

ANÁLISE DO POTENCIAL DE IMAGENS SCANSAR/ALOS PARA O MAPEAMENTO DA EXTENSÃO TOTAL INUNDADA NA PLANÍCIE DO RIO AMAZONAS

Allan S. Arnesen¹; Thiago S. F. Silva¹; Laura L. Hess²; Evelyn M. L. M. Novo¹

Resumo – A planície de inundação do Rio Amazonas é uma área sujeita a grandes variações sazonais do nível d'água e da extensão inundada. Dados de sensores remotos, especialmente aqueles que operam de forma ativa na faixa das microondas do espectro eletromagnético, representam uma boa alternativa para mapear a extensão total inundada nestas áreas. Apesar disso, o mapeamento da extensão total inundada não é uma tarefa fácil, pois as áreas inundáveis são compostas por diferentes tipos de cobertura com propriedades de retroespalhamento que se modificam no tempo e no espaço. Assim, antes da aplicação de técnicas de classificação dos tipos de cobertura da terra, é fundamental a caracterização do retroespalhamento dos alvos em imagens SAR. Este trabalho, portanto, caracterizou o retroespalhamento dos principais tipos de cobertura da planície de inundação Amazônica em imagens do sensor PALSAR/ALOS (modo ScanSAR) como subsídio à determinação de estratégias de mapeamento de área inundada. Foram identificadas consideráveis sobreposições entre as distribuições das classes e propostas algumas alternativas para separá-las com base nas variações temporais de seus valores de retroespalhamento e em atributos complementares. Os resultados obtidos indicam que dados do sensor PALSAR/ALOS possuem boa capacidade de discriminação da inundação sob diversos tipos de cobertura de áreas inundáveis.

Abstract – The Amazon River floodplain is subject to large seasonal variations in water level and flood extent. Remote sensing data, especially those operating actively in the microwave range of the electromagnetic spectrum, represent a good alternative for mapping the total flood extension of these wetlands. Nevertheless, the total flood extension is not an easy task because the flooded areas are composed of different types of coverage with backscattering properties that change in time and space. Thus, before the application of techniques for land cover classification, it is necessary to characterize the targets backscattering on SAR images. This study, therefore, characterized the backscattering of the Amazon floodplain main coverage types in PALSAR/ALOS (ScanSAR mode) as an aid to determining strategies for mapping flooded area. Considerable overlap between the class distributions was observed; some alternatives are proposed to separate them based on the temporal variations of their backscattering and on complementary attributes. The present results show that PALSAR/ALOS ScanSAR data can identify well the occurrence of flooding under different wetlands cover types.

Palavras-chave: Monitoramento da inundação, sensoriamento remoto, radar de abertura sintética.

¹ Afiliação: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil. E-mail: allansa@dsr.inpe.br, thiago@ltd.inpe.br, evlyn@dsr.inpe.br

² Afiliação: Earth Research Institute – University of California, 93106 Santa Barbara, USA. E-mail: lola@eri.ucsb.edu

1 - INTRODUÇÃO

As áreas inundáveis da bacia hidrográfica Amazônica estão entre as mais extensas do planeta, com uma extensão superior a 800.000 km² (Melack e Hess et al., 2010). A planície de inundação da calha principal do Rio Amazonas representa aproximadamente 12 % desta área, e é intensamente afetada pelo regime hidrológico da bacia ('pulso de inundação', *sensu* Junk et al., 1997). Tal regime depende significativamente das condições climáticas anuais (Marengo et al., 2005), resultando em grandes variações no nível d'água e na extensão total inundada ao longo do ano. Estas variações têm impactos diretos na distribuição espacial dos ambientes inundáveis, conseqüentemente afetando a dinâmica ecológica e os ciclos biogeoquímicos da planície de inundação amazônica.

O monitoramento das variações na inundação por meio de técnicas *in situ* é limitado devido a problemas de logística e acesso a estes ambientes remotos e à grande dimensão da planície de inundação do Rio Amazonas. Uma forma mais rápida e econômica de monitoramento é através da utilização de dados de sensores remotos, os quais permitem mapear a dinâmica de inundação nas áreas inundáveis. Barbosa (2005), por exemplo, utilizou uma série de imagens ópticas do sensor TM/Landsat-5 ao longo dos anos de 1983 a 2004 para mapear as áreas de águas abertas em uma região da planície de inundação do Rio Amazonas, correlacionando as extensões de área inundada às cotas de uma estação fluviométrica da Agência Nacional das Águas (ANA).

Contudo, a utilização de dados ópticos de sensoriamento remoto não possibilita o mapeamento correto da extensão total inundada, já que esta compreende além das áreas de águas abertas, a inundação ocorrente sob áreas de vegetação permanente ou temporária, tais como plantas aquáticas emersas (macrófitas), vegetação arbóreo-arbustiva e florestas. Em uma imagem óptica, áreas densas de vegetação inundada não permitem a identificação do sinal radiométrico da água, impossibilitando assim o mapeamento da inundação.

Neste contexto, uma alternativa para o mapeamento da extensão total inundada são os dados de radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR) que operam utilizando maiores comprimentos de onda, facilitando a penetração da radiação eletromagnética nos dosséis de florestas inundadas e vegetação aquática. Além disso, estes sistemas sensores possuem fonte própria de radiação, e são capazes de registrar imagens mesmo sob densa cobertura de nuvens, permitindo assim a aquisição regular e recorrente de imagens durante o ano hidrológico.

Os processos de espalhamento que resultam da interação entre a radiação eletromagnética e diferentes tipos de cobertura vegetal sob regime de inundação variam em função do tipo de cobertura e de mudanças decorrentes das variações periódicas do nível d'água. Por esta razão, é fundamental que a resposta de espalhamento registrada pelos sensores SAR seja devidamente caracterizada antes da aplicação de técnicas de classificação digital de imagens e/ou extração de informações biofísicas sobre a cobertura terrestre. Esta abordagem tem sido aplicada em diversos

trabalhos para identificar limiares radiométricos que possibilitem a discriminação dos alvos de áreas inundadas (Hess et al., 2003; Martinez e Le Toan, 2007; Silva et al., 2010).

Desta maneira, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar o retroespalhamento dos principais tipos de cobertura da planície de inundação Amazônica, em diferentes fases do pulso de inundação, em imagens do sensor PALSAR/ALOS, modo ScanSAR, no intuito de selecionar atributos radiométricos que permitam o mapeamento e monitoramento da extensão total inundada nesta região.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - Mecanismos de espalhamento dos alvos da planície de inundação do Rio Amazonas

Os maiores rios da bacia hidrográfica Amazônica apresentam regime monomodal de inundação, em função de sua grande dimensão, e inundam extensas áreas cobertas por águas abertas, florestas inundadas e macrófitas aquáticas (Melack e Hess, 2010). Nestas áreas inundáveis, ocorre intensa variação sazonal do nível d'água, que resulta em grande variação da extensão inundada e da distribuição dos tipos de cobertura da terra ao longo do ano (Figura 1).

