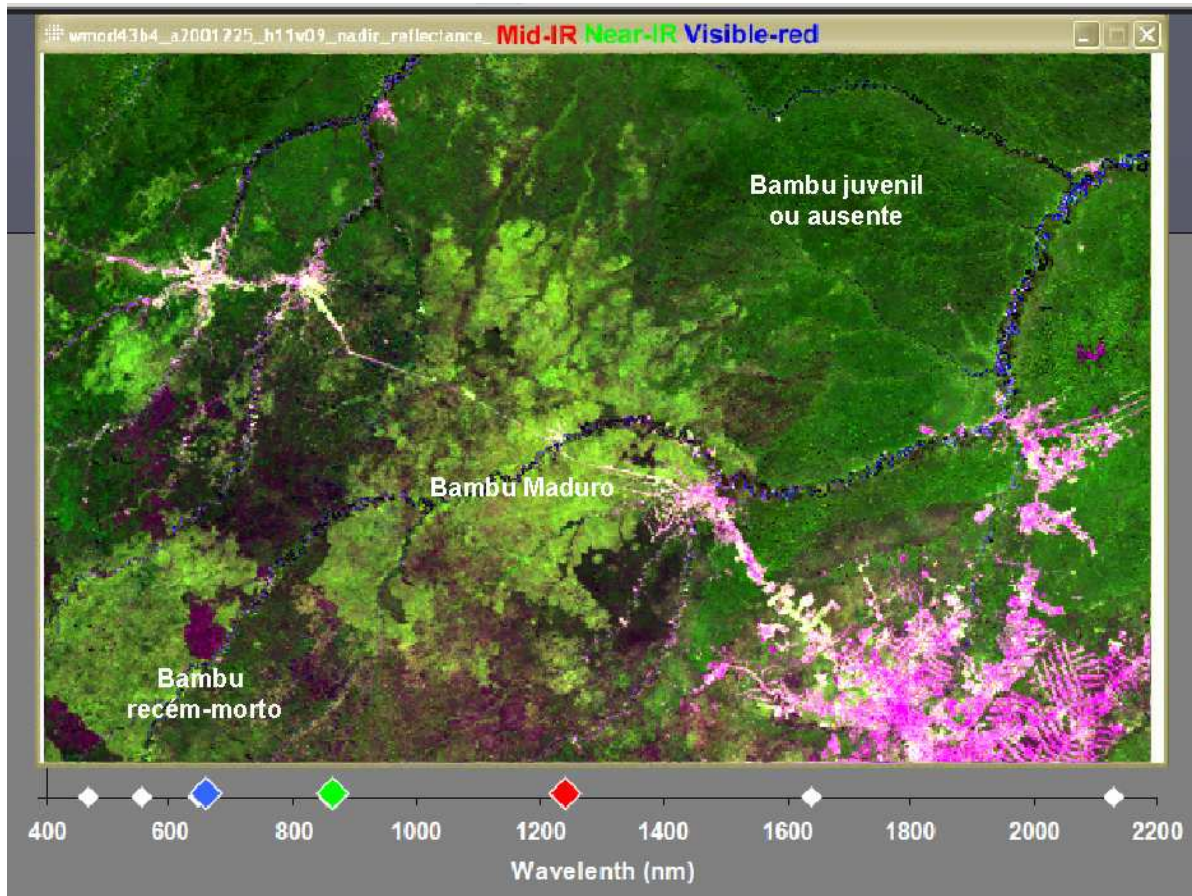


Figura 3. Representação das diferentes fases do bambu em imagem do produto MODIS 43B4, composição falsa-cor bandas 6-2-1 (R-G-B), Composição temporal de 16 dias, finalizada dia 28 de julho de 2001. Populações de bambu morto recentemente são magenta escuro, floresta com dossel dominado por bambu maduro em amarelo ou verde claro, bambu juvenil ou ausente, ambos em verde escuro.

Capítulo II – Comportamento espectral das populações de *Guadua* semi-escandentes do sudoeste amazônico

2.1 Introdução

A caracterização espectral de um alvo, também conhecida como assinatura espectral, é a representação gráfica da reflectância em faixas de comprimento de onda estreitas e adjacentes. Ela representa o resultado da interação da energia radiante com o objeto em estudo. As variações de amplitude na caracterização espectral são indicadoras das propriedades espectrais dos objetos (Steffen & Moraes, 1993).

A interação de plantas com a radiação eletromagnética é descrita basicamente pelo estudo das propriedades da folha, já que toda a arquitetura da folha está adaptada para uma melhor captação dos raios solares, do ar e da água (Formaggio *et al.*, 1989 *apud* Crusco, 2006). Porém, algumas características da estrutura do dossel devem ser levadas em conta em uma análise espectral feita por sensores orbitais, como a exposição do solo, orientação das lâminas foliares, agrupamento das folhas e as sombras presentes nas áreas estudadas (Ponzoni, 2001; Valeriano, 2003).

A reflectância e transmitância das folhas dependem basicamente da concentração de pigmentos, conteúdo de água e estrutura interna das células nas folhas. Cada componente pode ser avaliado numa faixa de comprimento de onda específica. Na região do visível, os pigmentos são os responsáveis pela forte absorção da radiação. Os principais pigmentos são as clorofilas a e b e os carotenóides. As múltiplas refrações e reflexões ocasionadas pela estrutura interna das folhas, principalmente as cavidades de ar no mesófilo foliar, influenciam fortemente a reflectância na faixa do infravermelho próximo. A reflectância na região do infravermelho de ondas curtas está relacionada com o conteúdo de água no interior da folha. Esta faixa do espectro é também mais sensível às sombras relacionadas com a orientação e agrupamento das folhas (Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

O estágio de maturação é um dos fatores que determinam as respostas espectrais das folhas, assim como o tipo de folha e a média diária de exposição ao Sol (Bunnik, 1978 *apud* Crusco, 2006). Em folhas imaturas os espaços intercelulares são reduzidos, assim como o ar presente no interior desses espaços, o que leva a uma diminuição na reflectância principalmente na região do infravermelho próximo (Ponzoni, 2001).

Na análise de reflectância do dossel, os indicadores de estresse baseiam-se principalmente na redução da área foliar total exposta (pode ser por mudança na orientação ou perda de folhas) ao sensor e, em menor grau, a respostas individuais das folhas (Valeriano, 2003).

Não há ligação entre estes parágrafos.

De acordo com Moreira (2000), existem diversos índices espectrais de vegetação, contudo os mais utilizados para monitorar o comportamento vegetal são o EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

O Índice de Vegetação Melhorado (EVI) foi desenvolvido para otimizar o sinal de resposta da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além de propiciar o monitoramento da vegetação através de uma ligação de sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas. O EVI pode ser calculado através da seguinte equação (Justice *et al.*, 1998 *apud* Huete *et al.*, 2002):

$$EVI = G * \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{L + \rho_{NIR} + C1 * \rho_R - C2 * \rho_B}$$

Onde L é o fator de ajuste para o solo; C1 e C2 são coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis na atmosfera; e G é o fator de ganho. Os valores atualmente utilizados pelo algoritmo EVI são: L=1, C1=6, C2=7,5 e G=2,5 (Huete *et al.*, 1997).

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) é uma relação entre as reflectâncias (ρ) das bandas do infravermelho próximo (IVP) e do vermelho (V), e visa eliminar as diferenças sazonais do ângulo de elevação solar e minimizar os efeitos de atenuação atmosférica em imagens multitemporais. O NDVI é o índice mais utilizado nos diversos estudos, sobre a

vegetação, que envolvem o uso de dados de sensoriamento remoto (Moreira, 2000). Ele é obtido pela equação:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}}}$$

Onde: ρ_{NIR} = valor de reflectância na banda do infravermelho próximo (Modis 2); ρ_{R} = valor de reflectância na banda do visível (Modis 1).

De maneira geral, o NDVI é mais sensível à presença de clorofila e outros pigmentos responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho, enquanto que o EVI é mais sensível à variação da estrutura do dossel, incluindo o Índice de Área Foliar (IAF), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (Huete *et al.*, 2002).

A principal desvantagem do NDVI é a relação não linear com características biofísicas como biomassa e índice de área foliar (Myneni *et al.*, 1995). Geralmente, o NDVI atinge a saturação em condições de média à alta quantidade de biomassa e para certos índices de área foliar (IAF) (Gitelson *et al.*, 2002).

O EVI foi desenvolvido para promover a redução das influências atmosféricas e do solo de fundo do dossel no monitoramento da vegetação (Justice *et al.*, 1998). Além disso, alguns trabalhos sugerem que o EVI apresenta substancial melhora na sensibilidade às alterações do dossel em relação ao NDVI, principalmente em áreas de maior densidade de biomassa (Huete *et al.*, 2002).

Espírito Santo *et al.*(2003) detectaram e caracterizaram mudanças na cobertura vegetal da floresta de bambu numa área da porção sudeste do Acre, em um período de morte e crescimento vegetativo da floresta de bambu. Utilizando técnicas de processamento de imagens para geração das imagens de NDVI e imagens fração vegetação, solo e sombra do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), os autores verificaram mudanças na fração solo, vegetação e sombra entre a fase de mortalidade e fase vegetativa após 10 anos.

O presente capítulo teve como objetivo descrever o comportamento espectral do dossel florestal em cada etapa do ciclo de vida das populações de *Guadua* do sudoeste amazônico.

2.2 Metodologia

O desenvolvimento deste capítulo foi realizado conforme mostra a Figura 4, cuja descrição é feita nos tópicos subseqüentes.

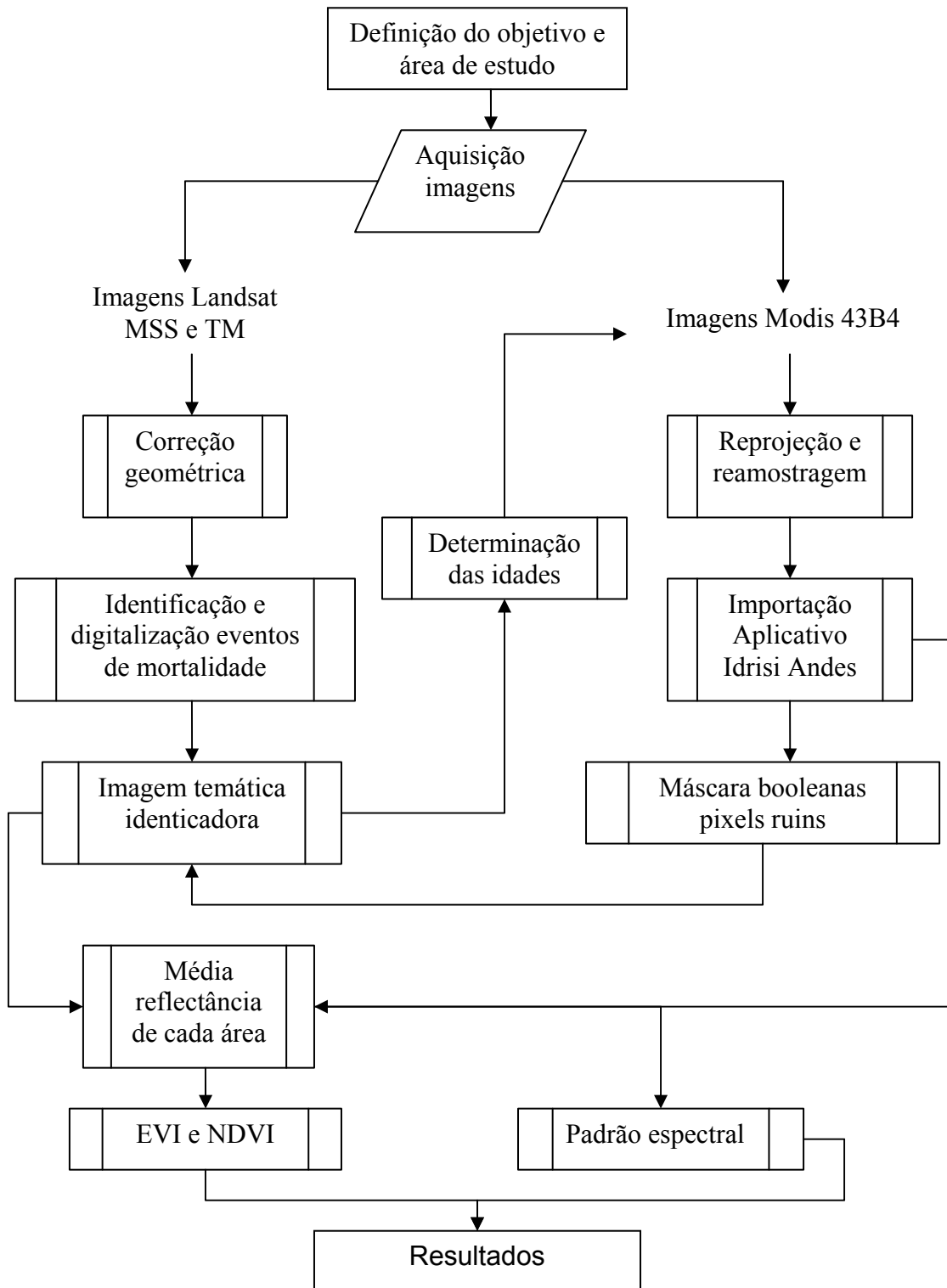


Figura 4. Fluxograma com as etapas realizadas para o primeiro objetivo.

Foi analisada toda região de ocorrência dos bambus no sudoeste amazônico (Figura 1).

Foram empregadas as sete bandas do sensor MODIS, produto MCD43B4, dos anos 2001, 2002 e 2003, dia Juliano 209, cobrindo toda a extensão da província de florestas com bambu no SW da Amazônia. Foi escolhido um mosaico temporal de 16 dias em cada um dos três anos, sendo o período mais livre de nuvens e névoa daquele ano. Pixels de baixa qualidade foram mascarados de acordo com o indicador de qualidade fornecido no *Scientific Data Set* (SDS). Os anos 2004 a 2008 não apresentavam nenhum mosaico temporal suficientemente livre de nuvens e névoa para obter avaliar o padrão espectral sobre toda a área de ocorrência dos bambus. Foram utilizados os *tiles* H11V9, H10V10, H11V10, H10V9 que cobrem toda região do sudoeste da Amazônia até os Andes. As imagens MODIS foram transformadas para o formato TIFF com o software MODIS *Reprojection Tool* (MRT), os dados foram reprojetoados para coordenadas de latitude e longitude e reamostrados pelo método do vizinho-mais-próximo. O produto MODIS possui resolução original de 926m. Para a escala utilizada neste estudo o georreferenciamento do produto é excelente, não necessitando de correção geométrica. Segundo Wolfe (2006) a qualidade da geo-localização do Modis é melhor que 45 m para Modis-Terra e melhor que 60m para Modis-Acqua.

