INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

DISTRIBUIÇÃO E INTENSIDADE DE DERRUBADAS DE FLORESTA CAUSADAS POR VENTO NA AMAZÔNIA EM JANEIRO DE 2005

Raquel Fernandes de Araujo

Manaus, Amazonas

Março, 2013

Raquel Fernandes de Araujo

DISTRIBUIÇÃO E INTENSIDADE DE DERRUBADAS DE FLORESTA CAUSADAS POR VENTO NA AMAZÔNIA EM JANEIRO DE 2005

Orientador: Bruce Walker Nelson

Co-Orientador: Jeffrey Quintin Chambers

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

Manaus, Amazonas

Março, 2013

Araujo, Raquel Fernandes
Distribuição e intensidade de derrubadas de floresta causadas por vento na Amazônia em janeiro de 2005 / Raquel Fernandes de Araujo. ---
Manaus : [s. n.], 2013.

Dissertação (mestrado) --- INPA, Manaus, 2013
Orientador : Bruce Walker Nelson
Co-orientador : Jeffrey Quintin Chambers
Área de concentração :Fitogeografia da Amazônia

1. Mortalidade – Amazônia. 2. Distúrbios naturais. 3. Blowdown.
4. Tempestades convectivas. I. Título.

Sinopse

A área de dano e a mortalidade, provocadas por tempestades convectivas ocorridas no ano de 2005, foram estimadas para uma porção de floresta da região amazônica.

Dedico

A todos que contribuíram para o planejamento e realização deste projeto.

Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais (PPGCFT), pela seriedade no desenvolvimento da pesquisa, pela infraestrutura e corpo de pesquisadores e funcionários.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela bolsa de pesquisa.

Aos meus pais Neuza Fernandes e Cloves Alberto, por todo carinho, apoio e compreensão. À minha irmã Ana, amor da minha vida.

À minha madrinha e ao Xú, por tantos dias especiais. A toda minha família, por ser meu porto seguro, por ser a energia que preciso pra recarregar as baterias.

Ao Bruce Nelson, por ser o melhor orientador.

Ao meu co-orientador Jeffrey Chambers, pelas ideias e incentivo.

Aos pesquisadores Niro Higuchi e Paulo Graça, pelas oportunidades, ensino e colaboração.

À Julia Valentim, amiga de todas as horas, luz do meu caminho.

Ao meu querido Carlos Henrique Celes, por todo companheirismo, carinho e aprendizado.

Aos amigos Ana, Laynara, Flávia, Peter, Zanatta, Thelminha, Suíço, Jú, Henrique, Carol, Lívia Granadeiro, Lívia Naman, Fê Coelho, Tati, Giga, Tapioca, Clarissa, Gazela, Bruno, Márcio, Daneti, PH, Trupico, Maíra, Mateus, Raoni, Felipe, Jonas, por fazerem da minha estadia em Manaus tão divertida.

Aos amigos de Brasília, por estarem sempre presentes.

Aos pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela atenção e aprendizado.

Ao INPE e ao United States Geological Service (USGS) pelo fornecimento de imagens Landsat.

À Instituição Carnegie de Washington pelo uso de CLASLite, um aplicativo desenvolvido com o apoio das Fundações Gordon & Betty Moore e John D. & Catherine T. MacArthur.

Sumário

Lista de Figuras ..... **vii**
Lista de Tabelas ..... **viii**
Resumo **9**
Abstract **10**
1. Introdução **11**
2. Objetivo Geral **14**
2.1. Objetivos Específicos 15
3. Material e Métodos **15**
3.1. Área de Estudo 15
3.2. Coleta e processamento de dados 17
3.3. Análise de Dados 20
4. Resultados e Discussão **22**
4.1. Distribuição espacial e mortalidade 22
4.2. Comparação entre os métodos PV e ΔNPV 27
4.3. *Blowdowns* verificados em campo 30
5. Considerações finais **31**
6. Referências Bibliográficas **32**

Lista de Figuras

Figura 1. Localização dos centroides das 30 áreas de 15 mil km^2 de floresta analisadas (pontos pretos). A linha preta espessa corresponde à área de 4,6 x 10^6 km^2 afetada pela linha de instabilidade de janeiro de 2005.

Figura 2. Localização dos *blowdowns* com geometria difusa visitados em campo.

Figura 3. *Blowdown* da rodovia AM-010. (a) Imagem Landsat TM5, composição colorida RGB 543, projeção UTM 21S. (b) Árvores caídas observadas no local

Figura 4. O limiar PV≤ 85% foi escolhido por selecionar uma área de dano similar àquela encontrada por Negrón-Juárez *et al.* (2010) na imagem de Manaus.

Figura 5. Dano florestal (%) ocasionado pelos *blowdowns* com área ≥ 3 ha do grupo A (a) e dos grupos A e B juntos (b). A área de trânsito da linha de instabilidade de janeiro de 2005 é delimitada pelo polígono maior.

Figura 6. Relação linear entre PV obtida por mistura espectral da imagem Landsat TM5 231/062 de 29 de julho de 2005 e a mortalidade (%) medida em campo.

Figura 7. Distribuição de resíduos em porcentagem.

Figura 8. Mortalidade (% das árvores) atribuída a todos os tipos de *blowdowns* ≥ 3 ha.

Figura 9. Número de árvores mortas para cada 100 hectares de floresta.

Figura 10. Regressão entre *pixels* de PV (CLASlite, *endmembers* flexíveis, sem sombra) e ΔNPV (*endmembers* fixos, incluindo sombra) coletados nos *footprints* de *blowdowns* da imagem de Manaus.

Figura 11. Histogramas circulares dos azimutes de queda das árvores dos *blowdowns*. (A) *Blowdown* da EEST/INPA com azimutes coletados de 100 árvores; (B) *Blowdown* da AM-010 com 55 azimutes coletados; (C) *Blowdown* do km 85 da BR-174 com 71 azimutes; (D) *Blowdown* do km 95 da BR-174 com 61 registros de azimutes.

Lista de Tabelas

Tabela 1. Área de dano dentro das 30 amostras para os *blowdowns* com área ≥ 3 ha dos grupos A, B e C ocorridos em 2005 em hectares (ha) e suas respectivas porcentagens.

Tabela 2. Testes de normalidade para os dados de entrada da regressão.

Resumo

Um grande número de distúrbios causados por vento (*blowdowns*) ocorreu na Amazônia em janeiro de 2005, quando uma linha de instabilidade sentido sudoeste-nordeste percorreu 4,6 milhões de km^2 de floresta. O presente trabalho descreve a distribuição espacial de dano florestal e a mortalidade de árvores causadas por esse evento, considerando distúrbios maiores que ~3 ha. Em imagens Landsat, *blowdowns* associados com a linha de instabilidade de janeiro de 2005 exibiram uma geometria distinta. Eles podem ser difusos ou ter lineamentos no sentido sudoeste-nordeste. Trinta amostras de ~15.000 km^2 de floresta contínua foram alocadas ao longo da região de passagem da linha de instabilidade. Essas foram inspecionadas visualmente em uma escala de 1:80.000 em composições coloridas RGB 543 de imagens Landsat TM da estação seca de 2005. Todos os *blowdowns* com idades menores que ~1 ano e tamanho maior que 3 ha foram reconhecidos pelo padrão espectral e geometria. Depois de realizado um modelo linear de mistura espectral usando o *software CLASlite*, os *pixels* de dano foram classificados como *blowdowns* por meio de um limiar de fração de vegetação pura (PV) menor ou igual a 85%. Os *pixels* de dano foram somados para cada amostra de ~15 mil km^2. A porcentagem de floresta danificada e atribuída à linha de instabilidade de janeiro de 2005 foi então interpolada entre os centróides das 30 amostras. A mortalidade foi estimada para a área de estudo com base em dados de campo. Também com verificação em campo, foi possível observar que os *blowdowns* atribuídos nas imagens como difusos foram causados pela linha de instabilidade de janeiro de 2005. O dano atribuído a essa linha de instabilidade esteve concentrado na região da Amazônia Central. No entanto, esse contribuiu com mais da metade da área afetada nas 30 amostras analisadas para a Amazônia naquele ano. O número de árvores mortas para a área de floresta por onde passou a linha de instabilidade foi de ~11 milhões. A maior mortalidade ocorreu na cena de Manaus, com ~440 mil árvores mortas. Se a cena de Manaus fosse tirada da amostragem, haveria uma grande diferença na estimativa total de dano.

Palavras-chave: Amazônia, mortalidade, distúrbios naturais, *blowdown*, tempestades convectivas.

Abstract

A large number of blowdowns occurred in Amazonia in mid-January of 2005 when a squall line traversed 4.6 million km^2 of forest, propagating from SW to NE. This paper describes the spatial distribution of blowdown forest damage and tree mortality across Amazonia attributed to that event, considering disturbance patches > ~3 ha in size. In Landsat images, blowdowns associated with the January 2005 squall line exhibit a distinct geometry. They are either diffuse or have SW to NE directed lineaments. Thirty sample polygons were allocated across the Amazon region, each containing 15,000 km^2 of continuous forest. These were visually inspected at 1:80,000 scale in Landsat TM RGB images (bands 5-4-3) from the 2005 dry season. All blowdown footprints <~1y old and >~3 ha were recognized by spectral pattern and geometry. After linear spectral unmixing with CLASLite, the disturbed pixels were identified within each blowdown by a threshold of the pure vegetation fraction (≤85%) then summed within each 15,000 km^2 sample. The percent of forest damaged and attributed to this single squall line was then interpolated between the 30 sample centroids. Based on field dates, the mortality was estimate to the study area. As verified by field visits, diffuse blowdowns observed on Landsat images were caused by January 2005 squall line. Damage was found to be highly concentrated near Central Amazonia, not widespread. Nonetheless, blowdowns attributed to this single squall line contributed over half of all annual blowdown area detected in 30 samples across Amazonia for that year. The total number of dead trees in squall line forest area was ~11 million trees. The major mortality occurred at Manaus region, with ~440,000 dead trees. Leaving a single Landsat scene out of the sample would cause a large difference in the estimate of total damage.

Keywords: Amazonia, mortality, natural disturbances, blowdown, convective storms.