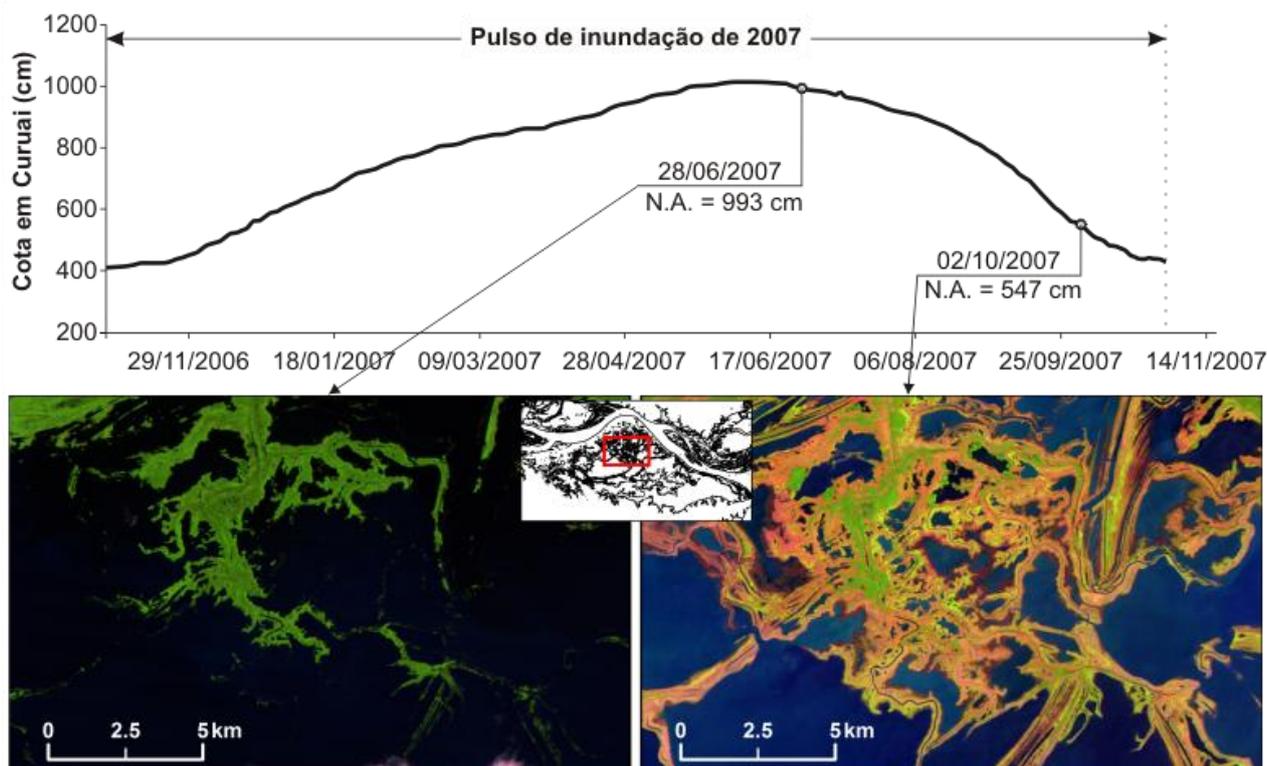


Figura 1 - Imagens TM/Landsat-5 (composição R5G4B3) da mesma área da planície de inundação do Lago Grande de Curuai (Baixo Amazonas) em duas fases do pulso de inundação do ano de 2007.

Nas áreas inundáveis, três são os mecanismos dominantes de espalhamento decorrentes da interação com a radiação eletromagnética (REM): reflexão de canto, ou *double bounce*; espalhamento volumétrico, ou de dossel; e espalhamento de superfície (Hess et al., 1990). O *double bounce* ocorre quando a REM incide no lado interno de duas superfícies planas ligadas a

aproximadamente 90° (tronco e superfície d'água, por exemplo) e retorna ao radar pelo mesmo trajeto da onda incidente (Figura 2a) (Woodhouse, 2006). No caso de florestas inundadas, por exemplo, quanto maior o comprimento de onda (Banda L – 23,5 cm ou P – 68,2 cm), maior será a penetração da REM no dossel, e conseqüentemente maior será o sinal retroespalhado devido à ocorrência do *double bounce* (Freeman e Durden, 1998).

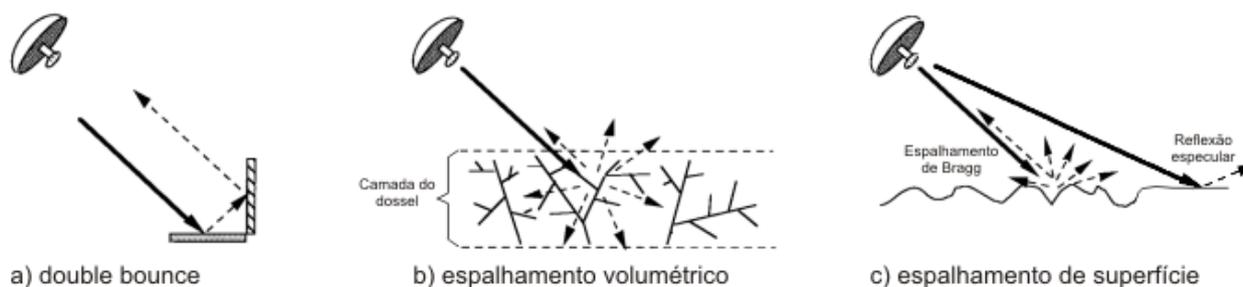


Figura 2 - Mecanismos de espalhamento: a) reflexão de canto (ou *double bounce*); b) espalhamento volumétrico (ou de dossel); e c) espalhamento de superfície. Fonte: Adaptado de Freeman e Durden (1998).

O espalhamento volumétrico ocorre quando a REM interage com diversos elementos do dossel, sendo espalhada em múltiplas direções (Figura 2b) (Henderson e Lewis, 1998). Já o espalhamento de superfície ocorre quando a REM incide em uma superfície (de água aberta, por exemplo), sendo que, neste caso o sinal de retorno dependerá da rugosidade da superfície e do ângulo de incidência da REM. Maiores ângulos de incidência implicam em menores sinais de retorno (reflexão especular), ao passo que o aumento da rugosidade das superfícies aumenta o sinal retroespalhado devido ao espalhamento de Bragg (Figura 2c).

A partir do conhecimento dos mecanismos de espalhamento presentes na planície de inundação amazônica, Silva et al. (2010) mapearam os tipos de cobertura da terra por uma classificação orientada ao objeto baseada em regras de decisão, considerando a dinâmica sazonal de inundação como a principal responsável pela variação do sinal retroespalhado. Este estudo foi realizado com uma série de imagens Radarsat S2 em diversas fases do pulso de inundação do ano de 2004. A árvore de decisão foi estruturada em níveis, sendo utilizados atributos radiométricos das classes para a definição de limiares e utilizados estimadores de mudança dos objetos ao longo da série temporal (Razão entre as imagens de Máx/Min, Diferença Sazonal Normalizada e Diferença Acumulada). A utilização destes estimadores pode ser particularmente importante para auxiliar a separação de tipos de cobertura da terra com respostas radiométricas muito similares, em que ocorra sobreposição entre as suas distribuições.

Outros estudos exploraram as variações sazonais do retroespalhamento dos alvos de áreas inundáveis para discriminá-los, utilizando diferentes algoritmos que estimam a mudança acumulada ao longo do tempo (Hess et al., 2003; Hamilton et al., 2004; Costa, 2004; Martinez e Le Toan, 2007).

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Área de estudo

A planície de inundação do Lago Grande de Curuai (LGC) está localizada no Baixo Amazonas (aproximadamente a 900 km da Foz). Esta área inundável está sujeita ao regime monomodal do Rio Amazonas, apresentando elevada variação sazonal de cota de 5 a 7 metros (Barbosa, 2005). A área de estudo escolhida para este trabalho está compreendida entre as coordenadas: 1°43'15"S e 2°15'42"S e 56°0'42"O e 55°13'15"O (Figura 3). Esta área apresenta os principais alvos da planície de inundação do Rio Amazonas e alguns presentes em áreas de terra firme, tais como floresta de terra firme e pastagens.