Para determinar a idade das populações nas imagens MODIS de 2001 a 2003, foram analisadas mais de 200 imagens MSS e TM obtidas do INPE para detectar manchas em fase de mortalidade pós-reprodutiva (Tabela 2). As datas dos eventos de mortalidade encontradas entre 1975 e 2000 indicaram a idade da nova coorte naquela mancha. Os eventos mais recentes de mortalidade foram detectados nas próprias imagens MODIS do ano de 2001 e 2002.

Todas as manchas de mortalidade foram digitalizadas por interpretação visual no *software* ArcMap. Para obter réplicas, para cada idade foram procuradas dez manchas distintas de mortalidade para cada ano em que ocorreu um evento de mortalidade. No caso da ocorrência de um número menor de manchas (problema comum), uma mesma mancha (população) foi dividida em sub-amostras não-contíguas até atingir as dez réplicas.

Tabela 2. Ano da imagem MODIS utilizada para identificação de cada idade das populações de bambu avaliadas

Idade da população (anos)	Ano da imagem MODIS
0.5	2001
1	2002
2	2003
7	2001
8	2002
9	2003
13	2001
14	2002
15	2003
21	2001
22	2002
23	2003
24	2001
25	2001
26	2002
27	2003

No aplicativo Idrisi Andes, foram importadas as bandas do MODIS no formato Geotiff e também todos os polígonos vetoriais com as diferentes datas de mortalidade. Os polígonos dos eventos de mortalidade foram primeiramente importados como vetor e depois transformados em formato matricial (*raster*), onde o valor de cada pixel de uma mancha ou de sub-amostra de mancha constitui o identificador daquela área de interesse. Foram criadas imagens booleanas (máscaras) para eliminar os pixels com baixa qualidade para os três anos das imagens MODIS. Os pixels ruins receberam valor 0 e os demais receberam valor 1. Essa máscara foi multiplicada pelas imagens temáticas que identificam as áreas de interesse, ou seja, as amostras ou sub-amostras dos distintos eventos de mortalidade.

As máscaras com os diferentes tempos de mortalidade foram utilizadas para criar uma única imagem temática identificadora das áreas de interesse (*feature definition image*). A função *Extract*, extrai estatística sumarizada de cada área de interesse nas distintas bandas das três imagens do MODIS (2001, 2002, 2003). Ela usa dois arquivos, uma imagem de entrada- uma banda de uma das três imagens MODIS - e a imagem temática identificando todas as áreas de interesse. A rotina reporta a média e o desvio padrão de todas as células na banda do MODIS, dentro de cada área de interesse.

Considerando as combinações de três datas para medir a reflectância (2001, 2002 e 2003) e o número de eventos de mortalidade, foram detectadas 16 idades distintas de bambus vivos. Algumas manchas foram pequenas demais para subdividir em 10 réplicas. Os dados das tabelas da rotina *Extract* com os valores médios de reflectância para cada amostra com as distintas idades foram exportados para a planilha eletrônica Excel, e depois para o *software* estatístico Systat 8.0, onde foram calculados os índices EVI e NDVI para todas as 16 idades. Para avaliar possíveis erros de intercalibração radiométrica das imagens MODIS, foi preservada a informação sobre qual das três imagens MODIS foi usada para cada idade.

Foram elaborados os gráficos da evolução do EVI e NDVI ao longo do tempo, e gerados gráficos com os valores médios da reflectância das diferentes idades do bambu em cada comprimento de onda.

Foi realizada uma visita de campo para validação dos dados, onde foram coletados pontos com aparelho Sistema de Posicionamento Global - GPS e fotografadas uma área onde ocorreu um evento de mortalidade do bambu no ano de 2006 e área com bambu maduro na região leste do Estado do Acre, próximo ao município de Acrelândia.

2.3 Resultados

As curvas espectrais obtidas pelas bandas 2 (centrado em 865 nm) e 5 (1240 nm), sendo infravermelho próximo e infravermelho médio respectivamente, são as mais sensíveis ao aumento da densidade de folhas, na medida em que uma nova coorte bambu reconquista o dossel da floresta entre as idades 12 e 15 anos (Figura 5).

Devido a grande quantidade de idades próximas foram selecionadas algumas fases mais distintas do bambu para melhor entendimento das mudanças ocorridas desde a mortalidade até a dominância do bambu no dossel, apresentadas na Figura 6.

As bandas 2 e 5 apresentaram maior separabilidade entre populações com diferentes idades, uma vez que nessa faixa do espectro os valores de reflectância se apresentaram mais distintos, sendo possível diferenciar melhor cada idade avaliada. Na figura 7 estão representadas as matizes típicas de

cada fase da vida do bambu onde cada um dos padrões espectrais na Imagem Modis do ano de 2001 está associado com a respectiva mancha onde a reflectância foi coletada, onde fica evidente a diferença entre as populações com 13 anos e 25 anos, que mesmo sendo mais jovem apresenta maior brilho e conseqüentemente maior reflectância.

As áreas com bambu recém morto apresentaram os menores valores de reflectância nas bandas MODIS 2 e 5, as áreas com bambu entre sete e nove anos apresentaram valores um pouco mais elevados nessas duas bandas citadas anteriormente.

Os valores mais altos de reflectância foram observados para as populações de bambu com 13, 14 e 15 anos de idade nas bandas 2, 5, 6, 7. Apenas as bandas 1, 3 e 4 (faixa do visível), apresentaram pouca variação entre as idades analisadas, ou seja, todas as mudanças foram mais acentuadas nas quatro bandas infravermelhas, e menos evidentes nas três bandas da faixa do visível (Figura 8).

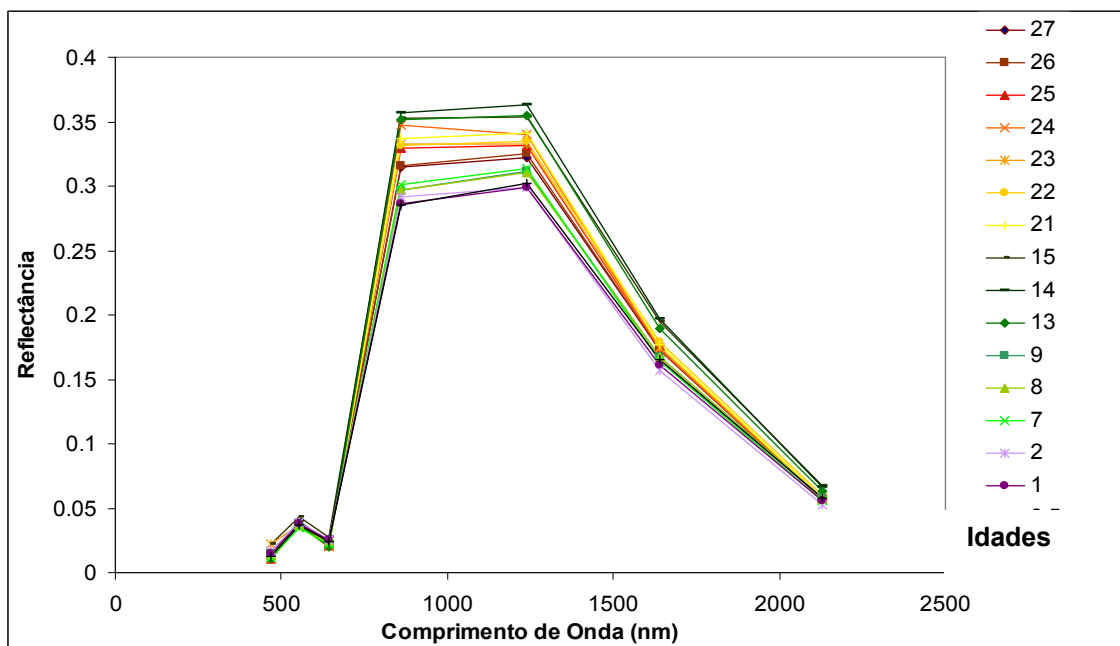


Figura 5. Padrão espectral para as 16 idades observadas das populações de bambu do Sudoeste da Amazônia.

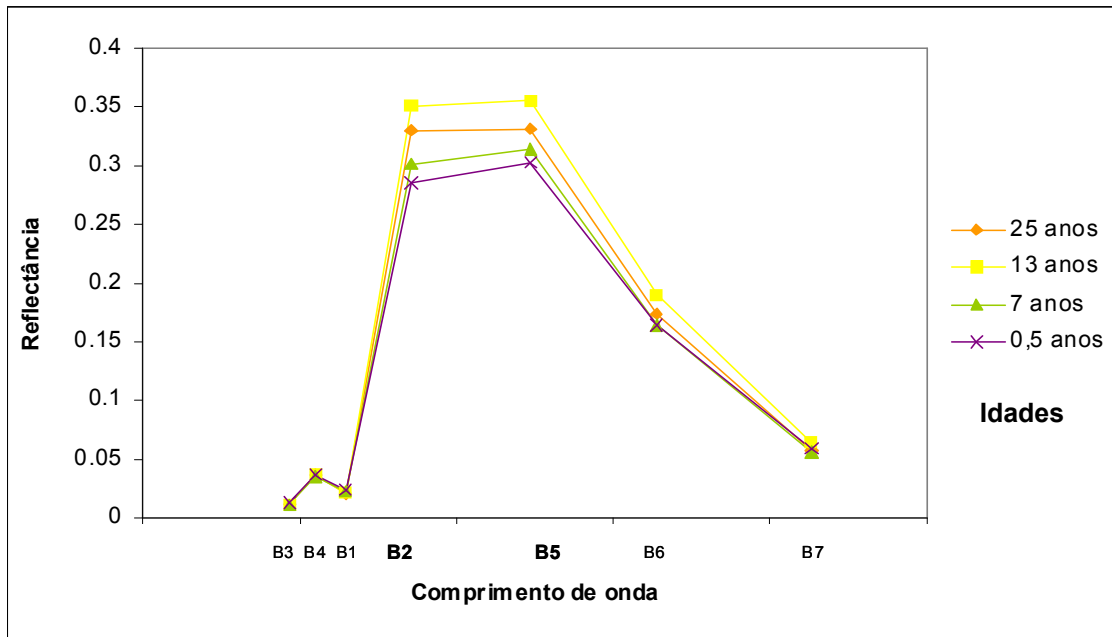


Figura 6. Padrão espectral para as fases mais distintas do ciclo das populações de bambu do Sudoeste da Amazônia.

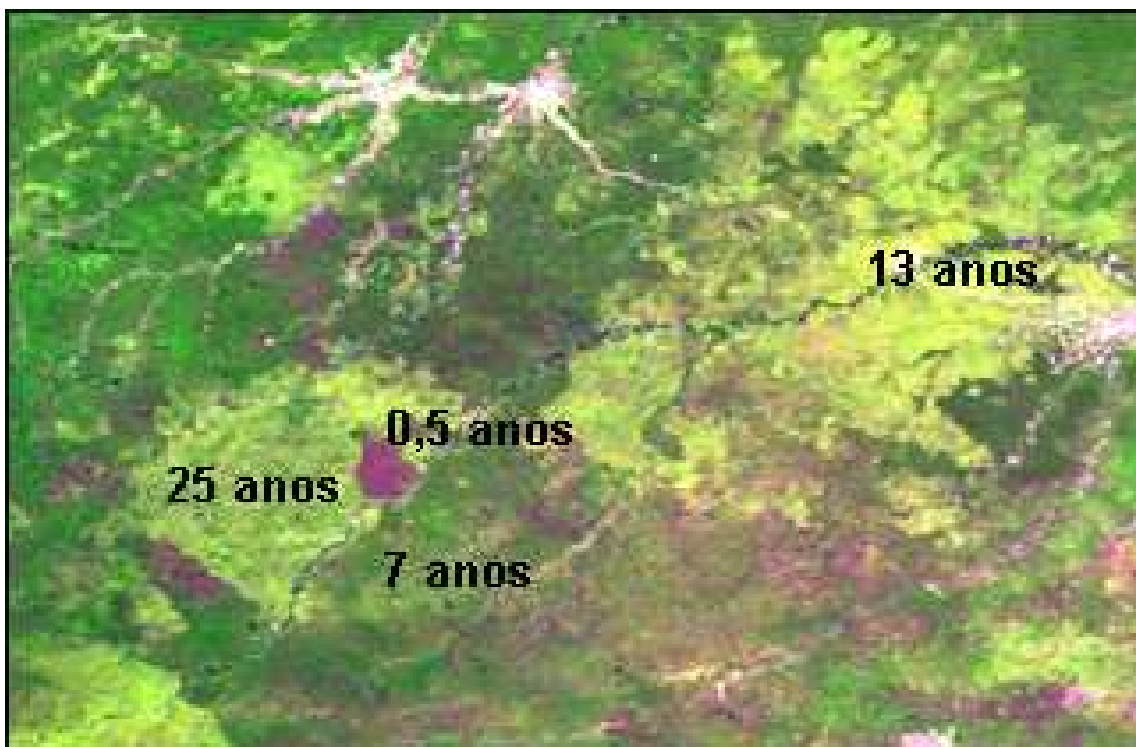


Figura 7. Composição RGB, onde as matizes típicas de cada fase da vida do bambu onde cada um dos padrões espectrais na Imagem Modis 2001 está associado com a respectiva mancha onde a reflectância foi coletada. População de bambu com 0,5 anos matiz magenta escuro, 7 anos verde escuro, 13 anos amarelo, 25 anos verde claro.