1. Introdução

Blowdowns são descritos como perturbações naturais causadas por tempestades de vento convectivas associadas com linhas de instabilidade, que atravessam a região Amazônica geralmente no sentido leste para oeste (Garstang *et al*., 1998). Nelson *et al*. (1994) descreveram e quantificaram pela primeira vez a ocorrência desse fenômeno na Amazônia brasileira utilizando imagens do satélite Landsat 5, sensor TM. Os *blowdowns* são reconhecidos pelo formato de leque e padrão espectral típico de vegetação não-fotossintetizante quando recentes e padrão espectral típico de floresta secundária quando esta oculta as árvores caídas. O encobrimento ocorre após ~1 ano (Negrón-Juárez *et al.*, 2011).

Segundo Nelson *et al*. (1994), os *blowdowns* na Amazônia são maiores e mais frequentes em uma faixa norte-sul que se estende da Venezuela até os estados do Acre e Rondônia no Brasil. Com a análise de 27 imagens Landsat ETM+ da região Amazônica, no período de 1999 a 2001, Espírito-Santo *et al.* (2010) também verificaram que a ocorrência de *blowdowns* não é uniforme. Muitos agrupamentos foram detectados na porção oeste da Amazônia (58°00′W e 66°49′W) enquanto que na porção oriental (51°51′W a 58°00′W) foram infrequentes. Foram mapeadas 279 manchas de perturbação por vento > 5 ha, totalizando uma área de 21.931 ha. A maior mancha apresentou 2.223 ha.

O dano florestal é provocado por uma forte corrente de ar descendente que induz uma explosão de ventos fortes no chão ou próximo a ele. Esse fenômeno, chamado de *downburst*, é dividido em dois tipos conforme a extensão do dano: *microburst* e *macroburst*. Foi descrito pela primeira vez por (Fujita, 1985). O ar descendente é semelhante a um jato de água de mangueira de jardim que atinge o chão e se espalha. O espalhamento é radial se o jato de água é orientado perpendicularmente ao chão. O espalhamento tem a forma de um leque se o jato de água atinge o chão de forma oblíqua. De acordo com Nelson & Amaral (1994), *blowdowns* ou *downbursts* são associados com altas nuvens *Cumulus nimbus* que produzem uma precipitação que passa através do ar seco subjacente. A precipitação então evapora, esfriando o ar que se torna mais denso e promove um movimento descendente da coluna de ar circundante.

A distribuição geográfica das perturbações por *downbursts* ao longo da bacia Amazônica se dá pela organização de nuvens *Cumulus nimbus* convectivas em linhas de instabilidade, ou *squall lines* (Cohen, 1989, Garstang *et al*., 1998 e Nelson & Amaral, 1994). Segundo Cohen (1989) e Garstang *et al.* (1998), as linhas de instabilidade são geradas durante o dia na costa nordeste brasileira e das Guianas. Os ventos alísios as deslocam pela bacia

Amazônica em cerca de 48 horas. A convecção alcança seu primeiro máximo em intensidade no período da tarde de sua formação. Ao cruzar o estado do Pará durante a noite, o ar resfria e perde intensidade, atingindo seu segundo pico na tarde do segundo dia, quando as linhas de instabilidade passam pela parte central e ocidental da Amazônia (Nelson & Amaral, 1994).

Segundo Negrón-Juárez *et al*. (2010), nos dias 16 a 18 de janeiro de 2005, uma linha de instabilidade (*squall line*) atípica propagou do sudoeste para o nordeste da Amazônia, afetando uma área de 4,6 x 10^6 km^2 de floresta. A linha de instabilidade provocou velocidades de vento de 26 a 41 $m.s^{-1}$. O distúrbio produzido dentro dos 13.400 km^2 de floresta, observada na imagem Landsat de Manaus (órbita-ponto 231/062), abrangeu uma área de 2.668 ha e causou a morte de 320±0,05 mil árvores.

As manchas de dano observadas em imagens Landsat da região de Manaus, obtidas na estação seca de 2005, exibiram um padrão geométrico difuso ou com poucos lineamentos orientados SO/NE. Linhas de instabilidade que se propagam de SO para NE são raros na Amazônia (Negrón-Juárez *et al.*, 2010). O formato difuso é também raro em outros anos. Esta assinatura geométrica é diferente dos *blowdowns* associados com linhas de instabilidade que propagam de leste para oeste, que possuem forma predominante de leque (Nelson *et al.*, 1994; Espirito-Santo *et al.*, 2010).

No campo, sítios de *blowdowns* recentes apresentam as árvores caídas em aproximadamente uma mesma direção, seguindo os lineamentos observados nas imagens (Nelson & Amaral, 1994). Segundo Marra (2010), a densidade (442,6 ± 46,5 $ind.ha^{-1}$) e a área basal (17,6 ± 3,2 $m^2.ha^{-1}$) de árvores maiores que 10 cm de DAP, em uma floresta perturbada por uma tempestade convectiva cinco anos após o distúrbio, foram inferiores às encontradas para uma floresta não perturbada (584,3 ± 25,9 $ind.ha^{-1}$ e 27,4 ± 1,8 $m^2.ha^{-1}$, respectivamente). Porém, a distribuição diamétrica da comunidade arbórea da floresta perturbada não difere da distribuição diamétrica da floresta não-perturbada (teste χ 2: p= 0,983), o que indica que a tempestade matou árvores de todas as classes de tamanho.

Com o monitoramento durante um ano de uma floresta não perturbada da Estação Experimental de Silvicultura Tropical (EEST/INPA), Fontes (2012) concluiu que as tempestades (chuva + vento) foram a principal causa de morte arbórea, responsável por 45% das mortes dos indivíduos analisados. No trabalho de Toledo *et al.* (2012), foram medidos 72 ha de floresta ao longo de cinco anos na Reserva Ducke, Manaus. Árvores com diâmetro menor que 22 cm morreram predominantemente em pé, enquanto que árvores com diâmetro maior que esse valor morreram principalmente por quebra ou desenraizamento. A competição

foi a maior causa de mortalidade para as árvores de tamanho pequeno a intermediário, enquanto distúrbios exógenos e senescência predominam para árvores de tamanho intermediário a grande.

Para estimar o impacto na taxa de mortalidade pela seca de 2005 na Amazônia, Philips *et al.* (2009) conduziram um trabalho de remedição de 55 parcelas distribuídas ao longo da região amazônica. Houve redução do acúmulo de biomassa acima do solo, incluindo parcelas localizadas na região da Amazônia Central. No entanto, Marengo *et al.* (2008), afirmam que a seca de 2005 não atingiu a parte central e oriental da Amazônia.

A seca foi causada pelo aquecimento da superfície do Atlântico Norte, tendo o pico de intensidade durante a estação seca e o centro do impacto no sudoeste da Amazônia. As regiões centrais e orientais, no entanto, sofrem secas provocadas pelo El Niño (Saatchi *et al.*, 2013). Negrón-Juárez *et al*. (2010) afirmam que a alta mortalidade observada no ano de 2005, principalmente na porção central e oriental da Amazônia deve estar associada às perturbações causadas pela linha de instabilidade de janeiro daquele ano.

Segundo Fisher *et al.* (2008), parte da mortalidade na floresta amazônica ocorre de forma agrupada no espaço, como dentro de *blowdowns*, por exemplo. Este tipo de mortalidade tem baixa probabilidade de ser detectada dentro de poucas parcelas permanentes estudadas por poucos anos. Chambers *et al.* (2013) estimam que parcelas maiores que 10 ha seriam amostras mais adequadas para detecção de distúrbios provocados por vento, que variam desde grupos isolados de árvores caídas até alguns milhares de hectares. Distúrbios menores que um hectare são muito mais frequentes e os de 4 a 10 ha são raros na Amazônia Central.

Perturbações convectivas ocorrem, na maioria das vezes, em locais em que o acesso não é fácil. Pela dificuldade do estudo em campo de uma quantidade maior de eventos de *blowdown*, o uso do sensoriamento remoto se torna uma ferramenta adequada para atingir essa finalidade. Negrón-Juárez *et al*., (2010, 2011) utilizaram o modelo de mistura espectral para identificação e classificação de *blowdowns.*

A mistura espectral é a resposta espectral de um *pixel* da imagem que é resultante da combinação da resposta espectral dos componentes que formam este pixel mais a interferência da atmosfera. Com a aplicação de algoritmos disponíveis em *softwares* de processamento de imagens, são obtidas imagens fração que representam as proporções dos componentes na mistura espectral. A estimação correta das proporções dos *pixels* é feita por meio da assinatura espectral dos elementos considerados componentes da mistura, sendo essa assinatura obtida com o valor de *pixels* considerados puros (Ponzoni & Shimabukuro, 2007).

As curvas espectrais são obtidas em bibliotecas externas ou na própria imagem, através de *pixels* puros (Ponzoni & Shimabukuro, 2007). No trabalho de Negrón-Juárez *et al*., (2010), foi utilizado um modelo linear de mistura espectral que extrai da própria imagem um único espectro para cada um dos *endmembers* puros: sombra, folha sadia, solo e NPV (vegetação não-fotossintetizante, que corresponde a folhas mortas, galhos e troncos secos). A variação da fração componente NPV de imagens de pré e pós-distúrbio foi empregada para identificação de *blowdowns* (Negrón-Juárez *et al*., 2010, 2011).

O *software* CLASlite (Asner *et al.*, 2009) executa um outro tipo de modelo de mistura linear, que produz imagens fração de vegetação pura (PV), vegetação não-fotossintetizante (NPV) e solo (S). A sombra não é incluída. Cada imagem fração é gerada *pixel* a *pixel*, pela escolha do melhor conjunto dos três *endmembers* puros, provenientes de uma biblioteca espectral. O Carnegie Landsat Analysis System (CLAS) foi desenvolvido originalmente como um sistema de mapeamento em larga escala de distúrbios florestais, incluindo corte seletivo de madeira (Asner *et al*., 2009).

2. Objetivo Geral

Estimar a abrangência do dano florestal causado por tempestade convectiva ocorrida em janeiro de 2005 na Amazônia, verificando onde e o quanto de árvores foram mortas por esse evento.