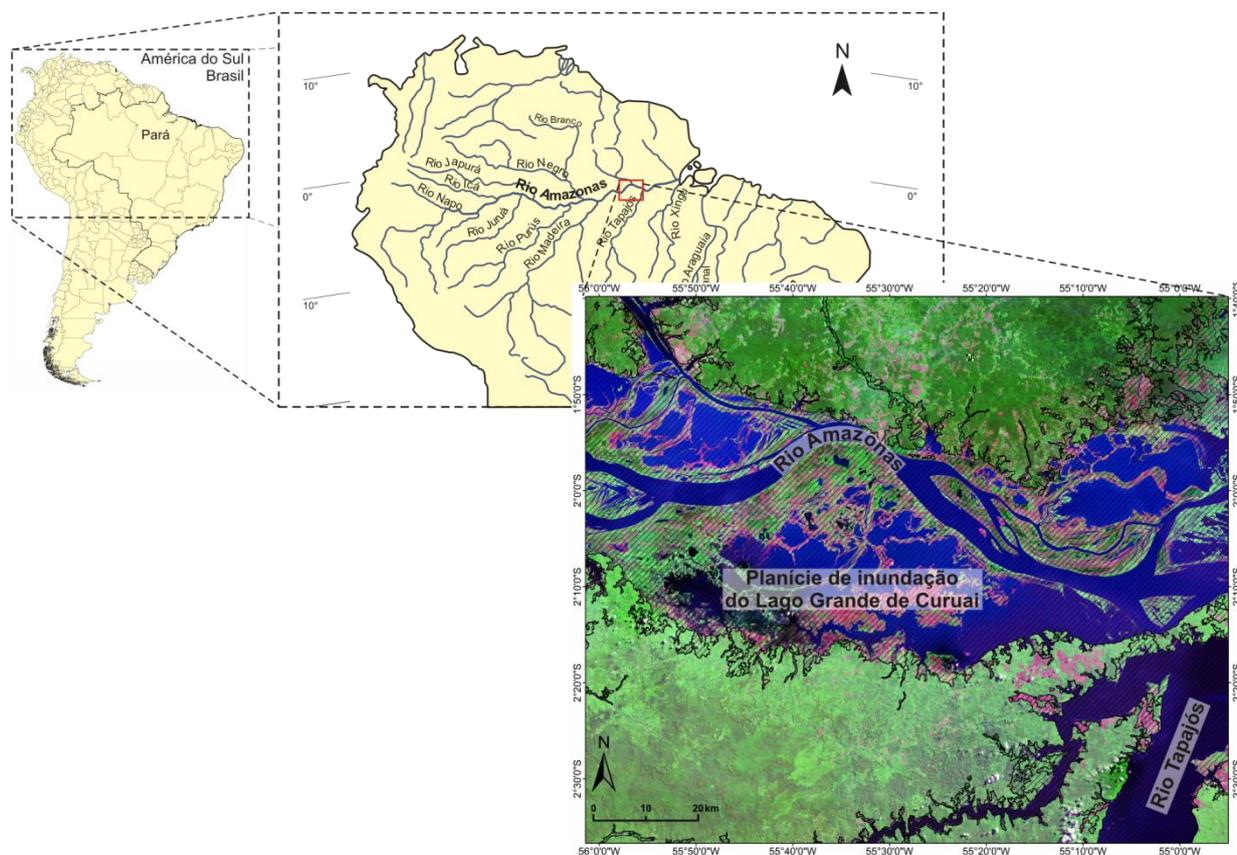


Figura 3 - Mapa de localização da planície de inundação Lago Grande de Curuai – PA. A área hachurada representa os limites de áreas inundáveis delimitados por Hess et al., 2003. Imagem: Mosaico Geocover 2005, composição R5G4B3.

3.2 - Materiais utilizados

Os materiais utilizados em campo foram: uma máquina com receptor GPS integrado, modelo *RICOH 500SEW*, a qual permitiu a aquisição de diversos registros fotográficos com coordenadas e direção de pontos da planície de inundação do LGC; e um GPS *Garmin 60 CSx*. Os dados de campo auxiliaram as posteriores etapas de coleta de amostras e interpretação visual das imagens utilizadas.

A coleta das amostras e a extração dos valores de amplitude das imagens foram realizadas no *software* ENVI 4.7. O cálculo das estatísticas descritivas das classes e os gráficos foram elaborados nos aplicativos Excel e R versão 2.13.0.

Os dados SAR utilizados neste trabalho são do sensor PALSAR, a bordo do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), lançado em janeiro de 2006 pela agência espacial japonesa (JAXA - *Japanese Space Exploration Agency's*) (Tabela 1). Este sensor opera em banda L (comprimento de onda de 23,5 cm) e possui vários modos de imageamento, dentre eles o chamado modo ScanSAR. A principal característica deste modo é a ampla largura de seu campo de visada (360 km), com reduzida resolução espacial (100 metros), a qual permite uma aquisição mais frequente de dados sobre regiões tropicais, especialmente para regiões de grande extensão como o bioma Amazônico (Rosenqvist et al., 2007). O amplo campo de visada, entretanto, implica em variação significativa no ângulo de incidência ao longo da faixa imageada, podendo resultar em diferentes respostas radiométricas mesmo para alvos similares (Ardila et al., 2010).

A área imageada pela órbita 409 do modo de operação ScanSAR recobre completamente a Planície de inundação do LGC. Neste trabalho foram utilizadas sete cenas desta órbita, adquiridas ao longo do ano de 2007, em diferentes fases do pulso de inundação (Figura 4). Todas as cenas foram adquiridas no nível de processamento 1.5 em formato amplitude (em números digitais), 8 *looks* em *azimute* por 1 *look* em *range* e com espaçamento entre pixels de 100 metros.

Tabela 1 - Características do satélite ALOS e do modo de observação ScanSAR/PALSAR.
Fonte: Rosenqvist et al., 2007.

Satélite ALOS	
Altitude	691,65 km
Órbita	Polar, sol síncrona, descendente
Frequência de revisita	46 dias
Modo de observação ScanSAR - PALSAR	
Largura do campo de visada	360 km
Comprimento de onda	23,5 cm
Espaçamento entre pixels	100 m
Ângulo de incidência	18,1 a 43,0°
Polarização operacional	HH

O ano de 2007 foi escolhido para a análise devido à disponibilidade de uma série de imagens representativas de todas as fases do pulso de inundação, e por apresentar condições usuais de inundação. Das imagens disponíveis, escolheu-se a imagem de 02/09/2007 para a coleta de polígonos amostrais das classes, devido à disponibilidade de uma imagem TM/Landsat-5 com data de aquisição próxima (31/08/2007) com a presença de poucas nuvens (Figura 5a), a qual auxiliou na interpretação visual dos alvos.

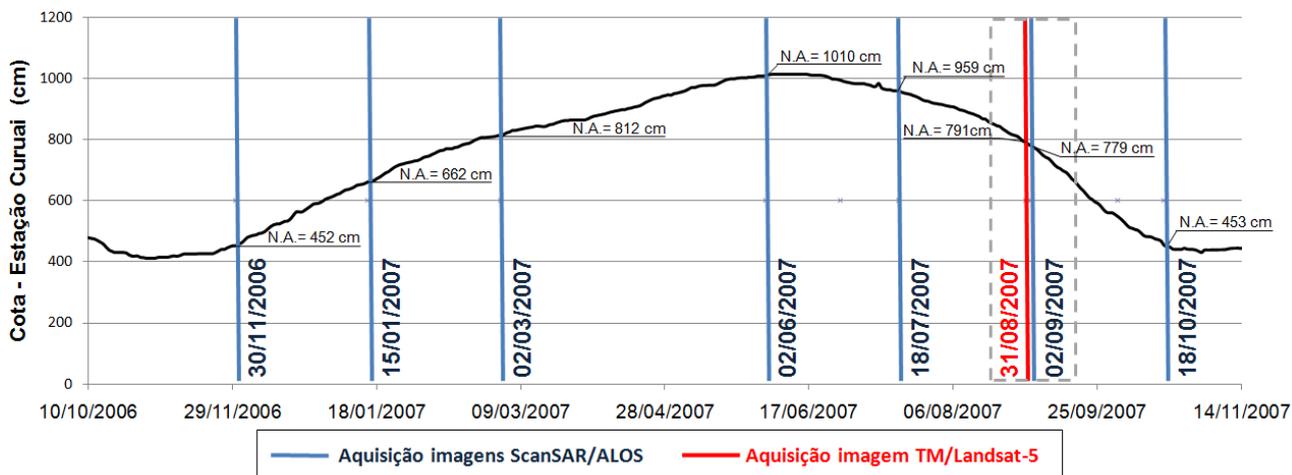


Figura 4 - Datas de aquisição das imagens ScanSAR/ALOS e TM/Landsat-5 (com destaque para as imagens utilizadas na coleta de polígonos amostrais), plotados sobre os dados diários de cota da Estação Curuai da ANA.