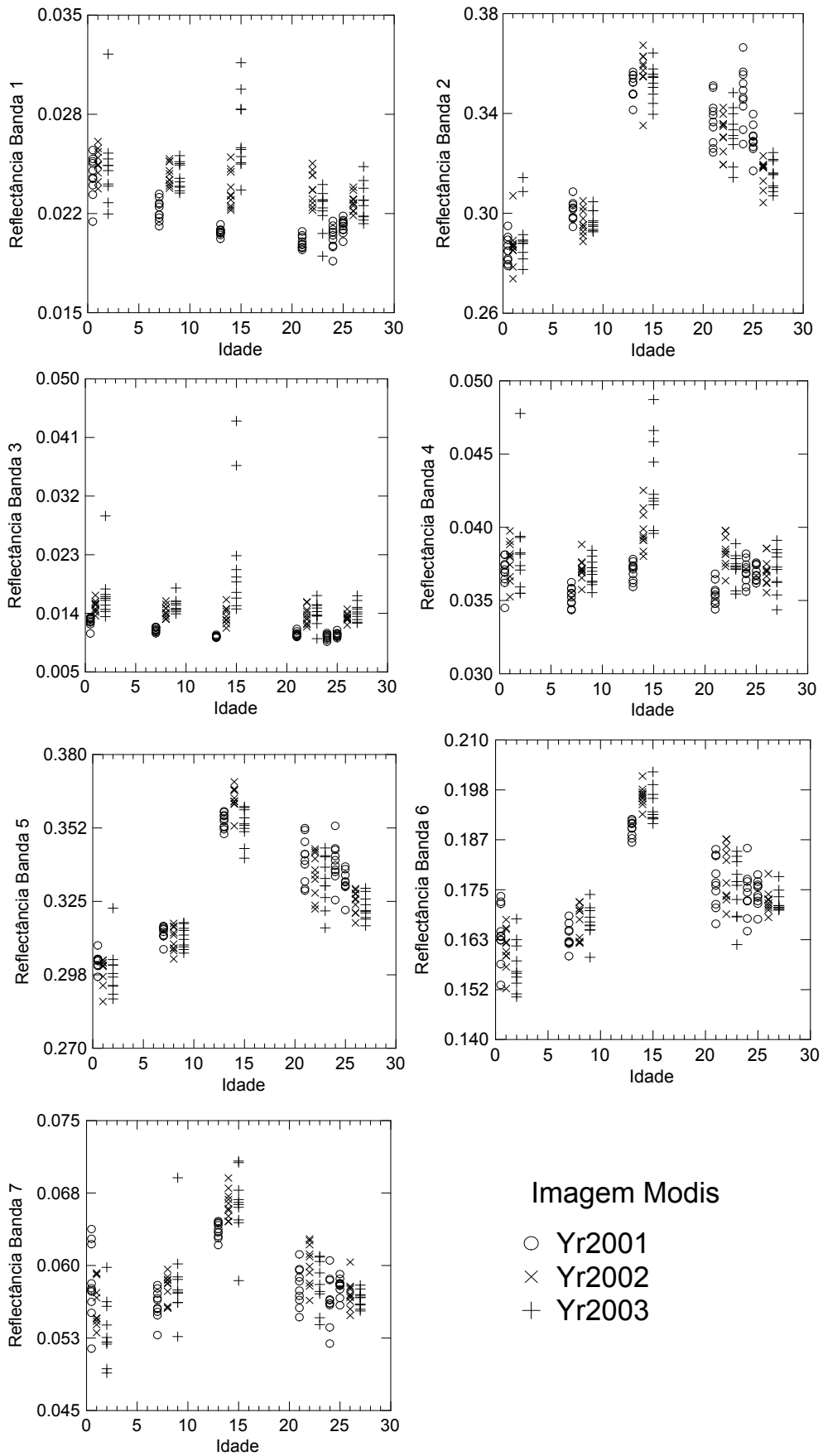


Figura 8. Reflectância de cada banda do sensor MODIS para as diferentes idades das populações de *Guadua*.

São apresentados os índices de vegetação (NDVI e EVI) para as diferentes fases da vida das populações de bambu, nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

Os valores do índice NDVI variaram entre 0,81 e 0,90. Os valores mais baixos foram observados para bambu recém morto até dois anos depois, e os maiores valores foram observados para as idades entre 13, 21 e 24 anos (imagem MODIS do ano de 2001) (Figura 9).

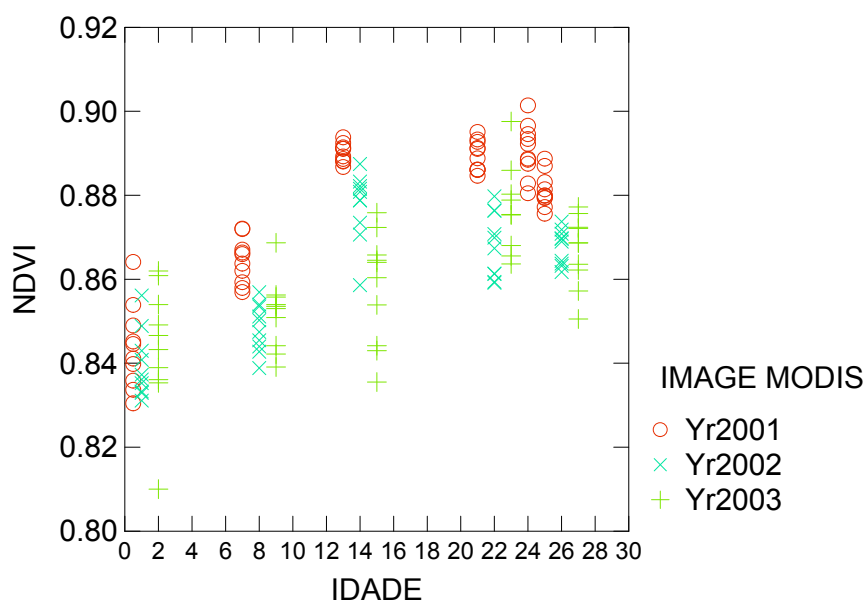


Figura 9. Índice de vegetação NDVI, obtido a partir de imagens MODIS do dia Juliano 209 dos anos 2001, 2002 e 2003, para as diferentes fases da vida das populações de bambu do Sudoeste Amazônico.

Os valores para o índice EVI variaram entre 0,47 e 0,66 (Figura 10). A idade em que o EVI atinge seu pico depende de qual imagem MODIS foi usada para extrair os valores. Nas imagens MODIS de 2002 e 2003, um pico ocorre aos 14 a 15 anos de idade. Na imagem de 2001, o pico se mantém por um período mais longo, entre 13 e 24 anos de idade. Os valores mais baixos de EVI estão associados com as populações de bambu recém morto e a fase inicial de um a dois anos, quando a nova coorte é composta inteiramente por plântulas ocultas no sub-bosque. Há uma elevação modesta no EVI aos 7 a 9 anos de idade. Nesta fase as árvores pioneiras preenchem as clareiras deixadas pela morte do bambu, mas os tapetes densos de folhas de bambu (Figura 11) ainda não estão presentes no dossel.

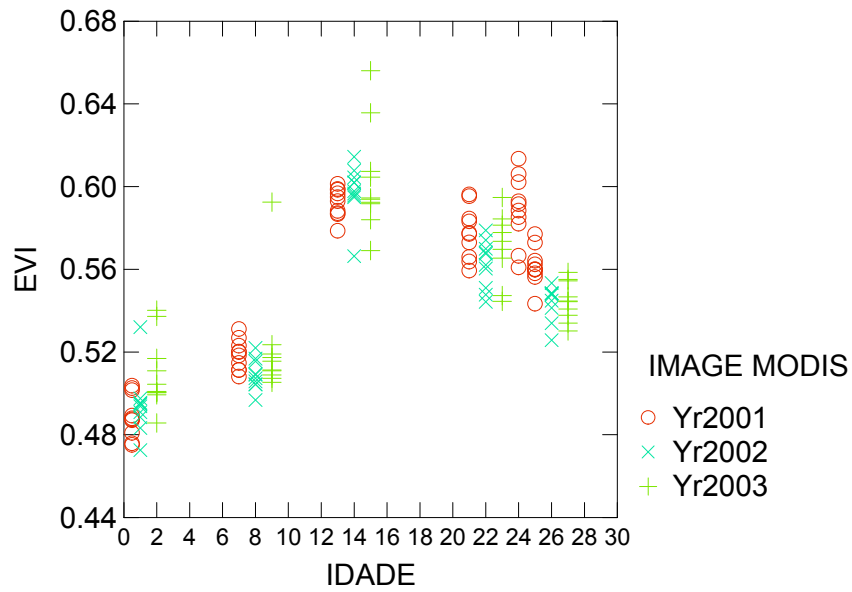


Figura 10. Índice de vegetação EVI, obtido a partir de imagens MODIS dia Juliano 209 dos anos 2001, 2002 e 2003, para as diferentes fases da vida das populações de bambu do Sudoeste Amazônico.



Figura 11. Densa camada de *Guadua sarcocarpa* sobre o dossel aberto da floresta próximo a Sena Madureira, Acre.

Na ilustração abaixo podemos analisar o padrão de duas diferentes fases da vida do bambu, onde é possível relacionar o padrão visto em campo com as imagens de satélite. Nas figuras 12-a e 12-b temos uma área com bambu em fase madura (adulta) e nas figuras 12-c e 12-d uma área onde o bambu encontra-se ausente devido à mortalidade da população no ano de 2006.

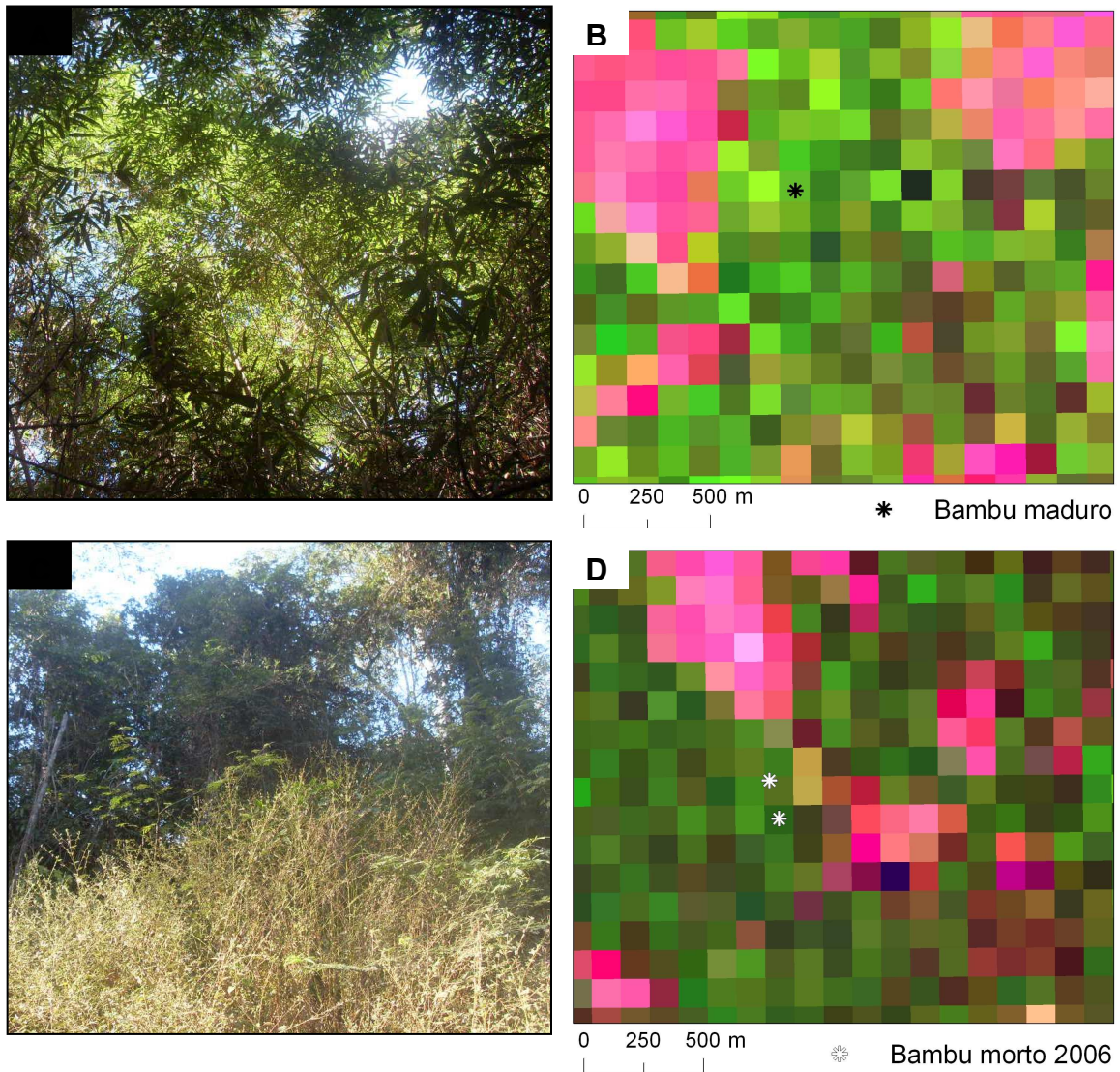


Figura 12. Padrão de duas diferentes fases da vida de populações de bambu do Sudoeste Amazônico. a) Fotografia de uma área de bambu em fase madura. b) Localização da área onde com bambu maduro na imagem Landsat de 2009. c) Fotografia de uma área onde ocorreu mortalidade de uma população de bambu no ano de 2006. d) Localização da área onde ocorreu a mortalidade no ano de 2006 na imagem Landsat do ano de 2009.

É possível perceber na Figura 12-a que o dossel está dominado por densa camada de folhas do bambu e devido a este fato seu padrão na Figura 12-b apresenta uma matiz verde claro para amarelo na composição falsa-cor, a área com bambu ausente a aproximadamente três anos apresenta uma matiz verde escuro (Figura 12-d), muito semelhante a vegetação sem a presença de bambu, pois após três anos o material seco acumulado decorrente da mortalidade não encontra-se no dossel em decorrência da decomposição e os espaços deixados pela ausência do bambu começa a ser ocupado pelas árvores pioneiras.

2.4 Discussão

Todos os padrões espectrais nas Figuras 5 e 6 seguem o padrão básico esperado para folhas verdes e saudias. Portanto, mesmo durante um evento de mortalidade maciça do bambu, os pixels do MODIS têm apenas uma pequena fração de suas áreas ocupadas por vegetação seca iluminada (bambu morto), ou por sombras (vazios deixados pelo sumiço da folhagem densa de bambu).