2.1. Objetivos Específicos

- Verificar se a área de dano provocada por *blowdowns* do tipo difuso está homogeneamente distribuída na região amazônica.
- Determinar se a linha de instabilidade de janeiro de 2005 foi a causa predominante de todos os *blowdowns* maiores que 3 ha ocorridos naquele ano.
- Estimar a mortalidade provocada por todos os *blowdowns* maiores que 3 ha ocorridos em 2005 na área de passagem da linha de instabilidade.
- Verificar em campo se alguns *blowdowns* com geometria difusa foram causados pela linha de instabilidade de janeiro de 2005.

3. Material e Métodos

3.1. Área de Estudo

Dentro da área de 4,6 x 10^6 km^2, transitada pela linha de instabilidade em janeiro de 2005 (Negrón-Juárez *et al*., 2010), foram selecionadas 30 amostras de aproximadamente 15 mil km^2 de floresta contínua (Figura 1). Na delimitação das amostras foram excluídas áreas antropizadas e áreas de várzeas extensas, essas identificadas com uma máscara de áreas alagadas da Amazônia Central (Hess *et al*., 2012, http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1049).

A vegetação predominante da área analisada é a Floresta Ombrófila Densa. Sua característica está relacionada aos fatores climáticos tropicais de elevadas temperaturas (médias de 25°C) e de alta precipitação bem distribuída durante o ano (de 0 a 5 meses com menos de 100 mm; Sombroek, 2001). Dominam nos ambientes desta floresta os solos do tipo Latossolo (IBGE, 1992).

Cinco *blowdowns* identificados como difusos em imagens Landsat de 2005 foram visitados em campo para verificar se os mesmos foram causados pela linha de instabilidade de janeiro de 2005 (Figura 2). O primeiro *blowdown* visitado está localizado na Estação Experimental de Silvicultura Tropical do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (EEST/INPA), a 43 km da entrada do ramal da ZF-2, que se encontra no km 50 da BR-174. Os outros quatro *blowdowns* estão localizados no km 112 da rodovia AM-010 (Figura 3), nos kms 85 e 95 da rodovia BR-174, e no km 53 da AM-352 (estrada para Novo Airão).

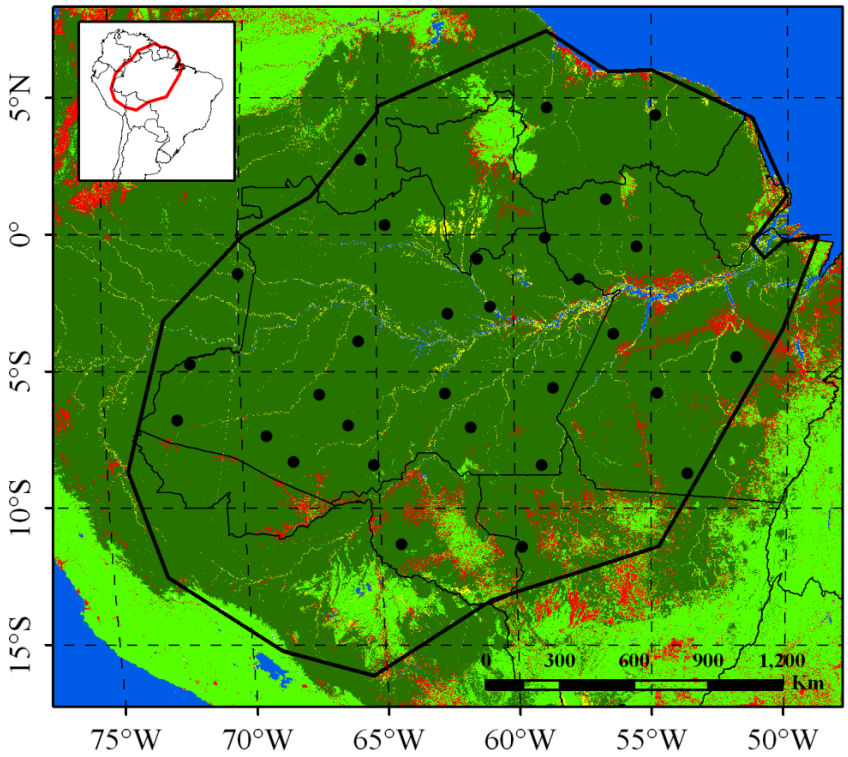

Figura 3. Localização dos centróides das 30 áreas de 15 mil km^2 de floresta analisadas (pontos pretos). A linha preta espessa corresponde à área de 4,6 x 10^6 km^2 afetada pela linha de instabilidade de janeiro de 2005.

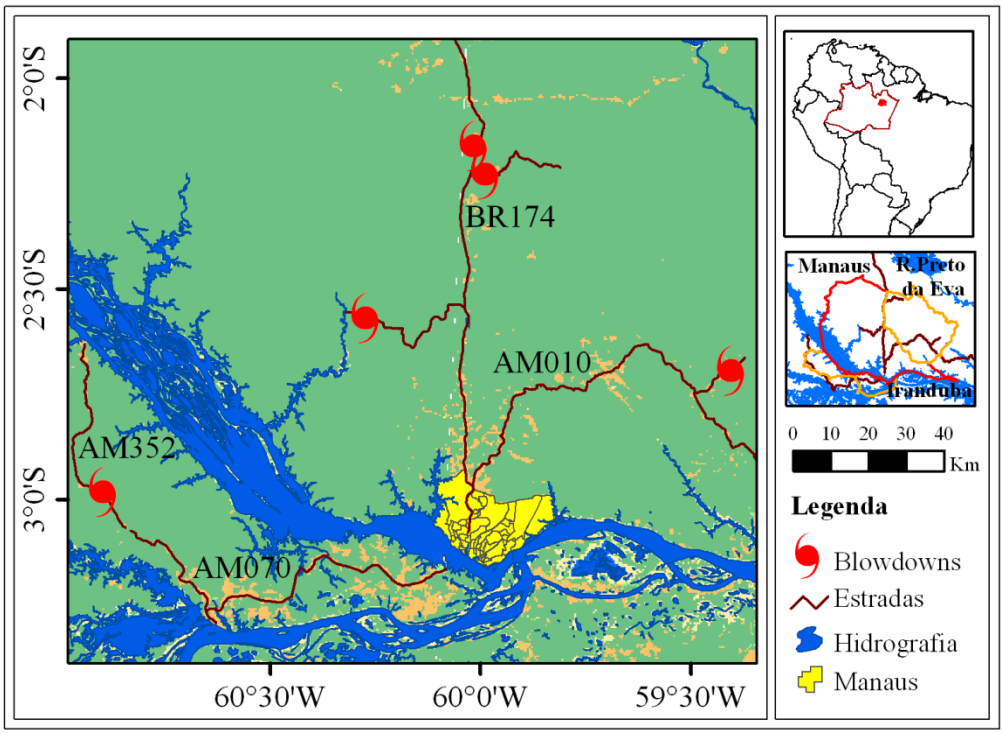

Figura 4. Localização dos *blowdowns* com geometria difusa visitados em campo.

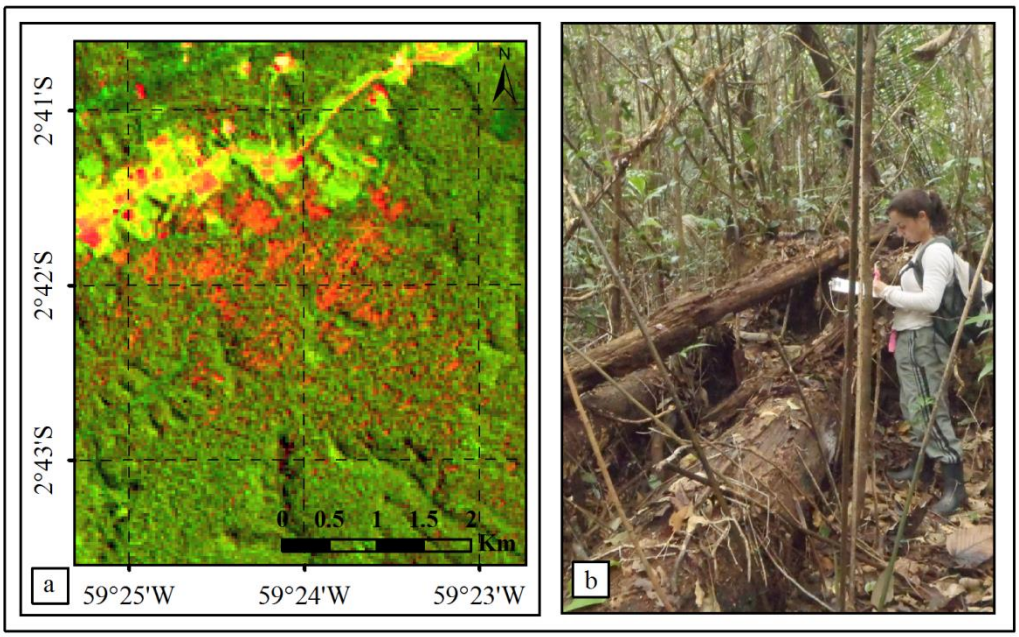

Figura 3. *Blowdown* localizado em ramal no km 112 da rodovia AM-010. (a) Imagem Landsat TM5, composição colorida RGB 543, projeção UTM 21S. (b) Árvores caídas observadas em campo.

3.2. Coleta e processamento de dados

Os *blowdowns* ocorridos durante o ano de 2005 foram identificados em 30 imagens Landsat e classificados visualmente quanto a seu padrão geométrico e orientação do vento. A área de dano de cada *blowdown* foi posteriormente calculada. Uma inspeção de campo em *blowdowns* próximos a Manaus foi feita para verificar se o padrão geométrico e orientação do vento observados nas imagens coincidiam com os verificados em campo.

As cenas Landsat TM5 do ano de 2005 selecionadas foram adquiridas do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS GLOVIS) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para cada imagem foi feita uma composição colorida RGB 543 com ampliação linear de contraste. Os polígonos de aproximadamente 15 mil km^2 de floresta foram delimitados e sobre eles foi plotada uma grade de 10 x 10 km.

Em cada polígono foi feita uma inspeção visual, analisando cada quadrado da grade em uma escala de 1:80.000. Os *blowdowns* que ocorreram nos 12 meses anteriores à data de cada imagem de 2005 foram reconhecidos pelo seu padrão espectral e pela sua forma geométrica. A coloração vermelha ou magenta na composição RGB 543 indica um *blowdown* com até 1 ano de idade (Negrón-Juárez *et al*., 2011). Foram considerados apenas os *blowdowns* que incluem pelo menos 33 *pixels* de dano (>~3 ha) dentro de cada *footprint*. Isto inclui *pixels* de dano isolados e aglomerados.