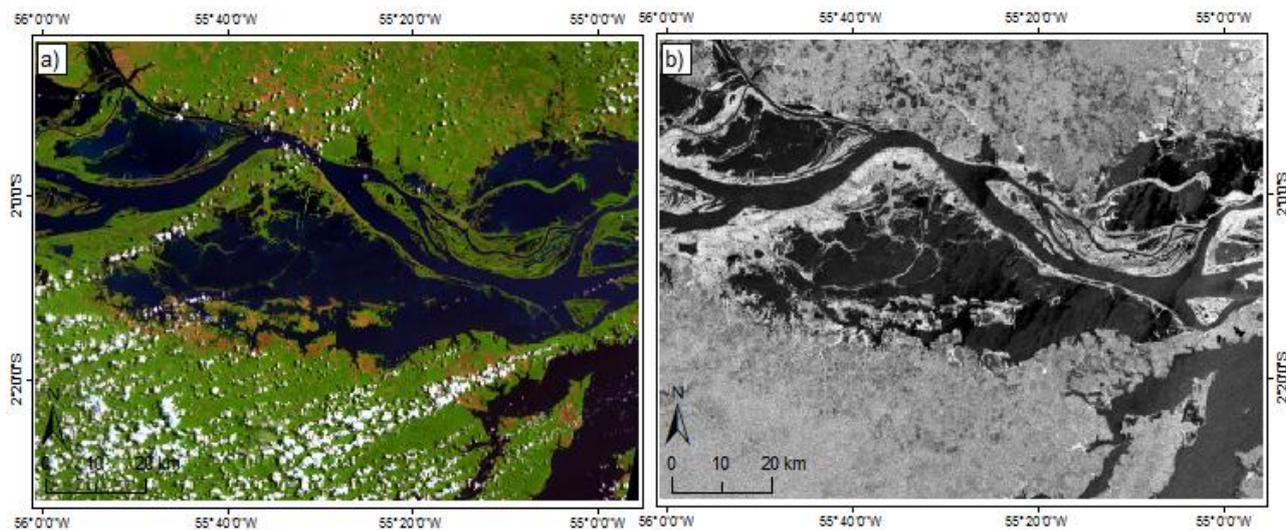


Figura 5 - Imagens utilizadas: a) TM/Landsat-5 adquirida dia 31/08/2007 (composição RGB-543) e b) ScanSAR/ALOS adquirida em 02/09/2007.

3.3 - Métodos

A metodologia aplicada foi composta por uma sequência de etapas (Figura 6), apresentadas nos tópicos a seguir.

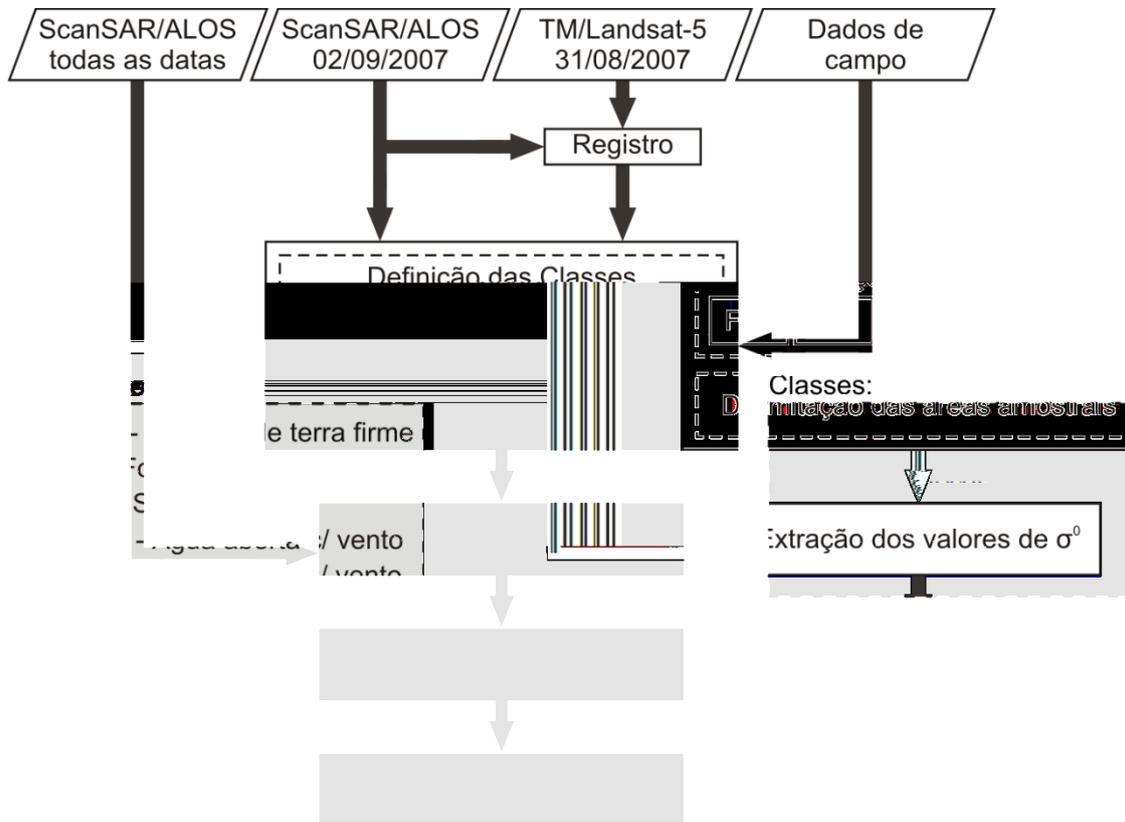


Figura 6 - Fluxograma da metodologia aplicada.

3.3.1 - Coleta de dados em campo

Foi realizado um levantamento de campo na fase de enchente do pulso de inundação (cota em Curuai de aproximadamente 950 cm) da planície de inundação do LGC, de 5 a 10 de Abril de 2011, no qual foram registradas fotografias dos diferentes tipos de cobertura da terra com as suas coordenadas geográficas (Figura 7). Estes registros fotográficos auxiliaram a posterior coleta dos polígonos amostrais das classes definidas no trabalho.

Embora o nível d'água na planície nos dias do campo seja superior ao nível d'água na data das imagens utilizadas para a delimitação de áreas amostrais (02/09/2007: cota em Curuai \approx 780cm), a campanha permitiu a observação das características físicas dos alvos (tais como altura e densidade da vegetação e rugosidade das superfícies) em diferentes pontos da planície de inundação do LGC, o que foi fundamental para o entendimento dos mecanismos de espalhamento que ocorrem na interação REM-alvo.



Figura 7 - Fotografias de alvos da Planície de inundação do LGC nos dias (a) 07/04/2011 e (b) 09/04/2011.

3.3.2 - Registro da imagem TM/Landsat-5

Para que a imagem ótica fosse utilizada no auxílio da coleta de áreas amostrais na imagem ScanSAR/ALOS, foi necessário que estas estivessem co-registradas. Para tanto, foram coletados 17 pontos de controle em ambas as imagens, obtendo um erro médio quadrático (RMS) igual a 0,43 pixel, usando-se o método de interpolação do vizinho mais próximo, na projeção Geográfica Lat/Long e Datum WGS-84.

3.3.3 - Definição das classes e delineamento de áreas amostrais

Para discriminar os alvos inundados na área de estudo, foram definidas cinco classes de cobertura da terra, com base nas imagens ScanSAR e TM/Landsat-5 (Tabela 2 e Figura 8).

Tabela 2 - Descrição classes definidas e seus mecanismos de espalhamento predominantes.

Classe	Descrição	Mecanismo de espalhamento Banda L
Floresta de terra firme (FTF)	Áreas de floresta não sujeitas à inundação, incluindo dosséis com diferentes características biofísicas	Múltiplos mecanismos de espalhamento
Floresta inundada (FI)	Áreas de florestas e de vegetação arbóreo-arbustiva inundadas	Retrospalhamento <i>double bounce</i>
Solo exposto (SE)	Áreas de solo exposto, pastagem com vegetação gramínea rasteira e áreas agrícolas, sendo ou não sujeitas à inundação	Espalhamento de superfície
Águas abertas com vento (ACV)	Áreas de água aberta com influência do vento na superfície (ondas). Esta classe também inclui as áreas de águas abertas com presença de macrófitas herbáceas de pequeno porte (< 1 m)	Espalhamentos Bragg e de superfície
Águas abertas sem vento (ASV)	Áreas de água abertas sem a presença de vento na superfície (sem ondas)	Espalhamentos de superfície