Em estudo realizado por Espírito Santo *et al.*(2001) foi confirmada uma mudança na fração solo, vegetação e sombra entre a fase de mortalidade e fase vegetativa após 10 anos, sendo mais perceptíveis as mudanças na fração sombra e vegetação. No período de mortalidade, existe um aumento na fração sombra por ocasião da diminuição da vegetação, a mudança na fração solo é pequena. E no período de crescimento vegetativo a fração vegetação aumenta e a fração sombra é reduzida.

As folhas verdes saudias refletem mais fortemente na faixa do NIR, onde estão localizadas as bandas 2 e 5. Desta forma qualquer mudança na densidade de folhas no dossel se expressa mais fortemente nestas duas bandas.

As florestas dominadas por bambu apresentam um dossel mais fechado, homogêneo e denso em relação à quantidade de folhas de um dossel de florestas sem a dominância do bambu. Isso faz com que as bandas 2 e 5 (infravermelho próximo), demonstrem alta reflectância e baixa absorção em dosséis dominados por bambus maduros. Na banda 6 (infravermelho médio)

com o aumento da densidade de folhas, também ocorre o aumento da reflexão. Este aumento ocorre porque esta banda é bastante sensível a sombras e com o aumento da densidade de folhas ocorre uma homogeneização do dossel, ocasionando uma significativa diminuição das sombras formadas pelas copas das árvores.

As idades abaixo de nove anos tendem a ter baixa reflectância na maioria das bandas. As idades com bambu maduro no dossel (> 12 anos) tendem a ter maior reflectância em praticamente todas as bandas. Isto significa que as florestas na fase mais jovem têm um dossel com mais sombra, ocasionada por espaços entre as árvores e/ou entre as folhas de árvores semi-decíduas. Estes vazios acabam sendo preenchidos pelas folhas do bambu nas idades > 12 anos.

Na faixa dos 13 a 15 anos os altos valores de reflectância das populações presentes nessa região podem ser explicados pela diferenças regionais na densidade de bambu, além das diferenças regionais e temporais no grau de decíduidade das árvores, pois esta região não se apresentou decídua em nenhum dos anos analisados, diferentemente das outras regiões que apresentam um grau elevado de decíduidade das árvores. Características da própria espécie de bambu presente nessa região podem também explicar a variação nos valores de reflectância.

A ocorrência de ruídos são visíveis principalmente nas idades baseadas nas imagens do ano de 2002 e 2003, onde fica evidente uma grande variação nas réplicas com mesma idade, fato este que pode estar ligado a erros sistemáticos da imagens MODIS.

Outras fontes de variabilidade

Dentre as fontes de variabilidade que explicam as diferenças nos valores de reflectância das populações analisadas podemos citar a idade, populações com diferentes idades apresentam valores distintos de reflectância.

Na fase inicial até aproximadamente 10 anos o bambu fica oculto no sub-bosque, e o padrão espectral nessa fase será o padrão da vegetação sem a presença de bambu. Após os 10 a 15 anos o bambu volta a dominar o dossel, nesta fase de seu ciclo de vida, a coorte rapidamente reconquista espaço temporariamente cedido às árvores pioneiras, com a morte da geração

anterior. Na fase adulta devido a sua densa camada de folhas reflete mais fortemente do que a floresta sem bambu, a alta reflectância é mais pronunciada na faixa do infravermelho-próximo (Nelson, 2006).

Quando morre de forma sincronizada, cada população de bambu torna-se espectralmente distinta de seus vizinhos, devido aos ramos secos iluminados no dossel da floresta. Este padrão espectral é efêmero, pois os ramos e colmos mortos apodrecem rapidamente na umidade amazônica. Devido a perda das folhas formam-se buracos no dossel, aumentando a quantidade de “sombra” em cada pixel, diminuindo a reflectância em todas as bandas, inclusive na faixa do infravermelho médio.

Outra fonte de variação que podemos citar são as diferenças entre as imagens de anos distintos, que podem ser explicadas pela qualidade do processamento feito pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), variação do grau de deciduidade das árvores nos diferentes anos e também das condições climáticas, anos que apresentam um período ou volume maior de chuva podem apresentar uma maior quantidade de névoa e nuvens nas imagens prejudicando sua qualidade. Por outro lado anos que apresentam um período de seca prolongado podem aumentar o grau de deciduidade das árvores.

A maioria dos produtos MODIS é baseada em uma rigorosa filtragem das várias observações possíveis para um dado pixel (ex. em um ciclo de 16 dias, um mesmo pixel pode ser visto até 64 vezes), de tal forma que apenas a melhor observação seja selecionada (o que resulta em um *compositing* de várias datas) (Van Leeuwen *et al.*, 1999; Huete *et al.*, 2002).

Ainda assim, e apesar do aprimoramento contínuo dos algoritmos usados para filtrar pixels contaminados com nuvens ou aerossóis, por exemplo, um grande número de pixels dos composites gerados a cada 8 ou 16 dias precisam ser descartados, com base nos metadados que acompanham cada produto (Júnior *et al.*, 2009).

As imagens de composição 16 dias apresentam o efeito da vizinhança de pixels obtidos em diferentes configurações, pois o produto é composto por diversas imagens obtidas em situações distintas apresentando maior variância (Ribeiro *et al.*, 2009).

A variação entre idades próximas observadas nas Figuras 4, 5 e 6 são consequência da fonte de variação citada acima, ou seja, diferenças entre as imagens dos anos 2001, 2002 e 2003.

Por último, podemos citar como fonte de variação as diferenças entre espécies distintas, características morfológicas e fisiológicas das espécies tais como: largura das folhas, distância das folhas, tipo de inserção foliar, tipo e espessura das folhas entre outros. E também o clima e solo onde estão distribuídas podem favorecer uma maior ou menor densidade de bambu em uma dada região.

Com o desenho experimental, é possível detectar o efeito da diferenças de qualidade das imagens, embora não há um número suficiente de idades disponíveis para reconhecer e isolar os efeitos das diferenças entre populações distintas. No entanto, sabemos que este efeito está presente, pois percebemos visualmente que as manchas de bambu perto de Sena Madureira (idades de 13 a 15 anos) tendem a ser muito mais “verdes” quando maduras. Bambuzais maduros desta região apresentam maiores valores de NIR, SWIR e EVI no estágio maduro, comparado com outras regiões.

O grau de decíduidade das árvores dicotilodôneas presentes no bambuzal pode variar entre anos, contribuindo para a fonte de erro ligada a diferença entre qualidade variação entre as imagens, mesmo tendo usado imagens do mesmo dia juliano nos três anos. A decíduidade também varia entre regiões, contribuindo para as fontes de erros ligados a diferença entre populações. Por exemplo, as florestas na fronteira centro-sul do Acre examinadas em diversas aquisições do LANDSAT, tendem a ser mais decíduas que outras regiões da área de estudo.

Os valores mais altos de reflectância NIR (bandas 2 e 5) para os bambus com idades entre 13 e 15 anos pode ser uma consequência da fonte de variabilidade ligada a diferença de qualidade das imagens descrita acima. Estas três idades foram todas derivadas de uma mancha de mortalidade em 1988, na região de Sena Madureira. Os bambus nesta região exibem maior reflectância NIR e SWIR que as de outras regiões analisadas podendo se tratar de uma espécie distinta, que atinge maiores densidades no dossel.

Capítulo III - Ciclo de vida das populações de *Guadua* spp. do Sudoeste da Amazônia

3.1 Introdução

As perguntas sobre como acontece o ciclo de vida dos bambus lenhosos são muitas, e vem despertando o interesse dos pesquisadores desde o século 19. Esses ciclos são longos e variam de 20-60 anos, existindo ainda exceções de ciclos com duração de 100 anos para algumas espécies de bambu (Janzen, 1976).

O ciclo de vida de *Guadua weberbaueri* pode ser descrito em seis etapas: florescimento, mortalidade, regeneração, crescimento, estabelecimento e dominância do bambu (Silveira, 2001).

O evento de mortalidade sincrônica do bambu cria a oportunidade de regeneração das árvores, pois na ocorrência desses eventos a competição no sub-bosque é reduzida pela abertura do dossel (Holz, 2006).

O isolamento espacial e a separação temporal entre as distintas populações favorecem a especiação, respectivamente a especiação alopátrica e a aloclônica. Por especiação, entende-se o processo de geração de novas espécies (Martins - Neto, 2006).

As florestas dominadas por bambus escandentes no estado do Acre estão distribuídas de forma contínua e em grandes manchas, (de 10^2 a 10^4 km² cada uma). Cada mancha é uma população distinta. Na fase adulta, essas áreas dominadas por bambu podem ser detectadas em imagens de satélite por possuírem um padrão espectral semelhante ao das florestas secundárias, pois a densa folhagem do bambu reflete o infravermelho próximo e médio (bandas TM4 e TM5) mais que outras espécies, distinguindo-as das florestas sem bambu (Nelson, 1994).

As imagens permitem também a distinção da fase senescente, pós-reprodutiva (Nelson et al., 2006), devido aos ramos secos iluminados. Esta fase seca é efêmera. Os ramos e colmos mortos logo apodrecem e se desmembram, caindo ao chão, ocultos pelas árvores. Como descrito no capítulo anterior as idades abaixo de nove anos tendem a ter baixa reflectância

na maioria das bandas, nessa fase o padrão espectral é determinado pela vegetação sem bambu que está dominando o dossel. Após 12 anos o bambu atinge o dossel e sua reflectância tende a ser maior em praticamente todas as bandas tornando possível sua distinção da vegetação sem a presença de bambu ou com bambu oculto no sub-bosque.

Apesar de sua grande extensão, a taxonomia dos bambus e sua ecologia são pouco conhecidas. Como os ciclos de vida são longos e o acesso a grande parte destes bambuzais é ainda restrito, poucas coletas de material fértil foram feitas, o que torna difícil o reconhecimento das espécies (Smith, 2000).

Este capítulo teve como objetivo determinar a duração do ciclo de vida de populações dos bambus escandentes que dominam o dossel no sudoeste da Amazônia (*Guadua* spp.), por meio de observação direta do ciclo completo e através de um método indireto/inferencial, complementando estudo realizado anteriormente.

3.2 Metodologia

O desenvolvimento deste capítulo foi realizado conforme mostra a Figura 13, cuja descrição é feita nos tópicos subseqüentes.

Os limites da área de estudo, para o método indireto-inferencial, se deram a partir da cena órbita 3 ponto 67 do *World Reference System 1* do LANDSAT MSS do ano de 1976, cobrindo cerca de 34.000 km² da região Sudoeste da Amazônia (polígono contornado com linha branca na Figura 1). Para o método de observação direta dos eventos de mortalidade foi considerada toda região de ocorrência dos bambus no Sudoeste amazônico (Figura 1).

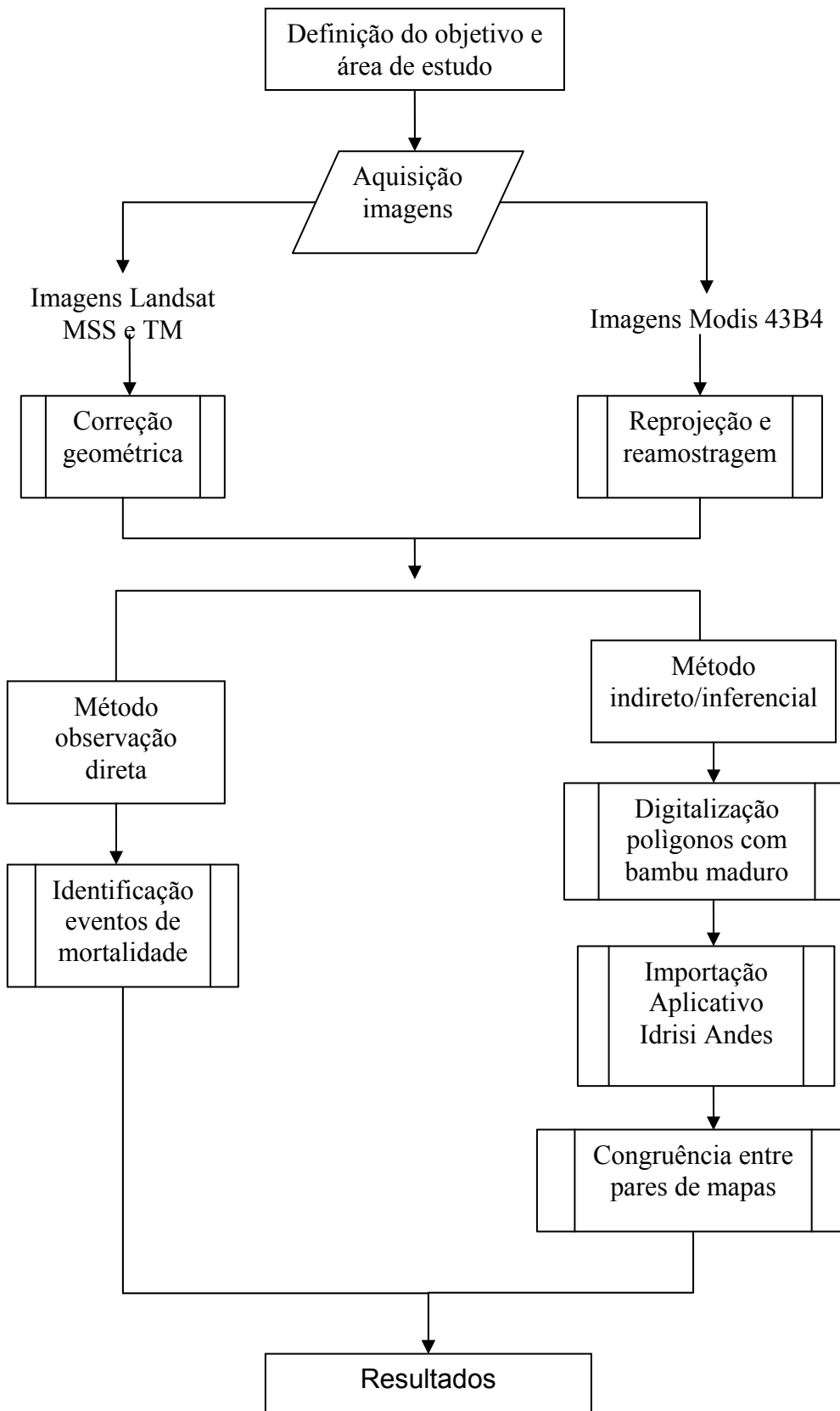


Figura 13. Fluxograma com as etapas realizadas para o objetivo 2.