.Cada *blowdown* contendo pelo menos 33 *pixels* de dano foi circunscrito por um polígono em um arquivo *shapefile* contendo na sua tabela seis classes de padrão geométrico dos *blowdowns*. São elas: (1) em leque com lineamentos que não são provenientes do sudoeste (LEQUE); (2) em leque com lineamentos que são provenientes do sudoeste (LEQUE_SO); (3) difusos, não possuindo lineamentos (DIFUSO); (4) com lineamentos provenientes do sudoeste ou nordeste (LINEAMENTOS_SO_NE); (5) com lineamentos provenientes de outras direções (LINEAMENTOS_NAO_SO); e (6) indefinidos, com tamanhos pequenos, não sendo possível definir seu padrão geométrico (INDEFINIDOS).

As imagens Landsat TM5 foram corrigidas atmosfericamente pelo modelo 6S e convertidas para reflectância utilizando o *software* CLASlite v.2 (Asner *et al*., 2009). No mesmo *software* foi feito o modelo de mistura linear, obtendo imagens fração de solo (S), de vegetação pura (PV) e de vegetação não-fotossintetizante (NPV: folhas mortas, galhos e troncos secos). Para a seleção dos *pixels* de dano dentro do polígono que circunscreve cada *blowdown*, foi empregado o argumento booleano, PV ≤ X% E S ≤ 5%. O valor de X variou entre 83% e 85%, ajustado visualmente em cada imagem para selecionar todos os *pixels* (dentro do polígono do *footprint*) com dano evidente em composição RGB das bandas 5-4-3 e ao mesmo tempo, minimizar os erros de inclusão.

O limiar ≤ 5 para a fração solo serve como máscara de nuvens, pois a tonalidade clara das nuvens em todas as bandas é interpretada como alta fração de solo. As sombras profundas de nuvens foram eliminadas pelo fato de terem sempre PV > 85%. Em áreas sem nuvens, as frações de solo e NPV são afetadas pela variação na iluminação associada com a topografia. A fração vegetação não inclui este artefato, sendo, portanto, escolhida para detectar os *pixels* de dano.

A partir da imagem booleana resultante, foram calculadas as áreas de dano para cada *blowdown.* O limiar da fração de vegetação foi escolhido para tornar este método comparável com aquele empregado por Negrón-Juárez *et al.* (2010). Esta calibração foi realizada na imagem de Manaus de 29 de julho de 2005, onde o limiar de <85% de vegetação pura isolou uma área similar aos 2.668 ha de dano identificados na mesma imagem no trabalho de Negrón-Juárez *et al.* (2010) (Figura 4).

Os *blowdowns* com padrão geométrico DIFUSO foram atribuídos à linha de instabilidade de janeiro de 2005 em uma estimativa conservadora (Grupo A). Os *blowdowns* das classes LEQUE_SO, LINEAMENTOS_SO_NE e INDEFINIDOS foram atribuídos à

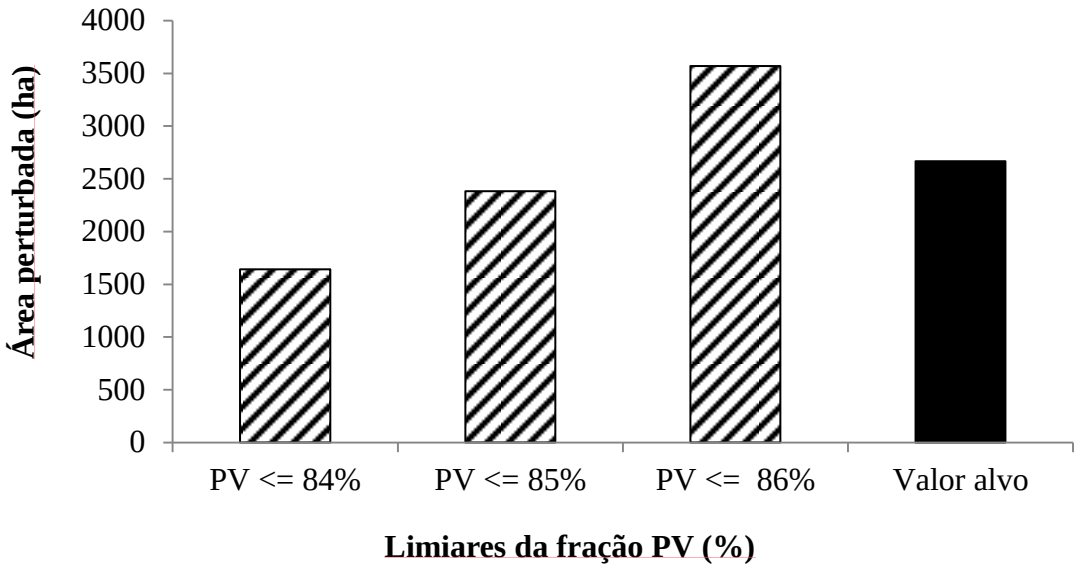

Figura 4. Valores de limiares de fração de pura vegetação (PV) utilizados para selecionar uma área de dano similar àquela encontrada por Negrón-Juárez *et al.* (2010) na imagem de Manaus.

linha de instabilidade de janeiro de 2005 em uma estimativa mais abrangente (Grupo B), pois estes podem ser também causados por ventos provenientes do sudoeste. As classes LEQUE e LINEAMENTOS_NAO_SO foram atribuídas a outros ventos que ocorreram em 2005 (Grupo C).

Os cinco *blowdowns* escolhidos para verificação de campo foram visitados nos dias 25 e 26 de setembro e nos dias 15 a 18 de outubro de 2012. O procedimento de campo consistiu em aferir com bússola o azimute das árvores caídas encontradas ao longo de caminhamentos feitos pelos *blowdowns*. Dessa forma, foi possível verificar se o sentido de queda as árvores do *blowdown* foi o mesmo da linha de instabilidade de janeiro de 2005.

A medição do azimute foi feita em árvores desenraizadas, espaçadas umas das outras. Quando havia um grupo de árvores caídas, o azimute era coletado de apenas uma delas, para evitar o erro de árvores que foram derrubadas por outras árvores e não por ação direta do vento. Os azimutes das árvores foram anotados e a localização das árvores foi aferida com GPS de navegação Garmin 62s. A coleta de dados do *blowdown* localizado na estrada para Novo Airão não pôde ser realizada, pois a área está sendo alvo de extração ilegal de madeira. Dessa forma não foi possível distinguir o que foi derrubado pelo vento ou pela exploração madeireira.

3.3. Análise de Dados

A porcentagem de dano causada pelos *blowdowns* em cada amostra de 15.000 km^2 de floresta foi calculada para cada grupo, A, B e C. Esta porcentagem foi atribuída ao centróide de cada amostra. Foram geradas duas superfícies interpoladas (uma para o grupo A e outra para o grupo A+B) do atributo "porcentagem de floresta que sofreu dano pela linha de instabilidade de janeiro de 2005". Os valores dos *pixels* foram interpolados usando a média ponderada pelo inverso do peso da distância ao quadrado (IDW). A interpolação, com resolução de 1000 m, incluiu até 12 centróides mais próximos de cada *pixel* estimado dentro de um raio de influência de 1.000 km.

Dados de mortalidade foram coletados por Guimarães (2007) no *blowdown* da EEST/INPA, logo após a ocorrência do distúrbio em 2005. Ele instalou 30 parcelas de 20 x 20m em cinco sítios diferentes, cada um contendo seis parcelas. Esses dados de campo, recoletados por Negrón-Juárez *et al.* (2010), foram comparados, em uma regressão linear, com os valores de vegetação pura (PV) obtidos no presente trabalho na imagem de julho de 2005, na mesma posição geográfica de cada sítio, fornecida por Guimarães (2007). A regressão foi feita no *software* Systat 12.

Para alimentar a regressão, os valores de PV foram extraídos dos *pixels* nos quais foram alocadas as parcelas das medições em campo (cena Landsat TM5 231/062). Parte do erro do GPS incluído durante a alocação das parcelas em campo foi retirado, interpolando pelo método bilinear, os valores de PV extraídos da imagem. Mesmo assim, permanecem erros de GPS, de georreferenciamento do Landsat (RMS = 0,5 *pixels*), dos efeitos da reamostragem bicúbica dos valores dos *pixels* originais durante o georreferenciamento pela USGS e efeitos da posição do centro de cada inventário de 20 x 20 m em relação ao centro de cada *pixel* original do sensor, antes dessa reamostragem.

Os sítios 1 e 2 de Guimarães (2007) estavam alocados embaixo da sombra de uma bruma presente na imagem. Para evitar a possível interferência da sombra nos valores de PV, os valores de mortalidade desses sítios foram retirados da regressão. Dos 18 valores de mortalidade restantes, foi retirado o valor de uma das parcelas do sítio 5 pois esse apresentava um alto resíduo. A regressão linear foi feita portanto, com 17 valores de mortalidade coletados em campo. Foram feitos testes para comprovar a normalidade dos dados.

A equação de mortalidade gerada na regressão linear foi aplicada nas imagens fração de pura vegetação (PV), obtendo-se o valor de mortalidade em porcentagem para cada *pixel* dos *footprints* em cada uma das 30 imagens. Um valor médio de densidade de árvores por

hectare em toda Amazônia, foi calculado com base no trabalho de Lewis *et al*. (2004). Usando esta densidade média, foi possível obter o número de árvores mortas pelos eventos de *blowdown* em cada amostra analisada. Esses dados foram divididos pelo número total de árvores presentes na área de floresta de cada amostra, obtendo-se assim a mortalidade em porcentagem para cada uma das 30 amostras.

A área de floresta de cada amostra foi obtida em mapa temático das classes de cobertura da terra do *International Geosphere Biosphere Programme* (IGBP) em 2005, baseadas no sensor Modis e disponível em https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mcd12q1. Como descrito acima para a superfície de porcentagem de floresta com dano, os valores de mortalidade foram também interpolados pelo método IDW.