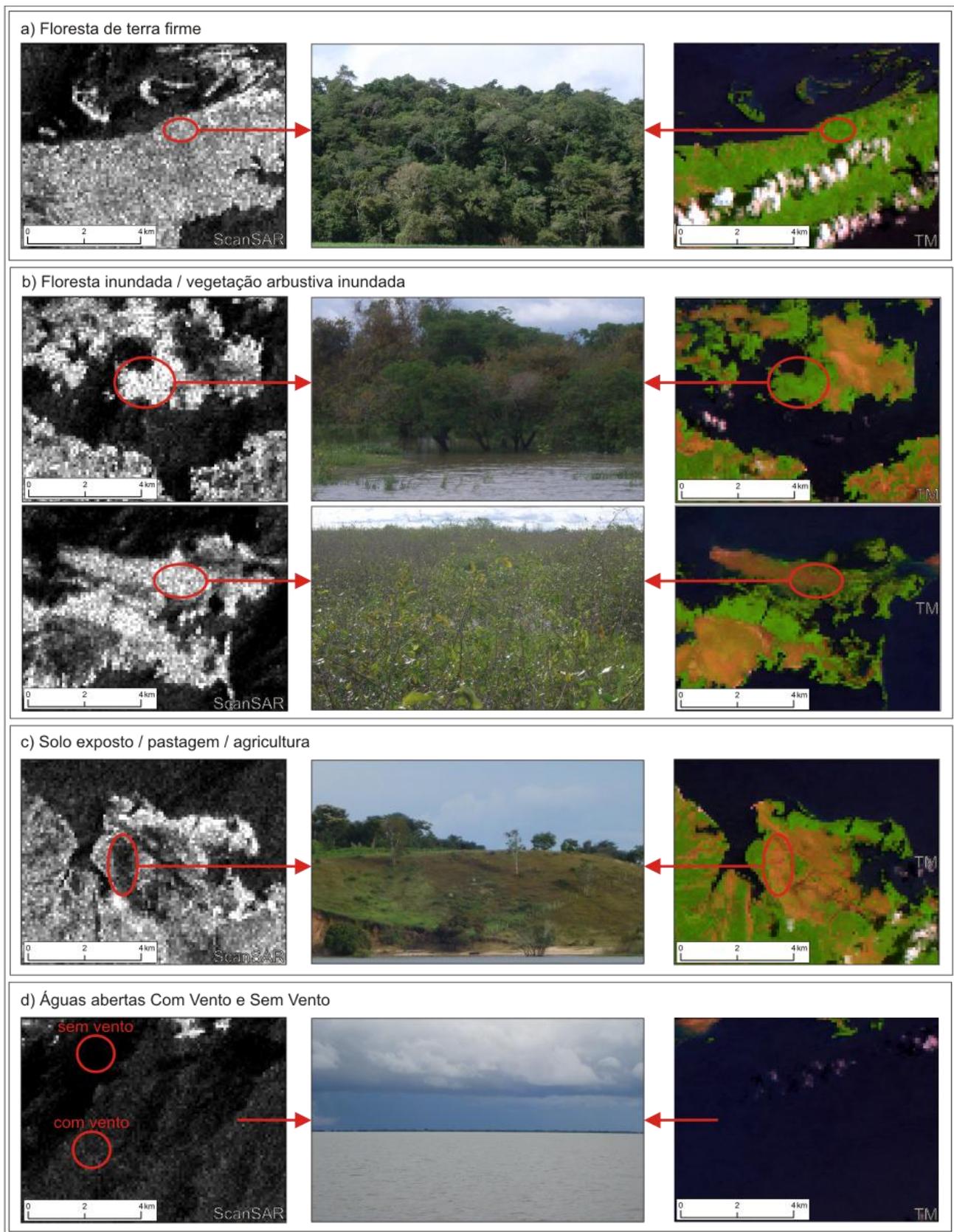


Figura 8 - Fotografias registradas em campo das classes definidas com base nas imagens ScanSAR/ALOS (à esquerda) e TM/Landsat-5 na composição RGB-543 (à direita). SCANSAR © JAXA/METI 2007.

Os polígonos amostrais (ou ROIs – *Regions Of Interest*) das classes foram coletados tomando como referência a imagem TM/Landsat-5, seguindo dois critérios principais: i) cada polígono deveria conter apenas pixels da classe amostrada sendo, portanto, o tamanho do polígono variável; e

ii) a quantidade de pixels coletados (i.e. tamanho da amostra) por classe deveria ter um número mínimo próximo de 9000 pixels, necessário para estimar o sinal retroespalhado, na presença de *speckle* (Tabela 3).

Tabela 3 - Números de polígonos e de pixels amostrais das classes definidas.

Classe	Número de polígonos (ROIs)	Número de pixels
Floresta de terra firme	133	25.104
Floresta inundada	164	14.030
Solo exposto	224	9.785
Água com vento	132	30.292
Água sem vento	170	8.989

3.3.4 - Conversão dos valores para retroespalhamento

No intuito de permitir comparações entre o sinal retroespalhado pelos alvos na imagem ScanSAR utilizada com os valores registrados na literatura, os valores de média, mediana e quartis (5%, 25 %, 75% e 95%) foram convertidos de amplitude (em números digitais) para o coeficiente normalizado de retroespalhamento - σ^0 (*Normalized Radar Cross Section* ou Sigma-Zero) - em dB. Para produtos PALSAR no nível 1.5 de processamento, esta conversão ocorre de acordo com a Equação 1 (Rosenqvist et al., 2007):

$$\sigma^0 = 10 * \log_{10}(DN^2) + CF \quad (1)$$

Onde:

CF é o coeficiente de calibração para os produtos padrões do PALSAR e tem o valor de - 83 para imagens adquiridas antes de 08/01/2009 (JAXA, 2009).

3.3.5 - Análise do sinal retroespalhado pelas classes

Para cada classe calcularam-se as estatísticas descritivas (média, mediana e quartis) das áreas amostrais extraídas da imagem ScanSAR de 02/09/2007. Também foram elaborados gráficos de densidade de probabilidade das distribuições (*Kernel density plots*) e *boxplots* dos valores de retroespalhamento (σ^0 , em dB), de modo a identificar sobreposições radiométricas entre as classes de cobertura que poderiam dificultar a sua discriminação durante a aplicação de algoritmos de classificação.

Em seguida, as mesmas áreas amostrais foram utilizadas para extrair as estatísticas de todas as imagens da série temporal com o objetivo de analisar a variação sazonal do sinal retroespalhado, que pode muitas vezes contribuir para a segregação de classes de cobertura na planície de inundação amazônica (Silva et al., 2010).

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, analisaram-se as assinaturas do retroespalhamento das classes definidas na imagem ScanSAR/ALOS de 02/09/2007 por meio de gráficos de densidade de probabilidade (Figura 9). Observou-se que consideráveis sobreposições ocorrem entre as classes: i) Floresta de terra firme (FTF) e Floresta inundada (FI); e ii) Água aberta com vento (ACV) e Solo exposto (SE).

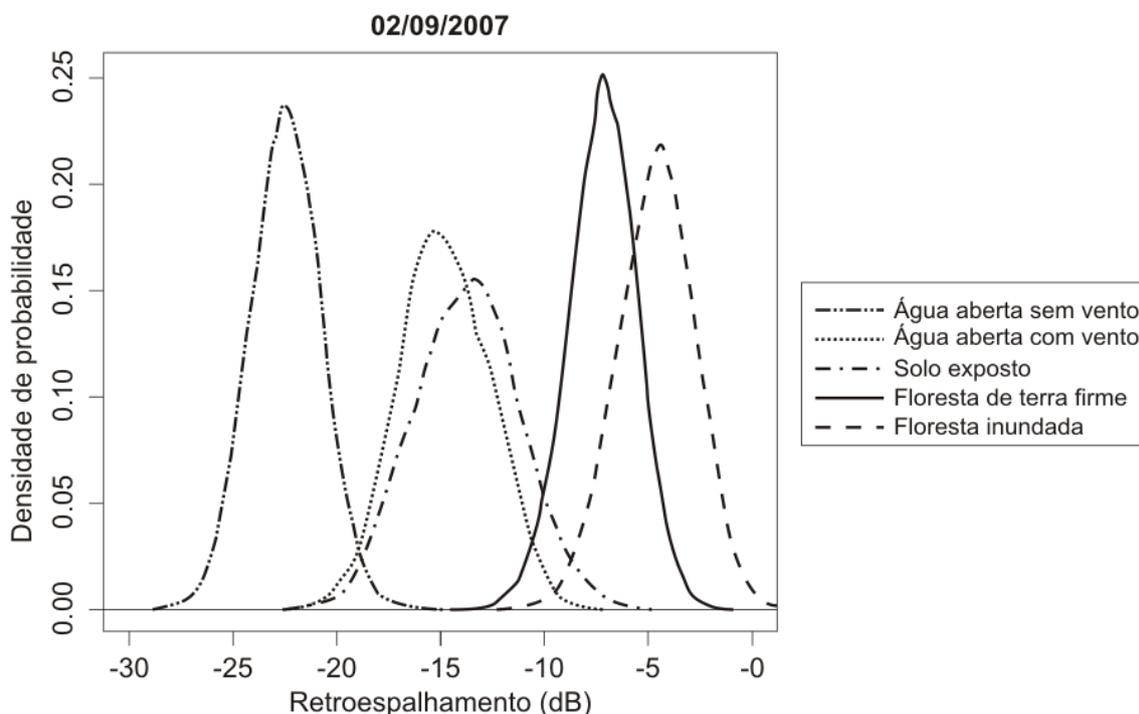


Figura 9 - Gráfico de densidade de Kernel do retroespalhamento das classes na imagem ScanSAR/ALOS de 02/09/2007.