Foram empregadas duas abordagens: (1) detectar dois eventos temporalmente distintos de mortalidade síncrona, dentro de uma mesma mancha geográfica e (2) inferir o comprimento do ciclo de vida pelo grau de congruência entre mapas temáticos do estágio maduro, de uma área de 34.000 km², em série temporal.

A primeira abordagem consistiu em procurar manchas (populações) de bambu recém morto em imagens do sensor orbital LANDSAT MSS dos anos 70. Foram investigadas as poucas imagens MSS disponíveis de qualquer parte da região de ocorrência dos bambus escandentes no Sudoeste da Amazônia. Foram empregadas as orbitas de 002 a 004 e pontos de 66 a 68, do *World Reference System 1*. A repetição da mortalidade na mesma mancha geográfica foi procurada em imagens de anos posteriores, até julho de 2008. Para cada caso, foi registrado o tempo entre os eventos de mortalidade. As imagens mais recentes foram do LANDSAT 5 TM e do MODIS produto MOD43B4, obtidas gratuitamente do sítio INPE e da NASA.

3.2.1. Método Inferencial

O método inferencial foi realizado em uma área de 34.000 km², onde foi mapeado o contorno dos bambus maduros em todas as datas de imagens disponíveis. No método inferencial foi analisada uma seqüência temporal formada pelos sensores LANDSAT MSS, TM, ETM⁺ e MODIS. Foram utilizadas imagens de 21 datas ao longo de 33 anos (1975 a 2008) dentro dos limites de uma única cena do LANDSAT MSS (Tabela 3). Presumimos que (1) dentro da área desta cena, cada um ou dois anos alguma população morre ou aparece como madura no dossel, de modo que o mapa do estágio maduro estaria constantemente modificando sua configuração e que (2) todas as manchas dentro da área de estudo têm o mesmo comprimento de ciclo de vida. Satisfeitas estas presunções, espera-se que a congruência espacial entre qualquer par de mapas das manchas na fase madura, será maximizada quando a distância temporal entre o par for equivalente ao tempo de um ciclo de vida.

O produto 43B4 do MODIS possui resolução original de 926 m em projeção sinusoidal e não necessita de correção geométrica. Utilizando a ferramenta MODMODIS *Reprojection Tool* (MRT), quatro *tiles* do produto foram

concatenados, projetados para coordenadas em latitude e longitude, reamostrados com a opção de vizinho-mais-próximo, e uma janela padrão cobrindo toda a área de interesse foi extraída. As imagens de saída foram salvas no formato Geotiff.

Embora já projetadas para UTM, as imagens LANDSAT 5 fornecidas pelo INPE necessitam de correção geométrica. Utilizou-se como base de controle cartográfico o mosaico LANDSAT Geocover de 1990 em projeção UTM, hemisfério sul. Estas imagens apresentam um Erro Médio Quadrático (EMQ) de 50 metros. A função de mapeamento utilizada foi “*Affine*” e a função de reamostragem foi bilinear. Foram coletados nove pontos de controle, sendo oito espaçados regularmente pelas extremidades e um no centro. A retificação para a mesma projeção UTM fornecida pelo INPE implica num modelo matemático mais simples, com menor erro. O erro RMS foi mantido em 0,5 pixels ou menos. A maioria das imagens Landsat TM foi re-amostrada para uma resolução espacial de 120 metros antes do georreferenciamento. As imagens MSS têm resolução de 80m e não foram re-amostradas. Portanto o erro foi mantido abaixo dos 60m em média. O erro RMS de 60m é mais do que suficientemente para a escala das imagens de menor resolução espacial usadas no estudo (1000m). Uma vez registradas com a base GeoCover em UTM, as imagens foram reprojctadas para o sistema de coordenadas Lat-Long e exportadas no formato Geotiff RGB de 24 bits.

As imagens foram classificadas visualmente em três categorias: (1) bambu não dominante, (2) dossel da floresta dominado por bambu vivo e maduro e (3) áreas encobertas por nuvens.

A classe (1) inclui: rios, planícies alagadas, bambu recentemente morto no dossel da floresta, floresta que nunca teve bambu, floresta onde bambu está em um estágio juvenil escondido pelas árvores e floresta com baixa densidade de bambu entre as árvores. Para as áreas encobertas, foi atribuído o valor zero, constituindo a união de todas as nuvens e sombras de nuvens em todas as datas, mais as áreas sem dados fora das bordas da cena LANDSAT 003/67.

Foram digitalizados polígonos vetoriais representando as áreas com o dossel dominado por bambu maduro (*Guadua* spp.), as áreas de nuvens, e o limite da área de estudo. Os polígonos digitalizados foram convertidos para o formato matricial (*raster*) com uma resolução espacial fixa (2066 colunas e

1930 linhas) para produzir imagens temáticas da mesma área geográfica com o mesmo número de colunas e linhas.

Tabela 3. Imagens dos sensores orbitais ópticos utilizadas neste estudo.

DATA	DIA JULIANO	SENSOR
21 de Julho de 1975	202	Landsat MSS
07 de Julho de 1976	159	Landsat MSS
21 de Junho de 1979	172	Landsat MSS
03 de Agosto de 1981	215	Landsat MSS
09 de Julho de 1985	190	Landsat TM
02 de Julho de 1988	184	Landsat TM
02 de Setembro de 1990	245	Landsat TM
16 de Novembro de 1991	320	Landsat TM
13 de Setembro de 1994	256	Landsat TM
14 de Agosto de 1996	227	Landsat TM
15 de Agosto de 1997	227	Landsat TM
05 de Julho de 1998	187	Landsat TM
22 de Junho de 2000	174	Landsat TM
28 de Julho de 2001	209	MODIS (produto 43B4)
28 de Julho de 2002	209	MODIS (produto 43B4)
28 de Julho de 2003	209	MODIS (produto 43B4)
28 de Julho de 2004	210	MODIS (produto 43B4)
28 de Julho de 2005	209	MODIS (produto 43B4)
09 de Junho de 2006	160	Landsat TM
17 de Julho de 2007	198	Landsat TM
27 de Junho de 2008	179	Landsat TM

Por fim, foram determinados dois atributos para cada par de imagens temáticas: sua distância temporal e sua congruência espacial. A congruência é definida como o número de pixels com valores concordantes dividido pelo número total de pixels na área de estudo. Os pixels com valor zero (nuvens, sombras de nuvens e área externa das imagens) são desconsiderados neste cálculo.

Os valores de concordância entre todos os pares de imagens foram representados graficamente, onde temos no eixo X o delta tempo e no eixo Y o grau de concordância de cada par. Um gráfico similar foi preparado usando apenas os pares com a imagem de 1976.

3.2.2. Método de Observação Direta

O método de observação direta consistiu em procurar manchas (populações) de bambu recém morto em imagens do sensor orbital LANDSAT MSS dos anos 70. Foram investigadas as poucas imagens MSS disponíveis de qualquer parte da região de ocorrência dos bambus escandentes no SW da Amazônia. Foram empregadas as orbitas de 002 a 004 e pontos de 66 a 68. A repetição da mortalidade na mesma mancha geográfica foi procurada em imagens de anos posteriores, até julho de 2008. Para cada caso, foi registrado o tempo entre os eventos de mortalidade. As imagens mais recentes foram do LANDSAT5 TM e do MODIS produto MCD43B4.

3.3 Resultados

Dentro da área de estudo de 34.000 km² foram mapeadas as populações de bambu maduro em 21 momentos ao longo de 33 anos. A congruência entre todos os pares de mapas é plotada contra a distância temporal de cada par na Figura 16. A congruência de cada data com 1976 é apresentada na Figura 15.

Os mapas temáticos de dossel dominado por bambu maduro para oito datas representativas do ciclo de vida são apresentados na Figura 14. As classes (1) bambu maduro, (2) bambu não maduro ou ausente e (3) máscara de nuvens, são representadas pelas cores cinza, branca e preta, respectivamente.

A mortalidade síncrona de uma população ocorre poucos meses após a reprodução síncrona. A nova coorte juvenil permanece escondida no sub-bosque por alguns anos. A transição para a classe temática “bambu maduro” ocorre quando esta coorte juvenil reconquista o dossel da floresta. O grau de concordância entre o mapa do ano 1976 e ele mesmo é 1.0, tendo uma

distância do tempo zero. Cada um dos mapas subseqüentes diminuiu gradualmente sua congruência com o mapa de 1976, até atingir seu mínimo após 12 anos. Os mapas subseqüentes são progressivamente mais parecidos com o mapa de 1976, até chegar ao máximo valor de concordância de 98%, após 28 anos, com a configuração espacial mais próxima do tempo zero.

O intervalo de tempo entre os anos de 1976 e 2004 corresponde a um ciclo completo de vida. A fase “madura”, mapeada aqui, não é curta. Ocupa dois terços da vida de uma população (Nelson & Bianchini 2005; veja resultados do capítulo III). Por isso é necessário que ocorra algum evento de mortalidade, ou que alguma população passe da fase juvenil para “madura”, a cada um ou dois anos dentro da área de estudo, para garantir que haja mudança em cada mapa consecutivo.

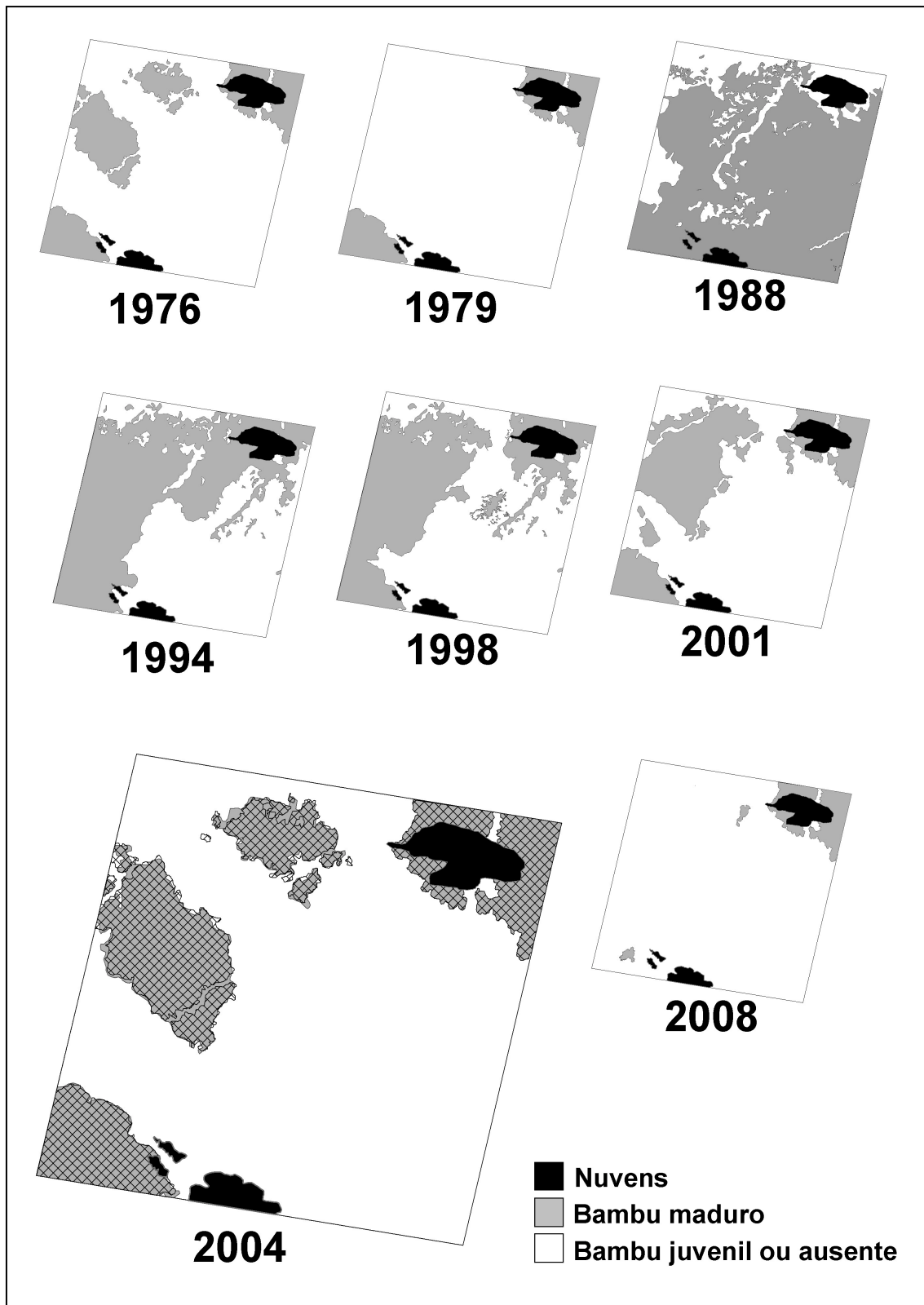


Figura 14. Série temporal completa de mapas temáticos do dossel dominado por bambu maduro, representadas por oito datas ao longo de 33 anos. Preto é a máscara de nuvens, cinza é dossel dominado por bambu maduro e em branco são as áreas com bambu imaturo ou bambu ausente. A configuração do ano de 1976 (hachuras) é sobreposta no mapa de 2004, ilustrando a congruência quase perfeita, após 28 anos.

O decaimento da concordância após os 28 anos (Figura 15) representa o início de um novo ciclo de vida para aquelas populações analisadas, determinando o tempo de duração do ciclo de vida dos bambus (*Guadua* spp.) do Sudoeste da Amazônia.