A imagem temática do sensor Modis foi reclassificada, criando uma imagem booleana de área florestada ao longo dos 4,6 milhões de km^2 de passagem da linha de instabilidade. Essa imagem booleana foi multiplicada pela imagem de mortalidade obtida acima, gerando valores de porcentagem de mortalidade apenas para as áreas de floresta. A partir do número de árvores mortas por hectare obtido, foi possível estimar o número de árvores mortas para cada *pixel* de 100 ha da imagem interpolada.

Somando os valores de todos os *pixels* de floresta nesta última superfície, estima-se o total de árvores mortas para a área de floresta do polígono por onde passou a linha de instabilidade. Considerando a média de mortalidade anual para Amazônia encontrada no trabalho de Philips *et al.*, 2008, foi possível estimar o quanto da mortalidade natural pode ser atribuída a *blowdowns* maiores que 3 ha em 2005.

A imagem ΔNPV (NPV_{2005} - NPV_{2004}), usada no trabalho de Negrón-Juárez *et al.*, (2010) para detecção de danos da cena de Manaus, foi comparada, em uma regressão linear, com a imagem PV utilizada no presente trabalho. Para isso, foram selecionadas regiões sem presença de nuvens ou sombra de nuvens no interior dos *footprints* de *blowdown* de ambas as imagens. A escolha das regiões resultou na seleção de 81.716 *pixels* para a regressão.

Os azimutes de queda das árvores dos *blowdowns* visitados em campo foram analisados por meio de histogramas circulares construídos no *software* Oriana. A direção de queda predominante das árvores pôde ser visualizada nos histogramas, verificando se os distúrbios foram causados ou não pela linha de instabilidade de janeiro de 2005.

4. Resultados e Discussão

4.1. Distribuição espacial e mortalidade

Das 30 áreas analisadas foram encontrados *blowdowns* com padrão geométrico do tipo difuso (Grupo A) em apenas sete delas. O dano provocado esteve concentrado na região da Amazônia Central (Figura 5a). A porcentagem de dano decorrente dos *blowdowns* do grupo A variou de 0 a aproximadamente 0,16%. O maior valor ocorreu na amostra alocada na região de Manaus, com 2.378 ha de floresta afetadas por este grupo. Isto corresponde a 39% de todo o dano detectado.

As classes do grupo B também podem ser atribuídas à linha de instabilidade de janeiro de 2005. Este grupo, porém, acrescentou pouca área de dano (Figura 5b, Tabela 1). Os *blowdowns* ocasionados pela linha de instabilidade de janeiro de 2005 ainda assim permaneceram concentrados na região da Amazônia Central.

No trabalho de Negrón-Juárez *et al*. (2010), a porcentagem de dano encontrada na região de Manaus (0,2% da área florestal) foi extrapolada homogeneamente para toda a região de 4,6 x 10^6 km^2 transitada pela linha de instabilidade em três dias em janeiro de 2005. Esta extrapolação foi justificada pela observação de danos tidos como similares àqueles perto de Manaus, em outras 35 imagens Landsat do ano 2005 (Negrón-Juárez *et al.* 2010). Ainda é possível que parte do dano da linha de instabilidade de janeiro de 2005 ocorreu longe de Manaus em cenas Landsat que não foram incluídas nas 30 amostras do presente estudo. No entanto, a extrapolação homogênea não encontra respaldo. Ela acarretou em uma superestimativa do dano provocado pelo fenômeno.

Por outro lado, aqui se confirma que uma única linha de instabilidade pode causar grande parte das manchas de dano por vento >~3 ha, que ocorrem na Amazônia durante um ano. Os *blowdowns* atribuídos ao evento de janeiro de 2005 foram responsáveis por mais da metade da área de dano naquele ano, dentro das 30 amostras de floresta (Tabela 1). Se somente o grupo A for atribuído ao evento de janeiro, este contribuiu com 60% do total de área afetada. Se o grupo B também for atribuído, a contribuição é de 73%.

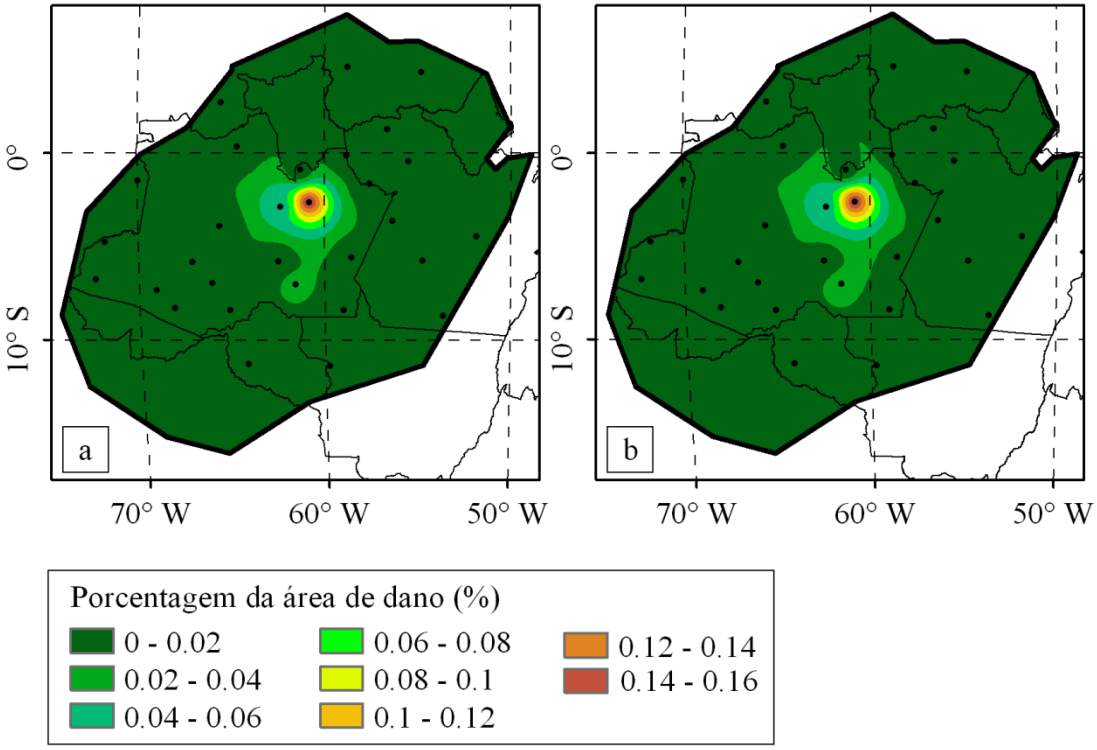

Figura 5. Dano florestal (%) ocasionado pelos *blowdowns* com área ≥ 3 ha do grupo A (a) e dos grupos A e B juntos (b). A área de trânsito da linha de instabilidade de janeiro de 2005 está representada pelo polígono maior.

Tabela 1. Área de dano dentro das 30 amostras para os *blowdowns* com área ≥ 3 ha dos grupos A, B e C ocorridos em 2005 em hectares (ha) e suas respectivas porcentagens.

Grupos	Área total de dano por classe (ha)	Porcentagem da área total de dano por classe (%)
A	3718	60,2
B	769	12,5
C	1688	27,3
Total	6175	100%

A regressão linear entre fração vegetação (PV) e a mortalidade (%) medida em campo obteve resultado significativo, apresentando um valor-p menor que 0,01 (Figura 6). O coeficiente de determinação (R^2) de 0,57 mostra que a mortalidade em porcentagem é predita pelos valores de PV interpolados. Os resíduos se apresentam bem distribuídos (Figura 7). Os testes de normalidade comprovam a distribuição normal dos dados, premissa para fazer uma regressão linear (Tabela 2).

Como o máximo valor de PV para que seja identificado dano é de 85, o mínimo de mortalidade obtido com a regressão é de 26%. Considerando uma média de 593 árvores/ha, o número de árvores mortas em 3 ha é de 462 árvores. Chambers *et al*. (2013), Tabela 1, afirmam que o número de árvores mortas em 3,66 ha é de 600 árvores.

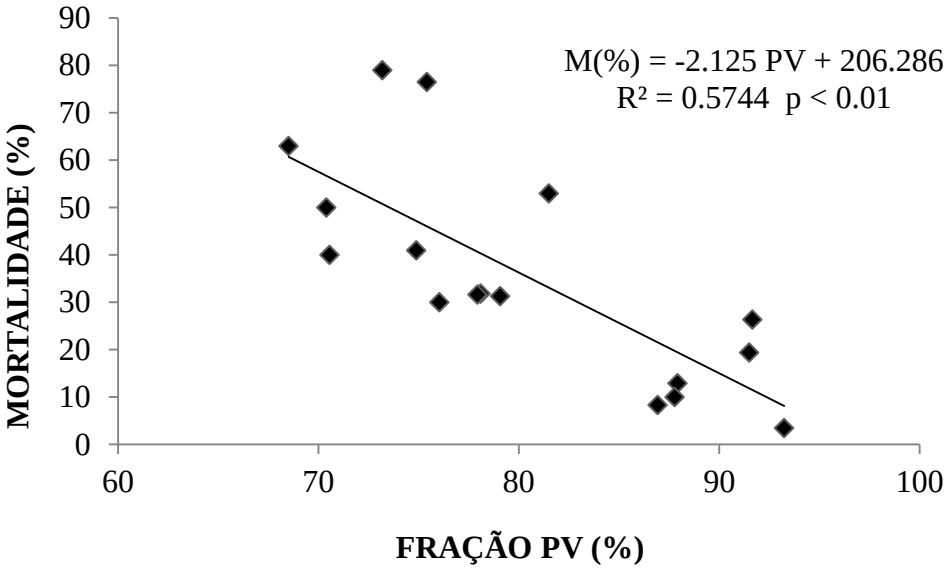

Figura 6. Relação linear entre PV obtida por mistura espectral da imagem Landsat TM5 231/062 de 29 de julho de 2005 e a mortalidade (%) medida em campo.