A sobreposição entre as distribuições das classes FTF e FI ocorre devido ao alto sinal retroespalhado por estes dois alvos. Em áreas de floresta densa não inundada, ocorrem múltiplos mecanismos de espalhamento (Wang et al., 1995 - Equação 2).

$$\sigma^0_t = \sigma^0_s + \sigma^0_c + \sigma^0_m + \sigma^0_d \quad (2)$$

Onde:

σ^0_s é o espalhamento da superfície do dossel diretamente para o sensor;

σ^0_c é o espalhamento volumétrico que ocorre dentro do dossel;

σ^0_m são as múltiplas interações que ocorrem entre o dossel e o solo; e

σ^0_d é o espalhamento do tipo *double bounce*.

Devido à elevada biomassa dos dosséis em florestas tropicais, a predominância de espalhamento volumétrico resulta em altos valores de retroespalhamento em imagens SAR adquiridas em banda L. Acima de certa densidade de biomassa das florestas, ocorre um ponto de saturação em que não ocorrem variações significativas de σ^0 (Imhoff, 1995; Santos et al., 2002).

No caso de florestas inundadas, ocorre uma intensificação do *double bounce* (σ^0_d), resultante da interação entre a REM, os troncos e galhos, e a superfície da água. Este aumento no retroespalhamento total é o principal meio de discriminação entre as classes FTF e FI (Martinez e Le Toan, 2007).

Nas classes SE e ACV, o mecanismo de espalhamento de superfície de superfície é predominantes, o que resulta numa considerável sobreposição entre as assinaturas do retroespalhamento destes alvos. Esta é uma característica inerente das imagens adquiridas em banda L, uma vez que nenhum destes alvos apresenta espalhadores com dimensões capazes de implicar em altos sinais de retorno (Hess et al., 2003).

Embora estas classes apresentem características muito similares de retroespalhamento em imagens SAR / Banda L, há um comportamento capaz de discriminar estes alvos em uma série temporal de imagens. Enquanto a resposta das áreas de águas abertas é predominantemente constante, variando apenas em função da ocorrência de ondas na superfície, as áreas de SE estão sujeitas a variações temporais mais intensas, devido a fatores relacionados à umidade do solo, estágio de crescimento da vegetação herbácea e progresso da inundação (Martinez e Le Toan, 2007).

Os sinais retroespalhados pelos alvos ao longo das sete imagens adquiridas em diferentes fases do pulso de inundação do ano de 2007 foram plotados no mesmo gráfico para análise destas variações temporais (Figura 10).

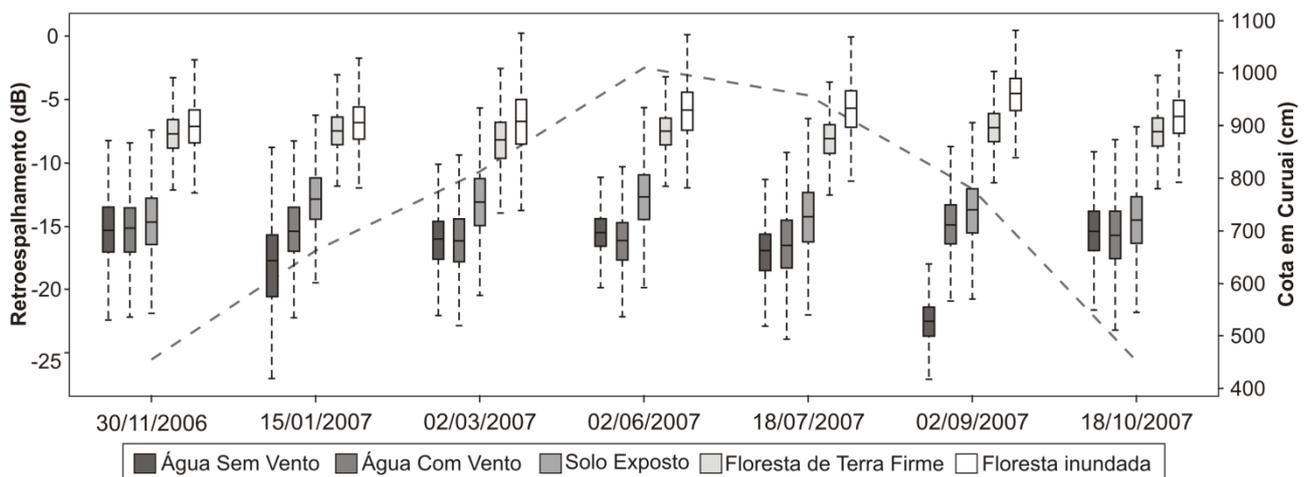


Figura 10 - Variação temporal do retroespalhamento das classes em imagens ScanSAR/ALOS em relação ao nível do pulso de inundação anual.

Foram calculadas as diferenças entre as medianas das classes SE e ACV para todas as datas, e observou-se que o aumento do nível d'água no LGC implicou em um maior distanciamento dos valores de σ^0 destas classes (Tabela 3). Esta diferença pode ser explorada em abordagens de classificação que considerem algoritmos que estimem a mudança absoluta das classes (Hess et al., 2003; Hamilton et al., 2004; Costa, 2004; Martinez e Le Toan, 2007; Silva et al., 2010).

Tabela 3 - Diferenças entre as medianas dos retroespalhamentos (dB) das classes Solo Exposto (SE) e Águas abertas com vento (ACV) para os diferentes níveis d'água em Curuai na data das imagens.

Data	Nível d'água [cm]	Diferença (Mediana(SE) – Mediana(ACV)) [dB]
30/11/2006	452	0,70
15/01/2007	662	2,52
02/03/2007	812	3,09
02/06/2007	1010	3,47
18/07/2007	959	2,22
02/09/2007	779	1,15
18/10/2007	453	1,20

A análise da variação dos sinais retroespalhados pelas classes FTF e FI também indica uma menor variação ao longo do ano para a primeira, já que não existe o aumento no σ^0 devido à presença de água abaixo do dossel (maior ocorrência do *double bounce*). Já na classe FI a variação do sinal retroespalhado é maior; no período de seca (30/11/2006) sua mediana de σ^0 é similar ao da classe FTF (diferença de 0,6 dB), enquanto que na época de cheia (02/06/2007) esta diferença aumenta para 1,7 dB.

A classe ASV é facilmente discriminável das demais apenas na imagem de 02/09/2007 (Figura 10). Este comportamento é esperado, já que para uma mesma área de água aberta a presença de vento e, conseqüentemente, de ondas é uma característica de elevada dinâmica temporal. Por exemplo, na imagem de 15/01/2007, a mistura com a classe ACV (mediana = -15,3 dB) resultou em uma distribuição claramente bimodal, contemplando elementos de ASV e ACV (Figura 11). Mesmo assim, o retroespalhamento significativamente mais baixo mostrado para a classe ASV na imagem de 02/09/2007 permite o uso desta informação na discriminação desta classe em imagens de qualquer data.