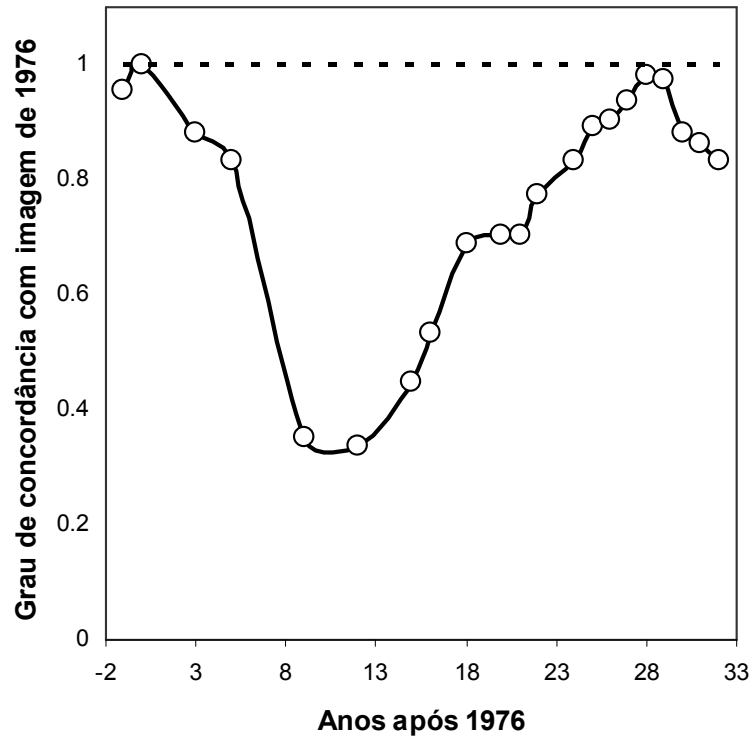


Figura 15. Grau de concordância entre o mapa de bambu maduro em 1976 e cada data posterior.

A comparação entre todos os pares mapas temáticos do dossel dominado por bambu maduro resultou num total 210 valores de similaridade e de distâncias temporais entre pares de imagens. Quando plotados em gráfico de distância temporal versus congruência, os pares apresentam uma tendência similar à comparação entre o mapa temático do ano de 1976 com as datas posteriores. Ocorre uma queda acentuada nos valores de similaridade entre um a nove anos, decaindo mais gradativamente entre os intervalos de 10 a 20 anos. A maior concentração de valores menos concordantes está na faixa de 10 a 20 anos de intervalo entre as imagens, onde existem os menores valores de concordância entre as imagens (Figura 16). A menor variância para as

distâncias temporais maiores está em parte relacionada com o menor número de pares de imagens disponíveis para as maiores distâncias no tempo.

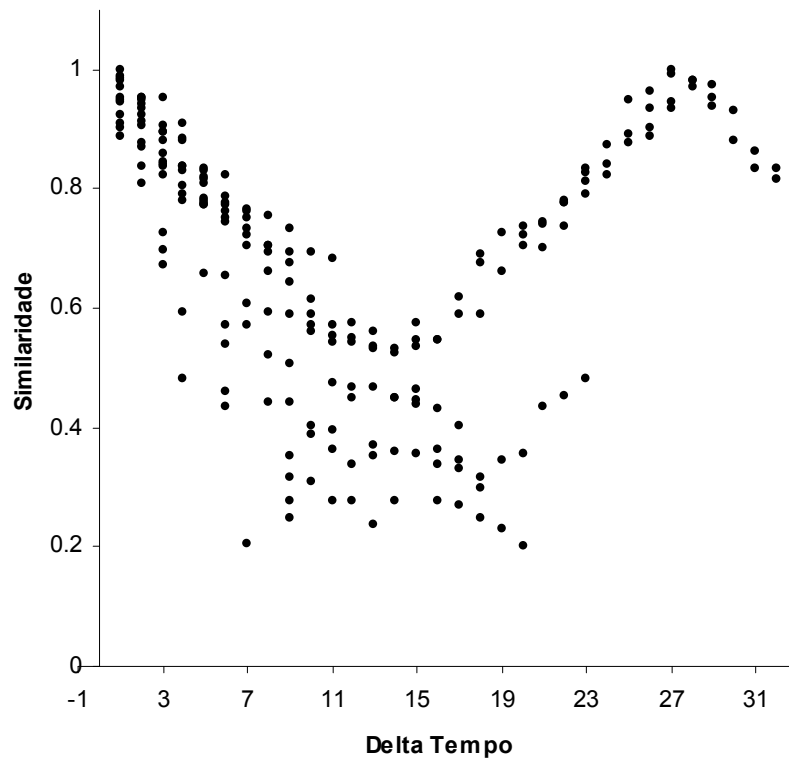


Figura 16. Grau de concordância entre todos os mapas de bambu maduro.

Pelo método de observação direta, foram detectados apenas três casos de mortalidade repetida no mesmo local, todos com ciclos de 27 a 28 anos. Uma população morreu entre os anos de 1975-1976 (dentro da área de 34.000 km² analisados acima). A mesma população morreu entre os anos de 2003-2004 (Figura 17). Outro evento que ocorreu entre os anos de 1976-1977 se repetiu dentro dos limites da população anterior entre os anos de 2004-2005. O terceiro evento de mortalidade ocorrido entre os anos de 1979-1980 voltou a se repetir 27 anos depois entre os anos de 2006-2007.

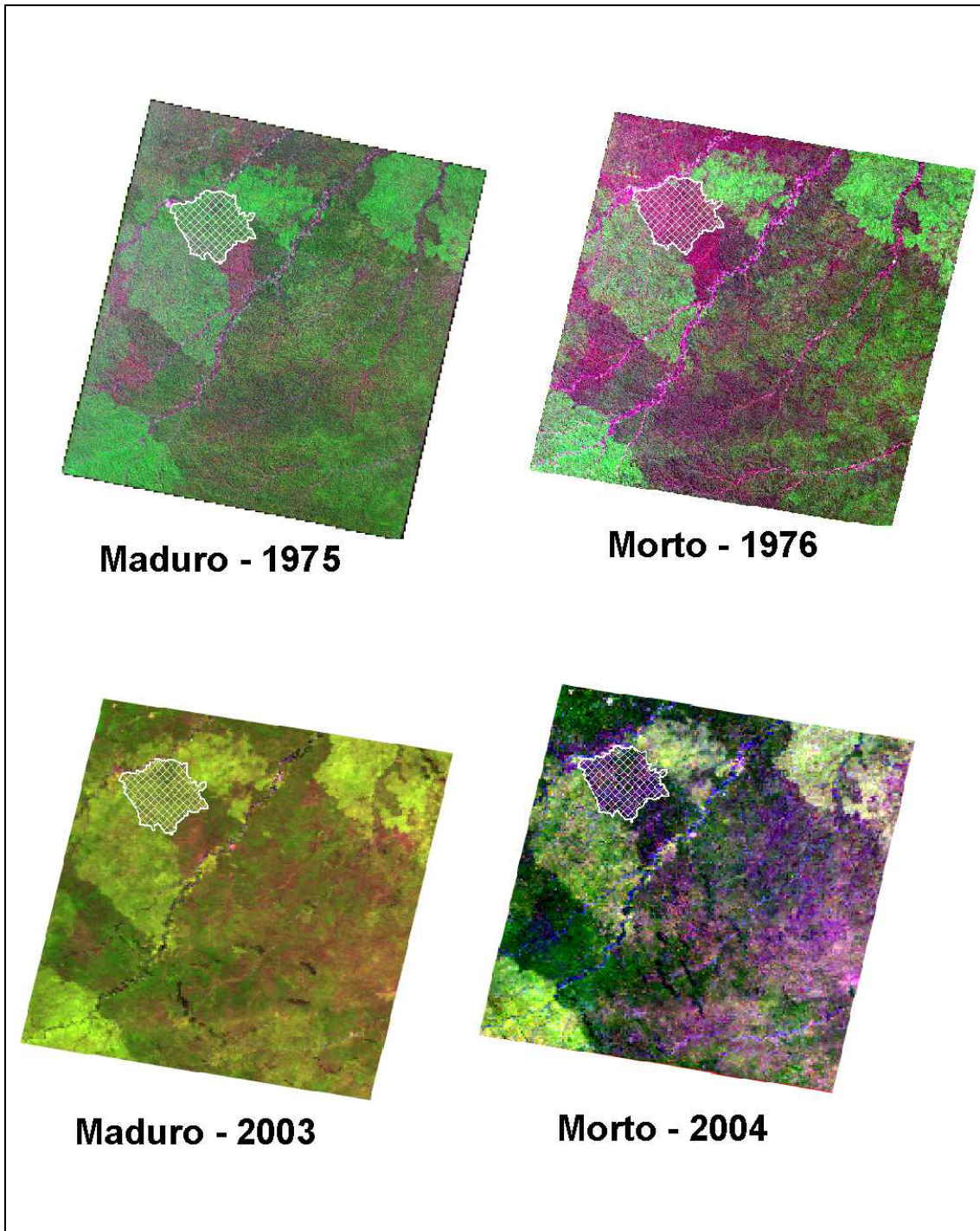


Figura 17. Cena 3-67 do *World Reference System 1*. Representação (delimitadas pelas rachuras brancas) de um evento de mortalidade ocorrido entre os anos de 1975-1976 em imagens MSS, ocorrendo novamente entre os anos de 2003-2004 dentro da mesma mancha de bambu, em imagens MODIS.

3.4 Discussão

De acordo com Janzen (1976), a borda nítida entre duas populações de bambu espacialmente contíguas, bem como a assincronia entre as duas populações, seriam mantidas pelas mesmas pressões evolutivas postuladas pelo autor, quando tentou explicar a sincronia interna. Sementes da primeira população a morrer podem ser dispersas para dentro da segunda população e colmos jovens também podem se infiltrar, mas ambas estariam em desvantagem competitiva na sombra dos bambus adultos que ainda não morreram na segunda população. Da mesma forma, quando esta segunda população morre, suas plântulas e colmos que eventualmente se infiltrarem na área da primeira população, estariam em desvantagem competitiva frente a uma coorte de plantas jovens já estabelecidas e com crescimento já avançado.

Entretanto, duas populações adjacentes, internamente sincronizadas, mas assíncronas entre si, podem ter estabelecidos seus relógios fenológicos quando separadas e posteriormente expandidas até se contactarem (Silveira, 2001).

As poucas áreas discordantes entre as imagens temáticas de 1976 e 2004 são possivelmente resultado de problemas de digitalização dos polígonos nas imagens MODIS que possuem baixa resolução espacial, devido a esse fato o grau de concordância atingir 0,98. É também possível que algumas populações (ou espécies distintas) tenham ciclos de vida um pouco mais curtos ou longos que 28 anos.

Nelson *et al.* (2006) citam que essa divergência entre imagens pode estar ocorrendo, também, devido ao fato de que algumas populações são fragmentadas na sua margem com uma população vizinha, sugerindo uma possível substituição pela expansão da população vizinha. Possivelmente, as duas populações são espécies distintas. A fragmentação foi observada apenas em imagens orbitais, sem verificação de campo ou coletas botânicas.

A hipótese essa pequena assincronia, de aproximadamente 12 meses, entre as populações poderia ser resultado de fogos separados no passado (Nelson & Irmão, 1998) não é sustentada por moradores locais que afirmam que os bambus rebrotados após fogo em capoeira ou margem da pastagem acabam morrendo em sincronia com o bambu na floresta próxima.

Há muitas amostras com distâncias curtas no tempo (1 a 5 anos) e poucas amostras com distâncias grandes no tempo (25 a 33 anos). A curva apresentada na figura 12 se comportou de forma mais previsível e consistente nestes dois extremos. Portanto, o nível de “ruído” para as diferentes distâncias temporais não é uma consequência do número de pares de imagens disponíveis, como se poderia esperar. Os ruídos para as distâncias temporais entre 10 e 20 anos são uma consequência de haver áreas extensas que sofrem mortalidade de forma semi-sincronizada, as “super-manchas”(grupos de manchas de mortalidades adjacentes) tratada no próximo capítulo. Estas super-manchas levam mais de 5 anos para completar sua mortalidade. Alguns dos intervalos de 10 anos podem incluir a mortalidade de uma “super-mancha”, e outros intervalos de 10 anos não incluem a mortalidade de uma “super-mancha”.

Capítulo IV – Ondas de florescimento de *Guadua* semi-escandente do Sudoeste Amazônico

4.1 Introdução

O florescimento em bambus lenhosos é um fenômeno muito pouco estudado, e embora não se conheçam suas causas, sabe-se que fatores fisiológicos e climáticos, bem como ataques de pragas e moléstias, influenciam na sua ocorrência, conforme ressaltaram os trabalhos de Lopez (1974) apud Azzini(1982).

Assim como muitos outros bambus lenhosos, as espécies do gênero *Guadua* são semelparas e monocárpicas, apresentando um único evento de reprodução e morrendo após esse evento, respectivamente. Tanto o evento reprodutivo quanto a mortalidade ocorrem de forma sincronizada dentro de uma população de indivíduos espacialmente contíguos (Janzen, 1976).

Por serem monocárpicos e dominantes na floresta, os bambus de longa vida sofrem forte pressão evolutiva para a sincronia reprodutiva entre genets (Janzen, 1976). O indivíduo que antecipar ou atrasar seu florescimento não receberá pólen de outra planta e, mesmo se produzir sementes, sua prole será sombreada ou pelos adultos (se antecipar) ou pelas outras plântulas da coorte (se atrasar). A sincronia se manifesta na zona de contato entre duas populações, onde se observa uma linha demarcadora nítida quando uma acaba de frutificar e morrer, e a outra população vizinha ainda permanece viva e assíncrona em relação à outra população (Nelson *et al.*, 2006).

Existem relatos do fenômeno da semi-sincronia das distintas populações de uma espécie de bambu, onde os eventos de floração se propagam ano a ano, seguindo um mesmo sentido como uma onda, por toda a paisagem (Keeley e Bond, 1999).

O fenômeno das ondas de florescimento é descrito para diversos bambus no mundo, incluindo um caso de sete populações contíguas de *Guadua* escandentes no extremo oeste do Acre (Nelson *et al.* 2006).

Este capítulo teve como objetivo analisar a relação entre a proximidade no espaço e a proximidade no tempo para os eventos de reprodução de

populações distintas. A primeira hipótese é não exista relação entre proximidade no espaço e no tempo para os eventos de reprodução de populações distintas de bambu no sudoeste amazônico. Uma vez que distintas populações de *Guadua* florescem em anos diferentes e não trocam genes, nada deveriam “saber” sobre a data de reprodução de seus vizinhos. Portanto a ocorrência dos eventos de reprodução (e mortalidade) de duas populações deveria ser independente da distância entre estas.