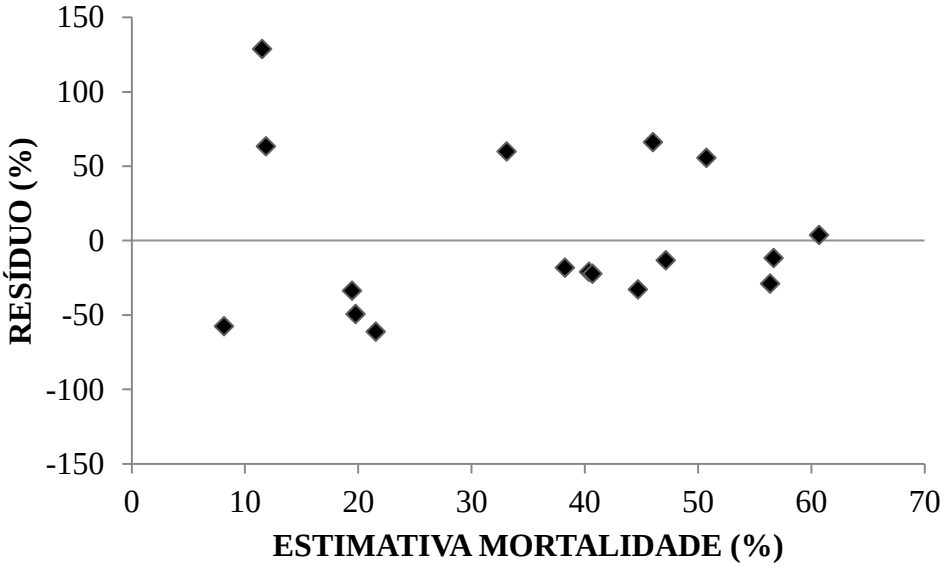

Figura 7. Distribuição de resíduos em porcentagem.

Tabela 2. Testes de normalidade para os dados de entrada da regressão.

Testes de Normalidade		
	Teste Estatístico	Valor-p
Kolmogorov-Smirnov Test (Lilliefors)	0,272	0,002
Shapiro-Wilk Test	0,847	0,01
Anderson-Darling Test	1,11	<0,01

O mapa de interpolação da mortalidade dos *blowdowns* para as 30 amostras (figura 8), mostra que a mortalidade variou de 0 a 0,046% do total da área analisada. A maior mortalidade ocorreu na cena de Manaus, com ~440 mil árvores mortas. No trabalho de Negrón-Juárez *et al.* (2010) foi estimada uma mortalidade de 320 ± 0,05 mil árvores ao longo de 2.668 ha de floresta afetada na mesma cena.

Pode-se verificar que os maiores percentuais de mortalidade ocorreram nas regiões com maior área afetada (região da Amazônia Central), como mostrado na figura 3. A perda no acúmulo de biomassa verificado no trabalho de Philips *et al*., (2009) em parcelas da Amazônia Central pode estar relacionada com a alta mortalidade encontrada neste trabalho para a mesma região.

A quantidade de árvores mortas ao longo da área de passagem da linha de instabilidade variou de 0 a 27 árvores para cada 100 ha de floresta (Figura 9). A área de floresta estimada pela máscara do Modis para o polígono da linha de instabilidade foi de 3,9 milhões de km^2. A estimativa do total de árvores mortas em todos os tipos de *blowdown* (A+B+C) para essa área foi de ~11 milhões de árvores. Portanto, a mortalidade total atribuível à linha de instabilidade de janeiro de 2005 seria entre 6,6 e 8 milhões de árvores (grupos A e A+B, respectivamente). No trabalho de Negrón-Juárez *et al.* (2010) foi estimada a morte de 542 ± 121 milhões de árvores para a área de trânsito da linha de instabilidade.

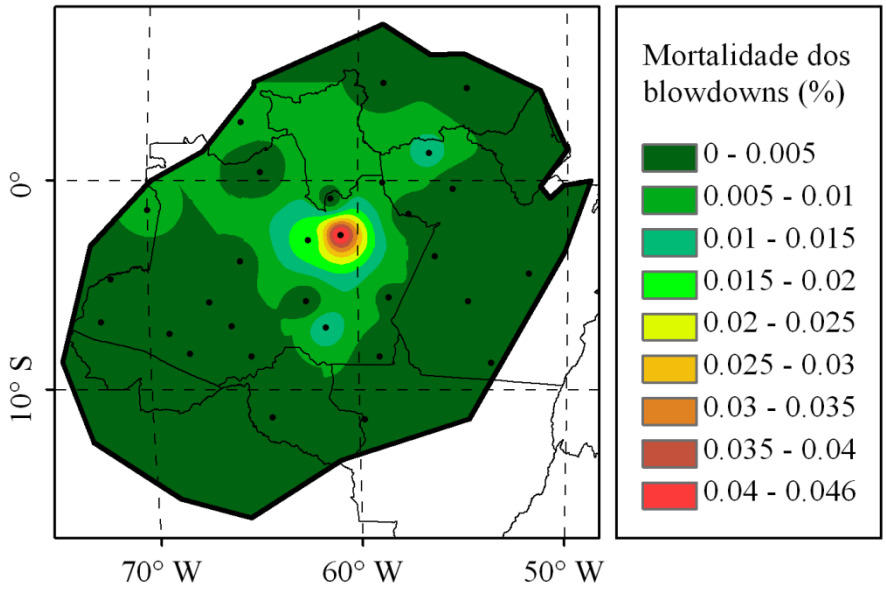

Figura 8. Mortalidade (% das árvores) atribuída a todos os tipos de *blowdowns* ≥ 3 ha.

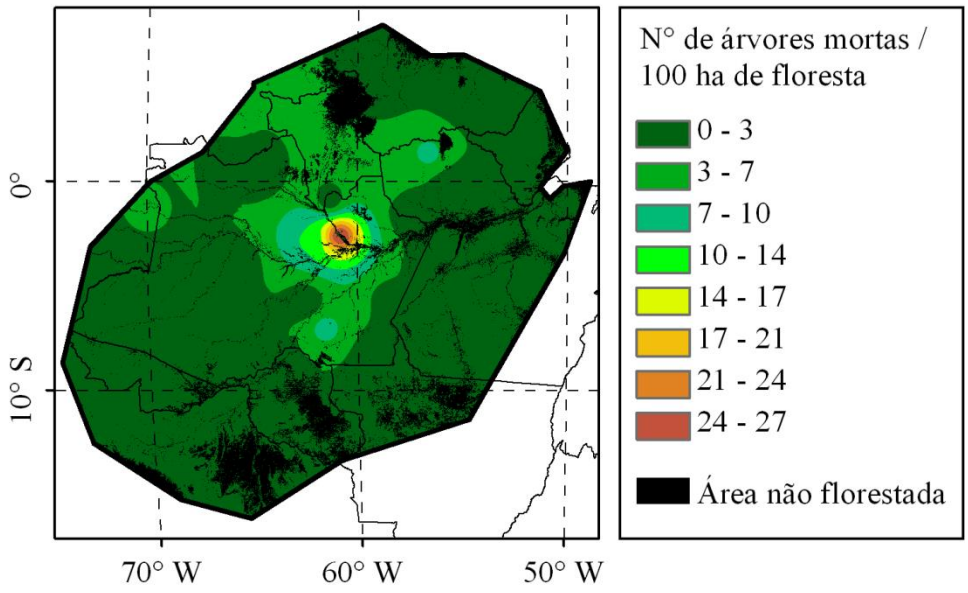

Figura 9. Número de árvores mortas para cada 100 hectares de floresta.

A mortalidade de 11 milhões de árvores corresponde a 0,0047% do total de árvores presentes na área de floresta do polígono da linha de instabilidade. Isso corresponde a uma taxa de *turnover* de ~21.300 anos, ou seja, o tempo que levaria para todas as árvores serem derrubadas por um *blowdown* maior que 3 ha. Considerando a média de mortalidade anual para a Amazônia de 1,6% (Philips *et al*., 2008), apenas 0,3% da mortalidade natural em 2005 pode ser atribuída a *blowdowns* de qualquer tipo (A,B, ou C) maiores que 3 ha. Então o

evento de janeiro de 2005 e todos os outros *blowdowns* ocorridos naquele ano parecem ser ecologicamente insignificantes.

No entanto é importante levantar três ressalvas:

(i) apenas *pixels* com mortalidade de pelo menos ~26% foram incluídos (Figura 6). A mortalidade mínima que configura o limite de detecção no trabalho de Negrón-Juárez *et al.* (2010) haverá de ser similar, pois os dois trabalhos foram calibrados para selecionar a mesma área de dano total na cena de Manaus. (O limiar mínimo de mortalidade detectável naquele trabalho foi 18%, pois usaram outra relação entre delta NPV e mortalidade, baseada nas 30 parcelas de Guimarães (2007));

(ii) *pixels* de dano isolados foram excluídos, exceto aqueles muito perto dos *footprints* de *blowdowns* > 3 ha. Áreas longe dos *footprints* não foram analisadas, para evitar erros de inclusão associados com a variação natural de PV em locais não perturbados;

(iii) a grande maioria da mortalidade de árvores por vento estará em *blowdowns* menores que três hectares e/ou abaixo do limiar de detecção. Chambers *et al*. (2013), Tabela 1, estimaram que apenas 0,5% da mortalidade anual de árvores caídas em clareiras, ocorre em clareiras maiores que ~2,5 ha. Isso é compatível com a nossa estimativa de apenas 0,3% da mortalidade natural ocorrendo em clareiras maiores que ~3 ha no ano de 2005, sobre toda floresta amazônica.

4.2. Comparação entre os métodos PV e ΔNPV

A regressão linear entre PV (do CLASlite) e ΔNPV (obtido com *endmembers* fixos que incluem sombra (Negrón-Juárez *et al*. 2010, 2011) em uma amostra de ~80.000 *pixels* escolhidos em regiões de *footprints* de *blowdown* na cena de Manaus, mostrou uma forte relação entre as variáveis (R^2 = 0,62, figura 10). Os pixels mais frequentes ocorrem no intervalo de PV de 88% a 94%. A primeira vista, o atributo ΔNPV aparenta ser mais sensível para detectar perturbações, pois para cada 1% de mudança em PV, o ΔNPV muda 2,4%. Essa vantagem é compensada pela variância de ΔNPV em locais sem perturbação.

Em uma área sem evidência de perturbação por vento na imagem da cena de Manaus, captada em 29 de julho de 2005, o desvio padrão da fração PV foi 2% em valores brutos ou ~5% quando escalonado para ser compatível com a sensitividade de ΔNPV (usando a inclinação da reta na Figura 10). Na mesma área não perturbada o desvio padrão de ΔNPV foi 6%. Isto indica que os dois métodos devem ter erros de inclusão e exclusão muito similares.