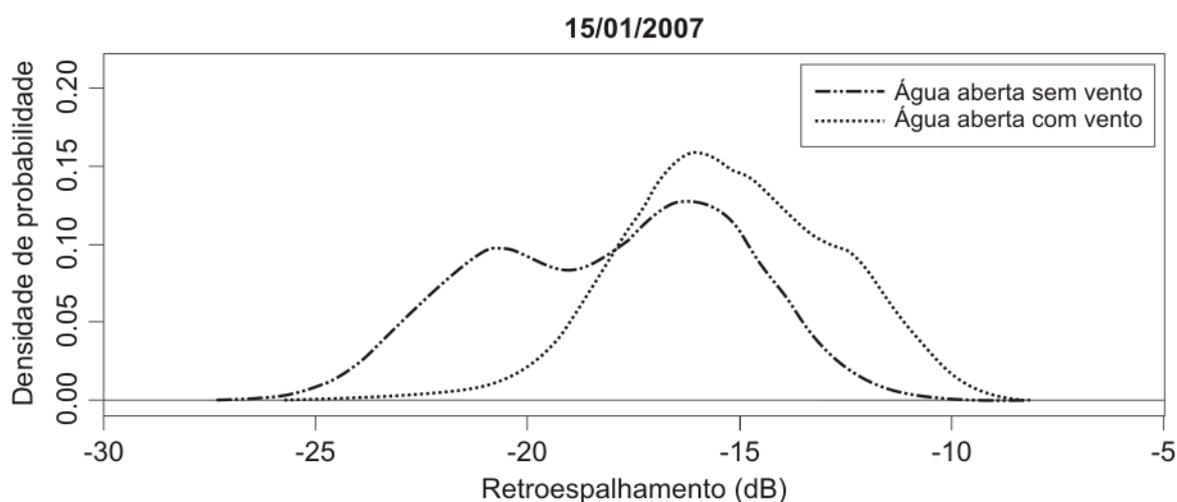


Figura 11 – Gráfico de densidade de Kernel das classes ASV e ACV na imagem ScanSAR de 15/01/2007, mostrando o efeito da incidência aleatória de vento na área amostral definida, causando a mistura entre os sinais destas classes.

Os valores de retroespalhamento das classes ao longo da série temporal estudada estão coerentes com os determinados em estudos prévios com imagens SAR em banda L (Tabela 4). A classe SE apresentou a mediana de -13,6 dB, valor similar ao encontrado por Hess et al. (2003) de -12,6 dB para estudo realizado na planície de inundação amazônica com imagens banda L do sensor JERS-1. Já a classe ACV apresentou mediana aproximadamente 2 dB menor do que a primeira (i.e. -15,7 dB), também próximo aos valores encontrados por Hess et al. (2003) (-16,7 dB). O maior σ^0 da classe SE em relação à classe ACV ao longo do ano deve-se ao desenvolvimento sazonal de vegetação e à variação da umidade do solo, aspectos que podem intensificar o retroespalhamento volumétrico em alguns períodos do ano.

Tabela 4 - Valores de σ^0 encontrados na bibliografia e neste estudo para as classes estudadas.

	ACV	SE	FTF	FI
Hess et al. (2003)*	-16,7 dB	-12,6 dB	-7,4 dB	-5,3 dB
Costa (2004)**	---	-11,3 dB	-7 dB	-4 dB
Martinez e Le Toan (2007)**	-17 dB	-12 dB	-8 dB	-6 dB
Este estudo	-15,7 dB*	-13,6 dB*	-7,7 dB*	-6,1 dB*
	-15,4 dB**	-13,3 dB**	-7,5 dB**	-6,0 dB**

* Valores de mediana das distribuições; ** Valores de média das distribuições.

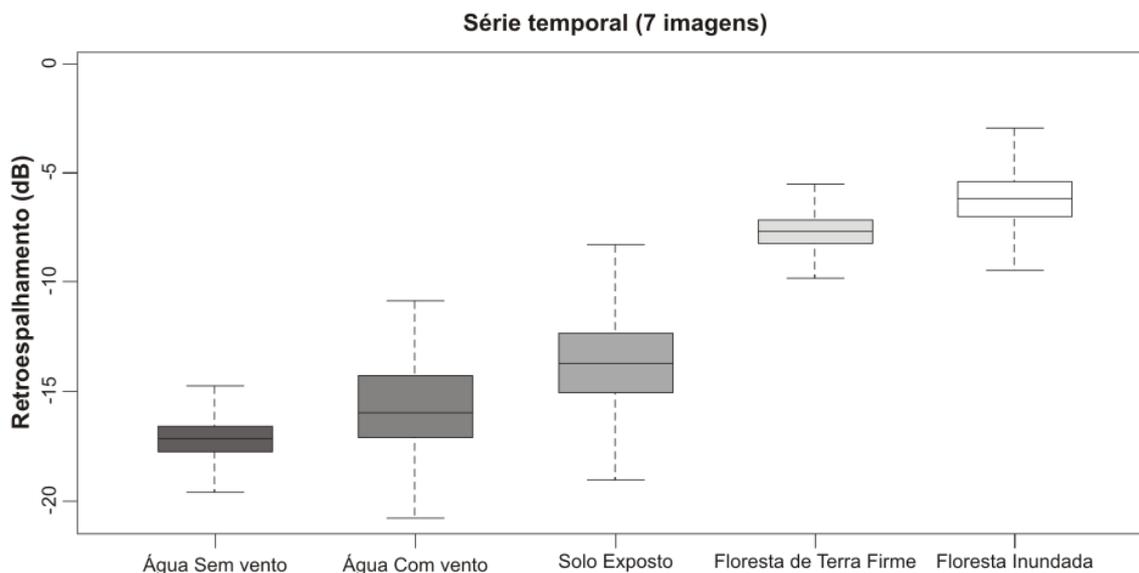


Figura 12 – Gráfico Boxplot do retroespalhamento combinado das classes de interesse, em toda as imagens ScanSAR/ALOS.

A mediana da classe FTF (-7 dB) apresentou-se bastante próxima aos valores encontrados por Costa (2004) e Hess et al. (2003), de -7 dB e -7,4 dB, respectivamente. A principal característica observada nesta classe foram os menores valores de σ^0 em relação à distribuição da classe FI, o que se deve à menor intensidade do mecanismo *double bounce*.

A classe FI apresentou os maiores valores de σ^0 ao longo do tempo (mediana de -6,1 dB). Embora este valor esteja próximo ao encontrado por Martinez e Le Toan (2007), maiores valores

(em torno de -4 a -5 dB) podem ser esperados em decorrência do predomínio do mecanismo *double bounce* (Hess et al., 2003; Costa, 2004), como ocorreu na imagem em que foram delimitadas as áreas amostrais (i.e. 02/09/2007), na qual esta classe apresentou a mediana de σ^0 de -4,5 dB. Esta redução de σ^0 estimada para todas as datas ocorreu porque em datas do período de seca (30/11/2006 e 18/10/2007) as amostras de florestas definidas com base na imagem de 02/09/2010 não estavam inundadas.

Verificou-se que a maior sobreposição entre as distribuições das classes FTF e FI ocorreu na imagem de menor nível d'água (30/11/2006, Figura 13a), uma vez que nesta data muitas áreas amostrais selecionadas com base na imagem de setembro de 2007 não estavam inundadas. Já na fase de cheia do pulso de inundação (02/06/2007, Figura 13c), as medianas das distribuições destas classes estavam mais separadas, uma vez que o maior nível d'água desta fase fez com que grande parte das amostras selecionadas estivessem inundadas. Contudo, observou-se que o maior distanciamento entre as medianas de σ^0 das classes FI e FTF ocorreu na imagem de 02/09/2007 (Figura 13b), na qual foram selecionadas as áreas amostrais.