A segunda hipótese é que “Populações próximas no espaço exibem eventos de reprodução próximos no tempo”. Esta alternativa pode ser consequência da derivação de duas ou mais populações contíguas a partir de uma única população ancestral. Ou pode representar respostas a um fenômeno local externo, como pragas, que estimula a floração em ondas, dentro de uma determinada sub-região da província dos bambus no sudoeste da Amazônia.

4.2 Metodologia

O desenvolvimento deste capítulo foi realizado conforme mostra a Figura 18, cuja descrição é feita nos tópicos subseqüentes.

Foi analisada toda região de ocorrência dos bambus no Sudoeste amazônico (Figura 1). Foram utilizados os *tiles* H11V9, H10V10, H11V10, H10V9 do MODIS, que cobrem toda região do sudoeste da Amazônia até os Andes. As imagens MODIS foram transformadas para o formato TIFF com o *software* MODIS *Reprojection Tool* (MRT), os dados foram reprojatados para latitude e longitude e reamostrados pelo método de vizinho-mais-próximo, para evitar a mistura com pixels ruins mascarados com “valores bandeira”.

As imagens foram visualizadas em composições falsa-cor, atribuindo as três cores primárias aditivas, azul (à faixa espectral verde), verde (à faixa infravermelho próximo) e vermelho (à faixa infravermelho médio).

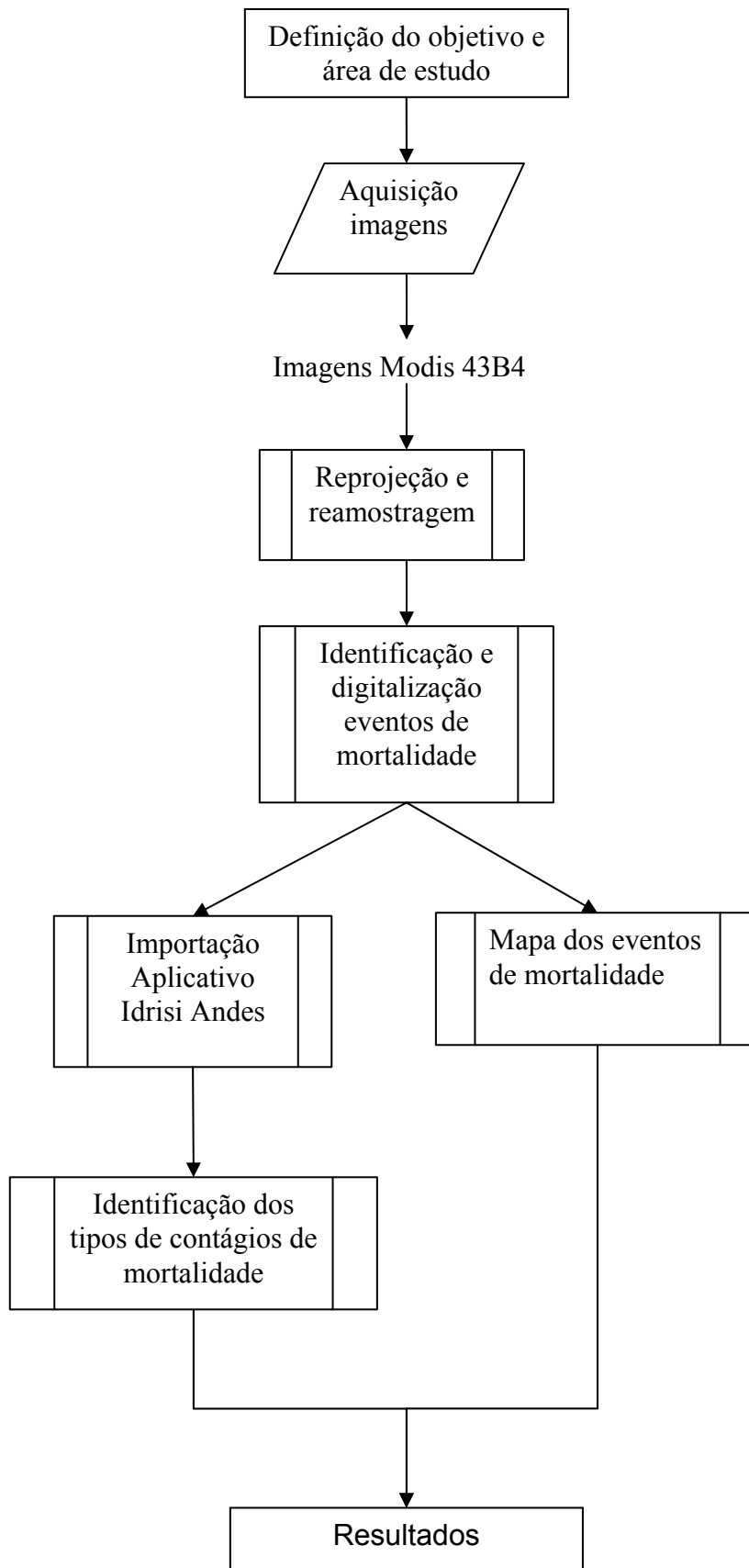


Figura 18. Fluxograma com as etapas realizadas para o objetivo 3.

Foram empregadas as imagens anuais do MODIS, produto 43B4, no período 2001 a 2008, cobrindo toda a extensão da província de florestas com bambu no sudoeste da Amazônia. Como o florescimento em si não é detectado nas imagens, foi considerada a fase de mortalidade pós-reprodutiva. Esta fase é espectralmente distinta de todas as outras fases de vida. Há abundância de material vegetal seco e iluminado no dossel. É também uma fase curta, marcando bem o ano exato do florescimento, pois a alta umidade da floresta amazônica faz com que os bambus mortos logo apodreçam e caiam no sub-bosque. Todas as manchas de mortalidade de bambu ocorridas nos oito anos foram identificadas e digitalizadas.

Após a digitalização foi elaborado um mapa com os eventos de mortalidade do bambu durante oito anos, sobrepostos ao mapa de ocorrência dos bambus no sudoeste da Amazônia.

Foram identificadas as zonas de contágio entre os pares de populações mortas, sendo contágios de: primeira ordem (eventos adjacentes no espaço), segunda ordem (separados no espaço por uma população intermediária) e de terceira ordem (separados por duas populações). Foi elaborado um gráfico com a frequência dos três tipos contágios no espaço e a distância temporal entre eles.

Entre os oito anos de imagens há um maior número possível de distâncias curtas no tempo. Sete destas imagens são separadas por um ano, seis são separadas por dois anos, cinco são separadas por três anos, quatro são separadas por quatro anos e apenas três são separadas por cinco anos. Dessa forma se torna necessária a normalização das frequências dividindo essas frequências pelo número de pares para cada distância.

Foi realizada uma visita de campo para validação dos dados, onde foram coletados pontos com aparelho Sistema de Posicionamento Global - GPS em áreas onde ocorreram eventos de mortalidade do bambu no ano de 2006 e área com bambu maduro na região leste do Estado do Acre, próximo ao município de Acrelândia.

4.3 Resultados

Foram identificadas 76 manchas de mortalidade ocorridas entre os anos de 2001 a 2008. Todas as manchas de mortalidade mapeadas podem ser consideradas como agrupadas no tempo, pois foi examinado um grupo de oito anos consecutivos entre os 28 anos de um ciclo de vida. A maioria destas manchas de mortalidade agrupadas no tempo está também distribuída de forma agrupada no espaço (Figura 19). Os tons mais similares que representam os anos mais próximos no tempo encontram-se mais próximos espacialmente. No entanto, dentro da escala de tempo dos oito anos 2001 a 2008, a análise estatística de uma relação entre proximidade no espaço e proximidade no tempo requer a confecção de um modelo nulo adequado.

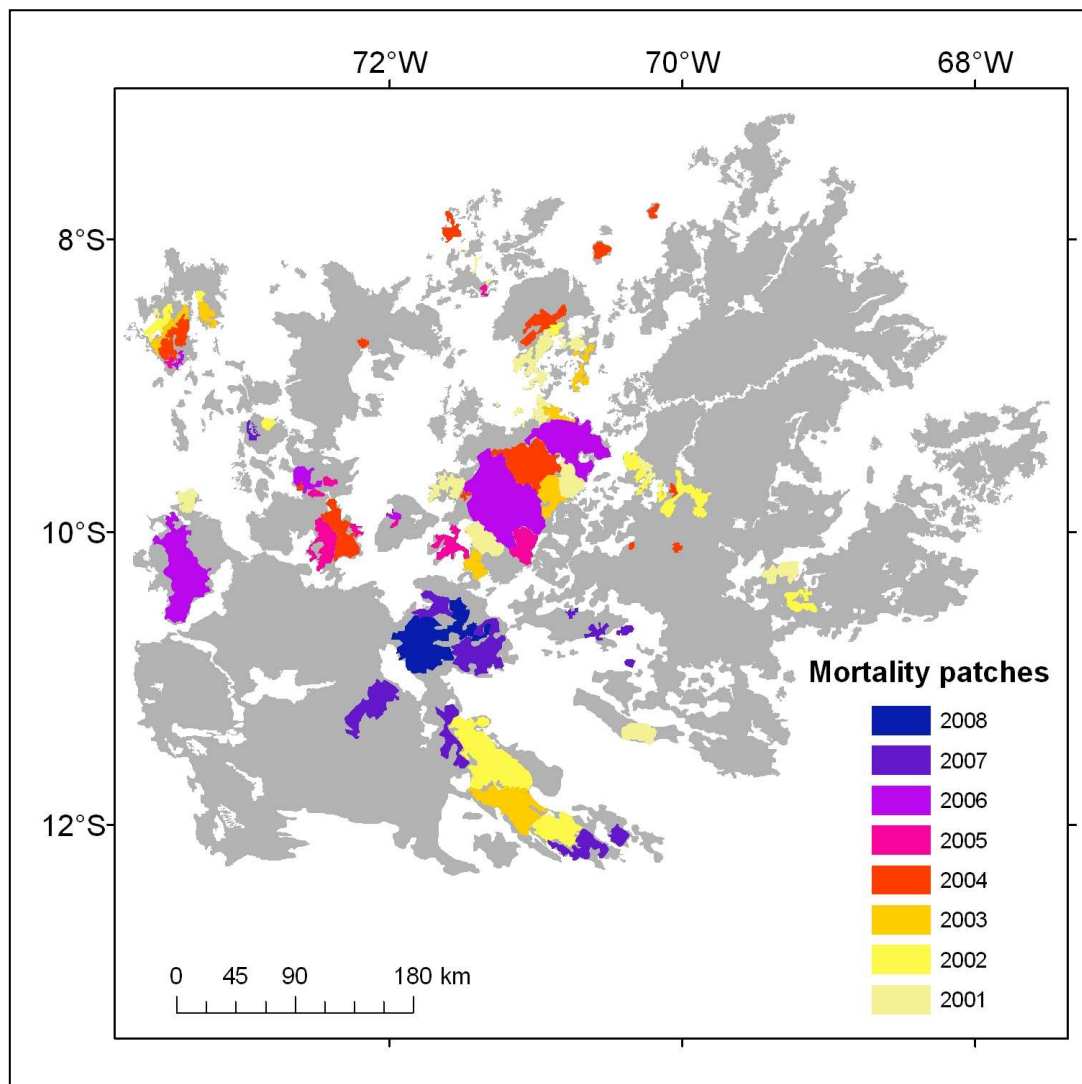


Figura 19. Distribuição das manchas de mortalidade das populações de bambu do Sudoeste da Amazônia.

Apenas um agrupamento de eventos de mortalidade, localizado no extremo oeste do Estado do Acre, demonstrou o padrão de ondas de mortalidade, onde os eventos de reprodução e mortalidade ocorreram ano a ano seguindo um mesmo sentido como dominós caindo. Dentro desses agrupamentos todas as manchas (populações) se apresentaram adjacentes no espaço e com distância temporal de um ano (Figura 20).

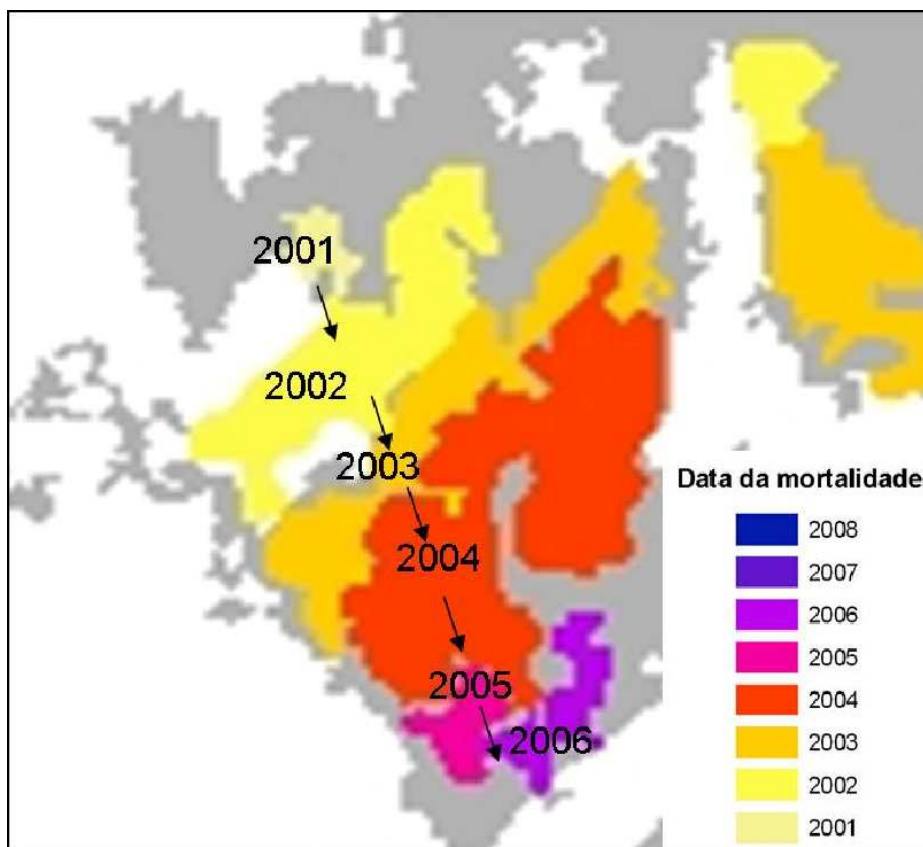


Figura 20. Onda de florescimento de bambu em um agrupamento de eventos de reprodução na região do extremo oeste do Estado do Acre.