Ambos (PV e ΔNPV) seriam igualmente eficazes na identificação de distúrbios causados por vento.

No entanto, há algumas vantagens no uso de PV obtido com um modelo de mistura que elimina o *endmember* sombra (uma consequência do emprego de bibliotecas de espectros que variam desde escuros até claros) e elimina imagens-diferença:

(i) Praticidade. Não é necessário escolher *endmembers*, nem compatibilizar os *endmembers* entre as duas imagens usadas para computar a imagem-diferença;

(ii) Menos problemas com nuvens e bruma. Neste trabalho houve dificuldade de encontrar imagens limpas de nuvens em dois anos consecutivos para um grande número das cenas analisadas;

(iii) Máscara automática de nuvens. As nuvens e suas sombras mais profundas são facilmente mascaradas pela expressão booleana que isola as áreas perturbadas (PV ≤ 85% E Solo ≤ 5%). As nuvens são eliminadas, pois tem fração solo acima de 5%. As sombras profundas de nuvens são eliminadas, pois tem PV maior que 85%.

(iv) Retirada de efeitos de sombra topográfica e sombra da textura do dossel. CLASlite elimina das imagens fração quase toda a variação espacial associada com a sombra topográfica e com a sombra da textura do dossel. A textura de dossel se manifesta como variação de refletância na escala de um *pixel* e seus vizinhos. Nesta escala, a posição geográfica do centro de cada *pixel* varia randomicamente entre quaisquer duas imagens da mesma cena Landsat. Em uma data, a sombra de uma árvore grande pode ocupar toda a área de um *pixel*. Na próxima data, essa mesma sombra pode estar diluída entre quatro *pixels* adjacentes. Isso apresenta problemas para a medição de perturbações na escala *sub-pixel*, usando imagens-diferença, pois em modelos de mistura que usam sombra como *endmember*, as variações espaciais e temporais da fração sombra afetam as variações nas outras frações, incluindo o NPV.

(v) Não é necessário compatibilizar a geometria de iluminação. Para as duas imagens de entrada em uma imagem-diferença, é recomendável padronizar a geometria de iluminação, especialmente se a sombra estiver incluída como *endmember*. A imagem de 14 de outubro de 2004, empregada como pré-perturbação no trabalho de Negrón-Juárez *et al.* (2010), tem ângulo de elevação do Sol de 61,9 graus. A imagem de 29 de julho de 2005, empregada como imagem pós-perturbação, tem um ângulo de elevação solar de apenas 51,8 graus. Consequentemente, as sombras associadas com textura do dossel são muito mais pronunciadas na imagem de julho, criando a impressão de dossel mais escuro contendo mais

gaps. As sombras topográficas também não se sobrepõem integralmente entre as duas imagens devido a uma diferença de 48 graus nos respectivos azimutes do Sol.

(vi) Fração PV isenta de viés da sombra topográfica. No estudo de Negrón-Juárez *et al*. (2011), um viés na fração NPV em áreas sombreadas levou à necessidade de mascarar as áreas de sombra topográfica, retirando grande parte da paisagem da análise. No caso do modelo empregado pelo CLASlite, ainda sobra um pequeno efeito das sombras topográficas sobre as frações solo e NPV. Mas estas sofrem alterações complementares nas áreas iluminadas e sombreadas de colinas. A superestimativa de um é compensada pela subestimativa do outro e a fração PV não é afetada. Este foi o motivo da escolha da fração PV e não a fração NPV como indicador de perturbação.

(vii) A abordagem de CLASlite elimina também grande parte do ruído associado com as bandas 1, 2, 3 do Landsat TM. Aquela parte do ruído que é coerente entre as bandas é percebida como variação de sombra e é eliminada pelo CLASlite, mas não pelos modelos que incluem sombra e que usam os mesmos *endmembers* para todos os *pixels* da cena.

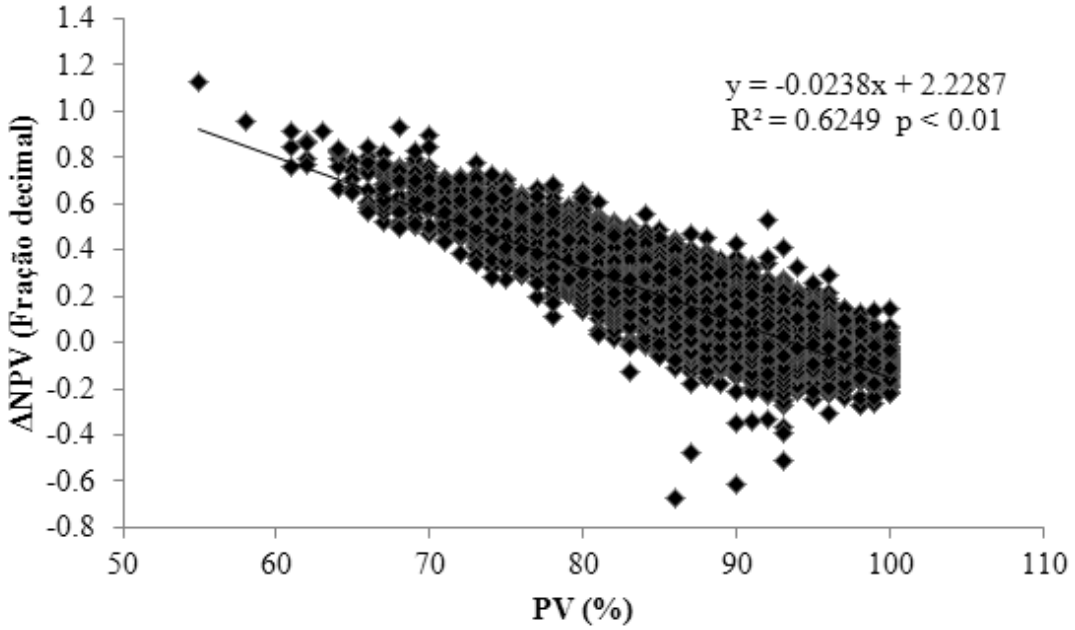

Figura 10. Regressão entre *pixels* de PV (CLASlite, *endmembers* flexíveis, de biblioteca espectral, sem sombra) e ΔNPV (*endmembers* fixos, coletados na imagem, incluindo sombra) coletados nos *footprints* de *blowdowns* da imagem de Manaus.

4.3. *Blowdowns* verificados em campo

Como o local em que ocorreu o *blowdown* da AM-352 está sendo alvo de extração ilegal de madeira, os azimutes de queda das árvores não puderam ser coletados. Dos quatro *blowdowns* em que as coletas foram realizadas, três deles apresentaram sentido predominante de queda das árvores orientadas para nordeste (Figura 11). Isso quer dizer que o vento causador da derrubada foi proveniente do sudoeste, assim como o da linha de instabilidade de janeiro de 2005, que apresentou orientação de sudoeste para nordeste. Dessa forma, três dos quatro *blowdowns* classificados nas imagens como difusos, causados pela linha de instabilidade de janeiro de 2005, tiveram comprovação em campo de que a classificação das imagens está correta.

O *blowdown* do km 95 da BR-174 teve o sentido predominante de queda das árvores orientado no sentido oeste (Figura 11D). O vento causador da derrubada foi provavelmente proveniente do leste. Analisando detalhadamente imagens anteriores a janeiro de 2005, foi possível verificar que o evento ocorreu após o mês de agosto de 2004. Na imagem de outubro, é possível visualizar o *blowdown* quase totalmente encoberto por nuvens.

Esse fato comprova que o maior erro de identificação dos *blowdowns* do presente trabalho é a inclusão dos eventos ocorridos no ano de 2004, mas que ainda se encontram com a coloração vermelha nas imagens com composição colorida RGB 543. No entanto, foi inviável encontrar 30 imagens de dois anos consecutivos (2004 e 2005), com baixa ocorrência de nuvens, para que fosse possível separar os *blowdowns* ocorridos em 2004.