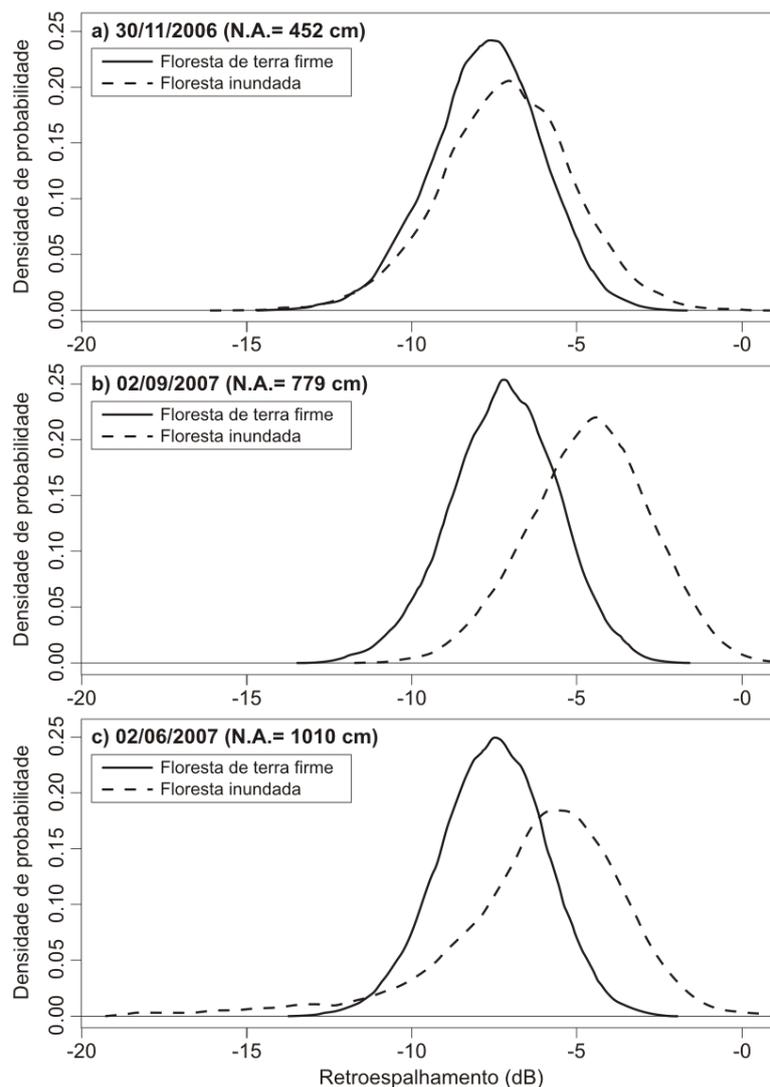


Figura 13 - Curvas de densidade de probabilidade das classes FTF e FI nas datas: a) 30/11/2006; b) 02/09/2007; e c) 02/06/2007.

5 - CONCLUSÕES

A caracterização do retroespalhamento dos alvos é uma etapa fundamental que deve ser realizada antes de aplicação de técnicas de classificação digital. Nela são identificados atributos radiométricos com potencial para discriminar os tipos de cobertura do solo, e neste caso, da presença de inundação. Neste estudo, a análise do retroespalhamento dos alvos possibilitou a identificação de sobreposições entre as distribuições das classes definidas, que poderão resultar em erros no mapeamento da extensão inundadas ao longo da série temporal de imagens ScanSAR/ALOS.

Os resultados revelaram significativa sobreposição entre as classes SE e ACV, inerente de imagens SAR em banda L devido à predominância do espalhamento de superfície. Contudo, a discriminação entre estas classes pode ser realizada explorando-se a variação temporal do retroespalhamento em imagens de diferentes fases do pulso de inundação, uma vez que ocorrem maiores modificações nos parâmetros biofísicos da classe SE (tais como estágio de crescimento da vegetação herbácea e tempo de exposição à inundação).

Também se verificou a sobreposição entre as distribuições das classes FI e FTF, sendo que as duas apresentaram os maiores valores de retroespalhamento. Na análise de toda a série temporal de imagens SAR observou-se uma menor variação da classe FTF, pois esta classe nunca está inundada. A presença de água sob o dossel da classe FI implica em uma intensificação do mecanismo *double bounce*, o que faz com que o σ^0 desta classe varie conforme o nível d'água.

As variações sazonais do retroespalhamento podem auxiliar a discriminação de alguns alvos, mas a utilização de áreas amostrais de apenas uma imagem pode caracterizar melhor os atributos radiométricos dos tipos de cobertura da terra. Isto ocorre devido à elevada dinâmica de inundação das áreas inundáveis, que resulta em intensa variação espaço-temporal dos alvos na planície de inundação. Desta forma, a seleção de áreas amostrais que sejam da mesma classe ao longo de todo o pulso de inundação é dificultada.

Como proposições para futuros trabalhos que objetivem mapear a extensão total inundada com imagens SAR, se destaca: i) separar as classes consideradas de terra firme (tais como florestas, pastagens e agricultura) daquelas sujeitas à inundação utilizando atributos de topografia (SRTM, por exemplo) (Silva et al., 2010); ii) analisar os alvos das áreas mais suscetíveis a variações sazonais de retroespalhamento (como áreas de macrófitas emersas, solo exposto e água), que dentro de um ano hidrológico podem apresentar diferentes tipos de cobertura. Estas etapas deverão favorecer o mapeamento da inundação nas áreas inundáveis.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito da Iniciativa *Kyoto & Carbon* da JAXA. Os dados PALSAR/ALOS foram fornecidos pela JAXA EORC.

BIBLIOGRAFIA

a) Livro

HENDERSON, F.; LEWIS, A. (1998). *Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar*. 3.ed. New York: Wiley. 896 p.

JUNK, W. J. (1997). *The central Amazon floodplain: ecology of a pulsing system*. Berlin: Springer, 525 p.

WOODHOUSE, I. H. (2006). *Introduction to microwave remote sensing*. Boca Raton: CRC Press, 2006. 370 p.

b) Capítulo de livro

MELACK, J. M.; HESS, L. L. (2010). “*Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon Basin*” in: *Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management*. Org. por Junk, W. J. et al. (ed). Springer Verlag, New York, pp. 43-60.

c) Artigo em revista

ARDILA, J. P.; TOLPEKIN, V.; BIJKER, W. (2010). “*Angular Backscatter Variation in L-Band ALOS ScanSAR Images of Tropical Forest Areas*”. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 7 (4), pp.821-825.

COSTA, M. P. F. (2004). “*Use of SAR satellites for mapping zonation of vegetation communities in the Amazon floodplain*”. International Journal of Remote Sensing 25 (10), pp. 1817-1835.

FREEMAN, A; DURDEN, S. L. (1998). “*A three-component scattering model for polarimetric SAR data*”. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36 (3), pp. 963-973.

HAMILTON, S. K.; SIPPEL, S. J.; MELACK, J. M. (2004). “*Seasonal inundation patterns in two large savanna floodplains of South America: the Llanos de Moxos (Bolivia) and the Llanos del Orinoco (Venezuela and Colombia)*”. Hydrological Processes 18 (11), pp. 2103-2116.

HESS, L. L.; MELACK, J. M.; SIMONETT, D. S. (1990). “*Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review*”. International Journal of Remote Sensing 11 (7), pp. 1313-1325.

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

IMHOFF, M. L. (1995). “*Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory*”. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 33 (2), pp. 511-518.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; CARDOSO, M. F.; OYAMA, M. D. (2008). “*Hydro-climate and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005*”. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 363 (1498), pp. 1773-1778.

MARTINEZ, J.; TOAN, T. L. (2007) “*Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data*”. Remote Sensing of Environment 108 (3), pp. 209-223.

ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M.; NORIMASA, I.; WATANABE, M. (2007). “*ALOS PALSAR: a pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment*”. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 45 (11), pp. 3307-3316.

SANTOS, J. R.; LACRUZ, M. S. P.; ARAUJO, L. S.; KEIL, M. (2002). “*Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data*”. International Journal of Remote Sensing 23 (7), pp. 1217-1229.

SILVA, T. S. F.; COSTA, M. P. F.; MELACK, J. M. (2010). “*Spatial and temporal variability of macrophyte cover and productivity in the eastern Amazon floodplain: a remote sensing approach*”. Remote Sensing of Environment 114 (9), pp. 1998-2010.

WANG, Y.; HESS, L. L.; FILOSO, S.; MELACK, J. M. (1995). “*Understanding the radar backscattering from flooded and nonflooded Amazonian forests: Results from canopy backscatter modeling*”. Remote Sensing of Environment 54 (3), pp. 324-332.

d) Outros

BARBOSA, C. C. F. (2005). “*Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai/Rio Amazonas*”. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 286 p.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY - JAXA. *AIUG 3.0: ALOS User Interface Gateway*. 11 de Maio de 2009. Disponível em: <https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/en/doc/an/20090109en_3.html> Acesso em: 5 de Maio de 2011.