Houve um pico de contágios de 1ª ordem nas distâncias mais curtas de um e dois anos e também nas distâncias mais longas de cinco anos. Os contágios de 2ª e 3ª ordem ocorreram independentes do tempo, todos apresentando padrões diferentes do esperado (Figura 21). Não houve uma tendência de formar ondas de mortalidade, como dominós caindo sobre a paisagem. Embora grande parte dos eventos de mortalidade estivesse adjacente no espaço, esses eventos de mortalidade não seguiram um mesmo sentido ano a ano.

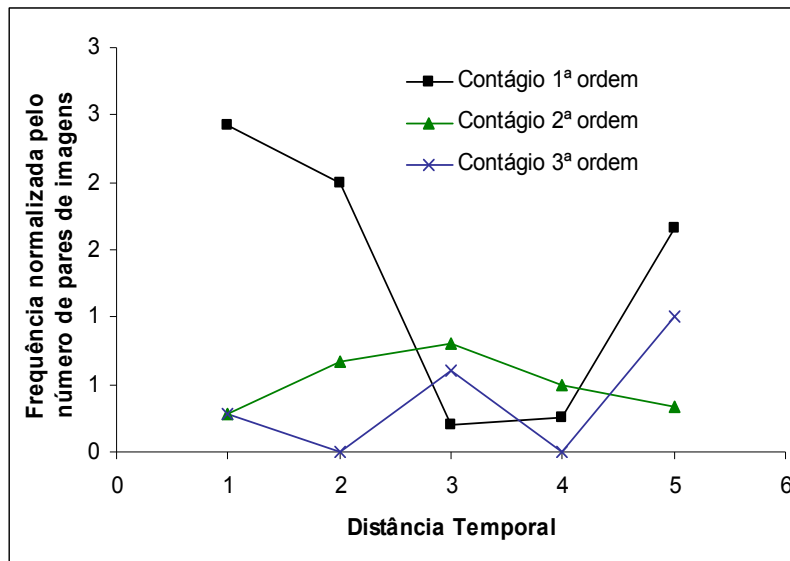


Figura 21. Frequência dos normalizada contágios de mortalidade das populações de bambu do Sudoeste da Amazônia.

Na área visitada em 2009 para validação, foi observada a presença de colmos com inflorescência em áreas vizinhas a área onde ocorreu mortalidade no ano de 2006, o que representa o início da floração nesta área adjacente (Figura 22).



Figura 22. Inflorescência em um colmo de bambu observada na região leste do Estado do Acre em Julho de 2009.

4.4 Discussão

Embora apenas um curto tempo de oito anos tenha sido analisado nas imagens MODIS, pode-se observar que os eventos de mortalidade não ocorreram de forma aleatória no espaço e no tempo, pois os mesmos se apresentaram concentrados espacialmente, onde ficou evidente um número maior de bordas de mortalidade contactadas, ou seja, adjacentes no espaço.

De acordo com Nelson *et al.* (2006), se uma população reproduz e morre hoje, há uma maior probabilidade de seus vizinhos reproduzirem e morrerem um ou dois anos antes ou depois. Esta assincronia imperfeita manifesta se, em alguns casos, como ondas de florescimento. As populações contíguas morrem em uma seqüência com estrutura temporal e espacial, tal qual uma fileira de dominós caindo. Este padrão indica que há alguma informação compartilhada entre populações vizinhas, mesmo que não ocorra troca gênica evidente.

Na Índia a floração da espécie *Bambusa arundinacea* foi observada seguindo uma mesma direção, como uma onda de florescimento onde em poucos anos se estende por toda área de ocorrência (Troup, 1921 *apud* Janzen, 1976).

Uma onda progressiva de florescimento através de toda uma área geográfica tem sido associada com a espécie *Chusquea tomentosa* na Costa Rica (Stern *et al.*, n.d. *apud* Judziewicz, 1999).

Ondas temporalmente estruturadas, mas espacialmente desorganizadas, foram documentadas para *Bambusa arnhemica*, no norte tropical úmido da Austrália (Franklin, 2004). Este último autor afirmou que as distintas populações dentro de uma onda de florescimento constituem casos incipientes de especiação alocrônica.

Segundo Zhi (2006), todos os indivíduos de uma população que crescem em vastas extensões de terra florescem em sincronia com indivíduos de outros lugares, mesmo distantes geograficamente. Um exemplo é a floração gregária de um bambu temperado, *Murielae fargesia*, que foi introduzida na Europa e nos Estados Unidos, trazido da China no início de 1800 (Palen, 2006; Oprins e Trier, 2006). As espécies floresceram e produziram sementes durante a década de 1990 em toda a Europa, EUA e China, embora as condições ambientais, pragas e incidências de doenças entre todos estes continentes fossem variadas.

A ocorrência de contágios com distância no tempo de mais de três anos pode ser explicada pela existência de espécies distintas, fato este que só pode ser confirmado com a identificação botânica de todas as populações existentes.

CONCLUSÕES GERAIS

O dossel florestal dominado por bambu em todas as diferentes fases analisadas apresentou um padrão espectral típico de vegetação verde sadia com aumento da reflectância principalmente no infravermelho próximo e também no infravermelho médio.

As bandas do infravermelho próximo (bandas 2 e 5) e médio (banda 6) do sensor Modis apresentaram maior distinção entre as diferentes idades das populações analisadas.

O EVI mostrou maior sensibilidade na discriminação das diferentes fases da vida do bambu. Enquanto o NDVI demonstrou saturação a partir de uma determinada fase.

Baseados no método indireto/inferencial podemos concluir que o ciclo de vida dos bambus (*Guadua* spp.) do Sudoeste da Amazônia tem duração de 28 anos e através da observação direta dos eventos de mortalidade podemos inferir um ciclo de vida com duração entre 27 a 28 anos.

Os eventos reprodutivos não ocorreram em ondas, onde as distintas populações reproduzem ano a ano seguindo um mesmo sentido por toda paisagem. Os eventos de cada população ocorreram em uma forma altamente contagiosa, formando super manchas de eventos temporalmente agrupados, embora não seguiram o mesmo sentido.

Referências bibliográficas

Azzini, A.; Aranha, C. e Mary, R. 1982. Florescimento e frutificação do bambu. *Bragantia*. Revista Científica do Instituto Agrônomo, Campinas. 41(18): 175-180.

Bianchini, M. C. 2005. Florestas Dominadas por Bambu (gênero *Guadua*) no Sudoeste da Amazônia: extensão, Comportamento Espectral e Associação com o Relevo. (Mestrado). *Ecologia*, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia / Universidade do Amazonas, Manaus. 75 pp.

Crusco, N. A. 2006. Sensoriamento remoto para análise multitemporal da dinâmica de áreas agrícolas. – São José dos Campos: INPE. 105 pp.

Espírito-Santo, F. D. B.; Shimabukuro, Y. E.; Kuplich, T. M. 2003. Detecção da dinâmica da floresta de bambu no sudeste do Acre com o uso de técnicas de processamento de imagens de satélite. *Anais XI SBSR*, Belo Horizonte, Brasil, 05- 10 abril 2003, INPE, p. 649-656.

Fonseca, W. N.; Koury Jr, O.; Ribeiro, A. G. e Barros-Silva, S. 1976. Vegetação. In: Folha SC. Rio Branco – Projeto Radam Brasil. Ministério da Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasil. 19(12): 315-392.

Franklin, D. C. 2004. Synchrony and asynchrony: observations and hypotheses for the flowering wave in a long-lived semelparous bamboo. *Journal of Biogeography* 31: 773 – 786 pp.

Gitelson, A.A.; Kaufman, Y.J.; Stark, R.; Rundquist, D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, v.80, p.76-87.

Governo do Estado do Acre. 2000. Zoneamento Ecológico-Econômico do Acre. Recursos Naturais e Meio Ambiente, vol. 1. Rio Branco, Ministério do Meio Ambiente/Cooperação Brasil-Alemanha/PPG-7.

Holz, C. & Veblen, T. T. 2006. Tree regeneration responses to *Chusquea montana* bamboo die-off in a subalpine *Nothofagus* forest in the southern Andes. *Journal of Vegetation Science* 17: 19-28.

Huete, A. R, Didan , K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* volume 83. p. 195–213.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) 1997. Diagnóstico Ambiental da Amazônia Legal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.

Janzen, D. H. 1976. Why bamboos wait so long to flower. Annual Reviews of Ecology and Systematic volume 7. p. 347-391.

Jensen, J. 2009. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução: Epiphany (Coord.) – São José dos Campos, SP: Parêntese. 598 pp.

Judziewicz, E.J.; Clark, L.G.; Londoño, X.; Stern, M.J. 1999. American bamboos. Washington: Smithsonian Institution Press. 392 pp.

Júnior, L. G. F.; Rocha, J. C. S.; Pontes, M, N, C.; Araújo, F. M.; 2009. Análise sazonal da qualidade e abrangência de imagens MODIS índice de vegetação para o bioma Cerrado. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, Brasil: INPE. p.1347-1362.

Justice, C.O.; Vermote, E.; Townshend, J.R.G.; Defries, R.; Roy, P.D; Hall, D.K, Salomonson, V.; Privette, J.L.; Riggs, G.; Strahler, A.; Lucht, W.; Myneni, B; Knyazikhin, Y.; Running, W.S.; Nemani, R.R.; Wan, Z.; Huete, A.R.; Leeuwen, W.V.; Wolfe, R.E.; Giglio, L.; Muller, J.P; Lewis, P.; Barnsley, M. 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(4): 1228-1247.

Keeley, J. E. & Bond, W. J. 1999 Mast flowering and semelparity in bamboos: the bamboo fire cycle hypothesis. American Naturalist, 154(3): 383 – 391.

Martins-Neto R.G. 2006. Insetos fósseis como bioindicadores em depósitos sedimentares: um estudo de caso para o Cretáceo da Bacia do Araripe (Brasil). Revista Brasileira de Zoociências volume 8: 155-183.

Myneni, R.B.; Hall, F.G.; Sellers, P.J.& Marshak, A.L. 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 33: 481-486.

Nelson, B.W. & Irmão, M.N. 1998. Fire penetration in standing Amazon forest. Proceedings Nineth Brazilian Remote Sensing Symposium, Santos, SP, Brazil, September, 1998. INPE, São José dos Campos, SP. p. 11-18,

Nelson, B. W. & Bianchini, M. C. 2005. Complete life cycle of southwest Amazon bamboos (*Guadua* spp) detected with orbital optical sensors. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia, Brasil: INPE. p.1629-1636.

Nelson, B.W.; Oliveira, A.C.; Vidalenc, D.; Smith, M.; Bianchini, M. C. & Nogueira, E.M. 2006. Florestas dominadas por bambus semi-escandentes do gênero *Guadua*, no sudoeste da Amazônia. Anais do Seminário Nacional de Bambu. Brasília. p. 49-55.

Olivier, J.; Otto, T.; Roddaz, M.; Antoine, P.; Londoño, X. & Clark, L. G. 2009. First macrofossil evidence of a pre-Holocene thorny bamboo cf. *Guadua*

(Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae: Guaduinae) in south-western Amazonia (Madre de Dios — Peru). *Review of Palaeobotany and Palynology*. Elsevier Scientific Publications. 153: 1-7.

Ponzoni, F.J. 2001. Comportamento espectral da vegetação. In: Meneses, P.R.; Netto, J.S.M. (ed) *Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília: UNB. cap.5, p.157-202.

Ponzoni, F. J. e Shimabukuro Y. E. 2007. *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. Editora Parêntese. 144 pp.

Prance, G.T. 1989. American Tropical Forest. Tropical Rain Forest Ecosystem, Biogeographical and ecological studies, Ecosystem of the world 14B, Tropical forest ecosystem (Ed by H. Lieth & M.J.A. Werger), New York, Elsevier Scientific Publications. p.99-132.

Ribeiro, B. M. G.; Saito, E. A.; Korting, T. S.; Maeda, E. D.; Formaggio, A. R. 2009. Estudo da variância em imagens MODIS para diferentes classes de coberturas dos solos: estudo de caso em Querência – MT. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, Brasil: INPE. p. 1005-1012.

Silveira, M. 2001. *A Floresta Aberta com Bambu no Sudoeste da Amazônia: Padrões e Processos em Múltiplas Escalas*. (Doutorado). Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília.121 pp.

Steffen, C. A.& Moraes, E. C. 1993. Tutorial de radiometria. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento remoto*. Curitiba. Anais... Curitiba: Sociedade Latino-Americana de Sensoriamento Remoto/INPE. 7: 2-12.

Smith, M. 2000. Efeito de perturbações sobre a abundância, biomassa e arquitetura de *Guadua weberbaueri* Pilg. (Poaceae - Bambusoideae) em uma floresta dominada por bambu no Sudoeste da Amazônia. *Dissertação de mestrado*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Fundação Universidade do Amazonas. Manaus, Amazonas. 79pp.

Sombroek, W, 2001. Spatial and Temporal Patterns of Amazon Rainfall: Consequences for the Planning of Agricultural Occupation and the Protection of Primary Forests. *Ambio*, 30(7): 388-396.

Valeriano, M.M. 2003. Reflectância espectral de culturas agrícolas anuais (I): espectralradiometria. *Espaço e Geografia*. 6(1): 7-27.

Veloso, H.P. Rangel-Filho, A.L.R. & Lima, J.C.A. 1991. *Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Rio de Janeiro.

Van Leeuwen, W. J. D.; Huete, A. R.; Laing, T. W. 1999. MODIS vegetation index compositing approach: A prototype with AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*. 69(3): 264-280.

Wolfe, R.E. 2006. 4. Modis Geolocation, In: John J. Qu, Wei Gao, Menas Kafatos, Robert E. Murphy and Vincent V. Salomonson (eds.) *Earth Science Satellite Remote Sensing*, Vol. 1: Science and Instruments. Springer Berlin Heidelberg. P. 50-73.

Zhi, D. K. 2006. Flowering in bamboo: An enigma! *Cey. J. Sci. (Bio. Sci.)*. 35 (2):95-105.