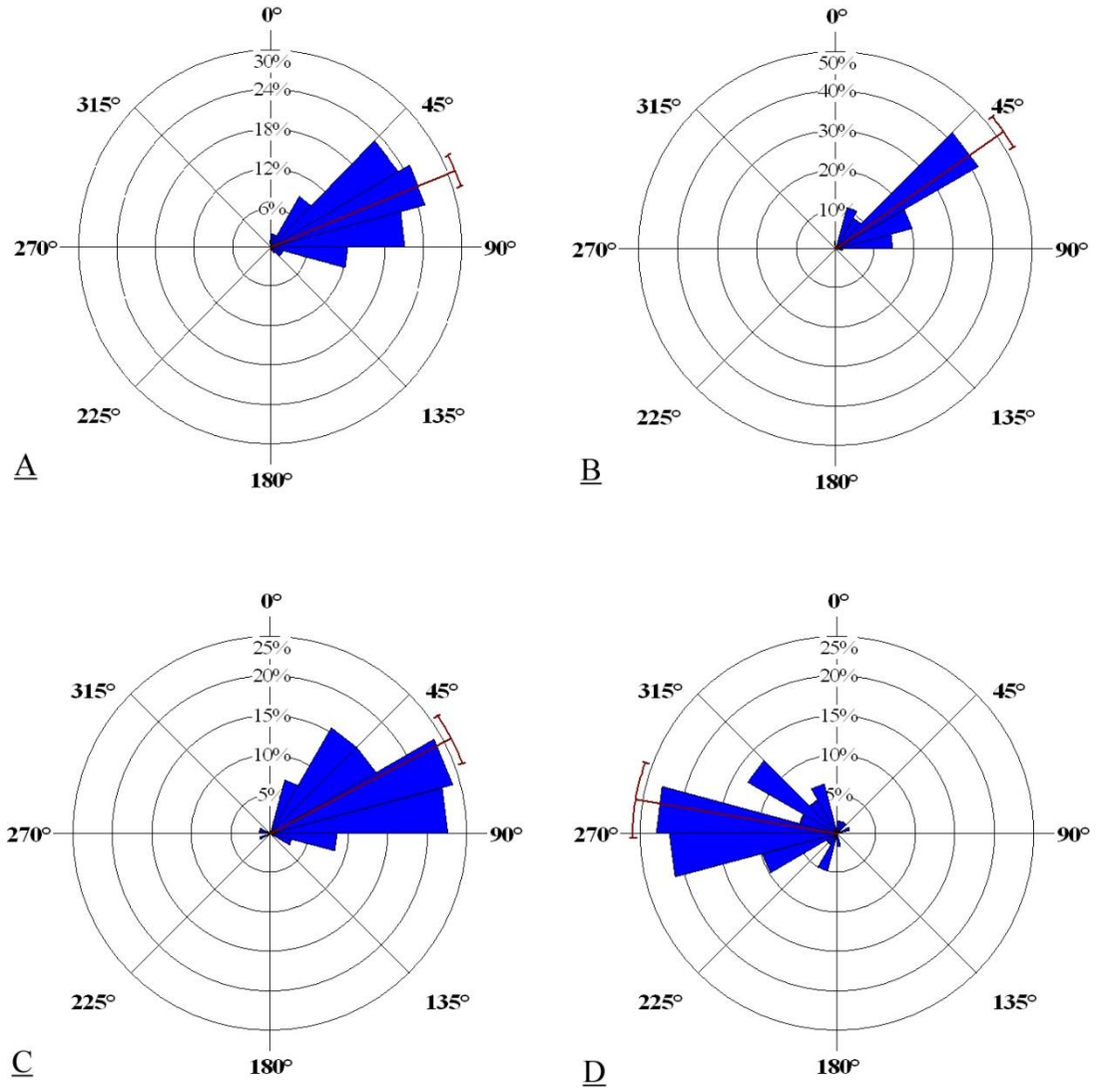

Figura 11. Histogramas circulares dos azimutes de queda das árvores dos *blowdowns*. (A) *Blowdown* da EEST/INPA com azimutes coletados de 100 árvores; (B) *Blowdown* da AM-010 com 55 azimutes coletados; (C) *Blowdown* do km 85 da BR-174 com 71 azimutes; (D) *Blowdown* do km 95 da BR-174 com 61 registros de azimutes.

5. Considerações finais

(i) Considerando as 30 amostras de 15.000 km^2 de floresta, os *blowdowns* com área acima de 3 ha, atribuídos à linha de instabilidade de janeiro de 2005, contribuíram com 60 a 73% da área de *blowdowns* detectados naquele ano em toda a Amazônia.

(ii) A mortalidade total na Amazônia, dentro das áreas de dano detectáveis foi 6,6 a 8 milhões de árvores e não meio bilhão de árvores, como foi divulgado em Negrón-

Juárez *et al.* (2010), com base numa estimativa anterior que usou o mesmo limiar de detectabilidade.

(iii) O dano foi altamente concentrado no espaço. Uma única amostra de 15.000 km^2 contribuiu 39% de todo dano encontrado. Isto sugere que estimativas de fluxos anuais de carbono associados com os danos por ventos convectivos do ano 2005 serão mais confiáveis se baseados em levantamento *wall-to-wall* de todas as cenas Landsat daquele ano.

(iv) As clareiras menores causadas por vento e detectadas por imagens Landsat ao nível de *pixels* isolados são muito mais abundantes (Chambers *et al*., 2013). Se estas também tiveram uma distribuição altamente heterogênea haverá implicações importantes para a estimativa de fluxo líquido de carbono nas poucas parcelas permanentes de inventário florestal estabelecidas na Amazônia.

(v) Como o padrão espectral de *blowdowns* recentes dura aproximadamente um ano, é possível detectar danos com esta idade ou menos sem a subtração de imagens, diminuindo os erros associados com a escolha de *endmembers*;

(vi) O limiar da fração de vegetação pura, do modelo de mistura do CLASlite, forneceu um indicador de dano confiável e de fácil aplicação, pois é livre de viés nas áreas de sombra topográfica.

6. Referências Bibliográficas

Asner, G.P.; Knapp, D.E.; Balaji, A.; Páez-Acosta, G. 2009. Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3: 1-24.

Chambers, J.Q.; Negrón-Juárez, R.I.; Marra, D.M.; Vittorio, A.D.; Tews, J.; Roberts, D.; Ribeiro, G.H.P.M.; Trumbore, S.E.; Higuchi, N. 2013. The steady-state mosaic of disturbance and succession across an old-growth Central Amazon forest landscape. *PNAS*: 1-6.

Cohen, J.C.P. 1989. *Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia*. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Brasil.

Espírito - Santo, F.D.B.; Keller, M.; Braswell, B.; Nelson, B.W.; Frolking, S.; Vicente, G. 2010. Storm intensity and old - growth forest disturbances in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, 37: L11403.

Fisher, J.I.; Hurtt, G.C.; Thomas, R.Q.; Chambers, J.Q. 2008. Clustered disturbances lead to bias in large-scale estimates based on forest sample plots. *Ecology Letters*, 11: 554–563.

Fontes, C.G. 2012. *Revelando as causas e a distribuição temporal da mortalidade arbórea em uma floresta de terra-firme na Amazônia Central.* Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Brasil.

Fujita, T.T. 1985. The Downburst: Microburst and Macroburst. *Satellite and Mesometeorology Research Project (SMRP)*, University of Chicago, Chicago, Illinois, USA.

Garstang, M.; White, S.; Shugart, H.H.; Halverson, J. 1998. Convective clouds downdrafts as the cause of large blowdowns in the Amazon Rainforest. *Meteorol. Atmos. Phys*, 67: 199-212.

Guimarães, G.P. 2007. *Distúrbios decorrentes de blowdown em uma área de floresta na Amazônia Central.* Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Universidade Federal do Amazonas. Brasil.

Hess, L.L.; Melack, J.M.; Novo, E.M.L.M.; Barbosa, C.C.F.; Gastil, M. 2012. *LBA-ECO LC-07 JERS-1 SAR Wetlands Masks and Land Cover, Amazon Basin: 1995-1996*. Data set. Available on-line [http://daac.ornl.gov] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.

IBGE, 1992. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. n.1. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ. 92p.

Lewis, S.L.; Phillips, O.L.; Baker, T.R.; Lloyd, J.; Malhi, Y.; Almeira, S.; Higuchi, N.; Laurance, W.F.; Neill, D.A.; Silva, J.N.M.; Terborgh, J.; Torres-Lezama, A.; Vásquez Martinez, R.; Brown, S.; Chave, J.; Kuebler, C.; Vargas, P.N.; Vinceti, B. 2004. Concerted changes in tropical forest structure and dynamics: evidence from 50 South American long-term plots. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 359: 421-436.

Marengo, J.A.; Nobre, C.A.; Tomasella, J.; Oyama, M.D.; Oliveira, G.S.; Oliveira, R.; Camargo, H.; Alves, L.M.; Brown, F. 2008. The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, 21: 495-516.

Marra, D.M. 2010. *Sucessão florestal em área atingida por tempestade convectiva na região de Manaus, Amazônia Central*. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Brasil.

Negrón-Juárez, R.I.; Chambers, J.Q.; Guimaraes, G.; Zeng, H.; Raupp, C.F.M.; Marra, D.M.; Ribeiro, G.H.P.M.; Saatchi, S.S.; Nelson, B.W.; Higuchi, N. 2010. Widespread Amazon forest tree mortality from a single cross-basin squall line event. *Geophysical Research Letters*, 37: 1-14.

Negrón-Juárez, R.I.; Chambers, J.Q.; Marra, D.M.; Ribeiro, G.H.P.M.; Rifai, S.W.; Higuchi, N.; Roberts D. 2011. Detection of subpixel treefall gaps with Landsat imagery in Central Amazon forests. *Remote Sensing of Environment*, 115: 3322–3328

Nelson, B. W.; Kapos, V.; Adams, J.B.; Oliveira, W.J.; Braun, O.P.G.; Amaral, I.L. 1994. Forest disturbance by large blowdowns in the Brazilian Amazon. *Ecology*, 75(3): 853-858.

Nelson, B.W.; Amaral, I.L. 1994. Destructive wind effects detected in TM images of the Amazon Basin. *Proceedings, Internacional Society of Photogrametry and Remote Sensing*: 339-343.

Phillips, O.L.; Lewis, S.L.; Baker, T.R.; Chao, K.; Higuchi, N. 2008. The changing Amazon forest. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 363: 1819-1827.

Phillips, O.L.; Aragão, L.E.O.C.; Lewis, S.L.; Fisher, J.B.; Lloyd, J.; López-González, G.; Malhi, Y.; Monteagudo, A.; Peacock, J.; Aymard, C.G.; Baker, T.R.; Bánki, O.; Blanc, L.; Bonal, D.; Brando, P.; Chave, J.; Oliveira, A.C.A.; Cardozo, N.D.; Czimczik, C.I.; Feldpausch, T.R.; Freitas, M.A.; Gloor, E.; Higuchi, N.; Jiménez, E.; Lloyd, G.; Meir, P.; Mendoza, C.; Morel, A.; Neill, D.A.; Nepstad, D.; Patiño, S.; Peñuela, M.C.; Prieto, A.; Ramírez, F.; Schwarz, M.; Silva, J.; Silveira, M.; Thomas, A.S.; Steege, H.; Stropp, J.; Vásquez, R.; Zelazowski, P.; Dávila, E.A.; Andelman, S.; Andrade, A.; Chao, K.; Erwin, T.; Di Fiore, A.; Honorio, C. E.; Keeling, H.; Killeen, T.J.; Laurance, W.F.; Cruz, A.P.; Pitman, N.C.A.; Vargas, P.N.; Ramírez-Angulo, H.; Rudas, A.; Salamão, R.; Silva, N.; Terborgh, J.; Torres-Lezama, A. 2009. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science*, 323: 1344-1347

Ponzoni, F.J.; Shimabukuro, Y.E. 2007. *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação.* São José dos Campos, SP: Parêntese. 127p.

Saatchi, S.; Asefi-Najafabady, S.; Malhi, Y.; Aragão, L.E.O.C.; Anderson, L.O.; Mynefi, R.B.; Nemani, R. 2013. Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy. PNAS, 110(2): 565-570.

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.

Toledo, J.J.; Magnusson, W.E.; Castilho, C.V. 2012. Competition, exogenous disturbances and senescense shape tree size distribution in tropical forest: evidence from tree mode of death in Central Amazonia. *Journal of Vegetation Science*: 1-13.