

# 2017

**Produto Meta 1 – projeto de revisão metodológica dos processos normativos de identificação das áreas da união descrição do estado da arte na definição de áreas inundáveis usando técnicas de geoprocessamento**



Laboratório de Sistemas de Informações

Espaciais

LSIE

20/4/2017

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	3
2. IMAGEM DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR) .....	5
2.1 Mapeamento das áreas inundadas usando imagens SAR na Amazônia.....	10
2.2 Análise de dados interferométricos na Amazônia.....	14
2.3 Integração de imagem SAR e MODIS .....	16
3. SENSORES ÓPTICOS .....	18
3.1. Séries temporais MODIS e SPOT-VGT .....	18
3.1.1. Índices Espectrais Normalizados.....	19
3.1.2. Algoritmo Open Water Likelihood (OWL).....	21
3.1.3. Emprego da Análise de Componentes Principais (ACP) .....	21
3.3.3. Classificação não supervisionada.....	22
3.3.4. Algoritmo Contextual.....	22
4. ESCOLHA DO SENSOR UTILIZADO .....	24
Descrição das imagens Sentinel .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Referências .....	31

## 1. INTRODUÇÃO

A extensão espacial, variabilidade e quantidade de água das áreas inundáveis, lagos, reservatórios e outros corpos de água são pouco conhecidas no Brasil e globalmente. Estas massas d'água afetam fortemente os fluxos de gases biogeoquímicos e traços entre a terra e a atmosfera e o transporte para os oceanos (Richey et al., 2002; Frey e Smith, 2007). Um importante tratado intergovernamental é a convenção de áreas úmidas de Ramsar, acordado em 1971 na cidade de Ramsar (Irã). Essa ação de cooperação internacional busca o uso racional das zonas úmidas e seus recursos.

As imagens de sensores remotos proporcionam uma capacidade única para descrever a distribuição espacial das águas superficiais terrestres, que não são possíveis com a simples expansão das redes de estações fluviométricas in situ. Portanto, o sensoriamento remoto permite acrescentar informações valiosas sobre a dinâmica das águas superficiais, sendo amplamente utilizado na aquisição de dados. A Convenção de Ramsar sobre Zonas úmida (2002) reconhece que o mapeamento e monitoramento de grandes áreas recobertas com águas superficiais seriam inacessíveis sem o emprego do sensoriamento remoto. As imagens fornecem uma abordagem para a medição de

elementos importantes do balanço hidrológico das bacias hidrográficas e nos permite obter estimativas independentes do armazenamento de planícies de inundação (Alsdorf et al., 2007b). O uso da tecnologia de observação terrestre permite aquisição de dados e análise de informações necessárias para uma melhor tomada de decisão, fortalecendo a capacidade dos órgãos responsáveis na conservação e uso adequado dessas regiões. Além disso, a disponibilidade de dados permite comparar e harmonizar metodologias, procedimentos e formatos para uma análise cada vez mais rápida (Jones et al. 2009).

Uma variedade de imagens de sensoriamento remoto está disponível para o mapeamento de zonas úmidas por uma série de sensores de radar e ópticos, com diferentes resoluções espaciais, espectrais e temporais. Normalmente, os dois tipos de sensores são complementares, onde os sensores ópticos caracterizam as propriedades espectrais e o SAR fornece informações sobre a altimetria e a estrutura dos alvos.

Devido à alta variabilidade sazonal das zonas úmidas e dos corpos de água temporários, a aquisição de dados deve conter uma alta resolução temporal para permitir monitorar o pulso hidrológico. Para determinadas regiões com alta porcentagem de cobertura de nuvens, como na região Amazônica, as imagens multiespectrais dos satélites Landsat TM e SPOT mostram-se insuficientes para discriminar detalhadamente as zonas húmidas. A alternativa disponível é o emprego das imagens de radar, que fornecem informações em qualquer condição climática e podem, em circunstâncias específicas, detectar água sob vegetação fechada (Rosenqvist et al., 2007).

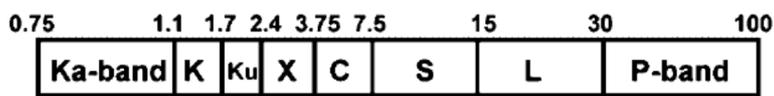
Várias revisões foram feitas sobre esse tema considerando diferentes abordagens e locais. Adam et al. (2010) fez uma revisão do emprego de imagens multiespectrais e hiperespectrais para o mapeamento de vegetações de áreas inundadas. Hall et al. (2011) fez uma revisão sobre o emprego do sensoriamento remoto na modelagem hidrodinâmica da Amazônia.

## 2. IMAGEM DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR)

Os sensores de sistema radar são ativos, fornecendo a sua própria fonte de energia, o que permite o registro de imagens tanto de dia quanto de noite. As principais vantagens dos dados SAR são a sua independência relativa das condições atmosféricas e de iluminação e a capacidade de mapear as áreas inundadas em áreas cobertas de vegetação (Woodhouse, 2006).

No espectro eletromagnético, a faixa de microondas cobre comprimentos de onda de milímetros a metros (**Figura 1 e Tabela 1**). Os dados SAR são sensíveis à rugosidade e composição estrutural (quanto maior a rugosidade ou estrutura, maior é o retroespalhamento) e propriedades dielétricas (ou teor de umidade, com menor absorção de sinal em alvos úmidos). Diferentes alvos produzem diferentes retroespalhamento, onde uma superfície lisa (por exemplo, água parada ou solo nu) gera pouco retroespalhamento, uma vez que a maior parte do sinal transmitido é refletido para longe do sensor, enquanto um alvo de estrutura complexa (por exemplo, uma floresta) possui uma maior proporção do sinal que retorna ao sensor (Rosenqvist et al., 2007). A constante dielétrica descreve como uma superfície atenua ou transmite a radiação, quanto menor a constante dielétrica,

maior a transmissão de energia de microondas. A vegetação fotossinteticamente ativa possui um alto teor de água e uma alta constante dielétrica, enquanto a vegetação morta tem um menor teor de água e constante dielétrica (Bourgeau-Chavez et al., 2005).



**Figura 1** – Faixas espectrais das bandas do sensor SAR.

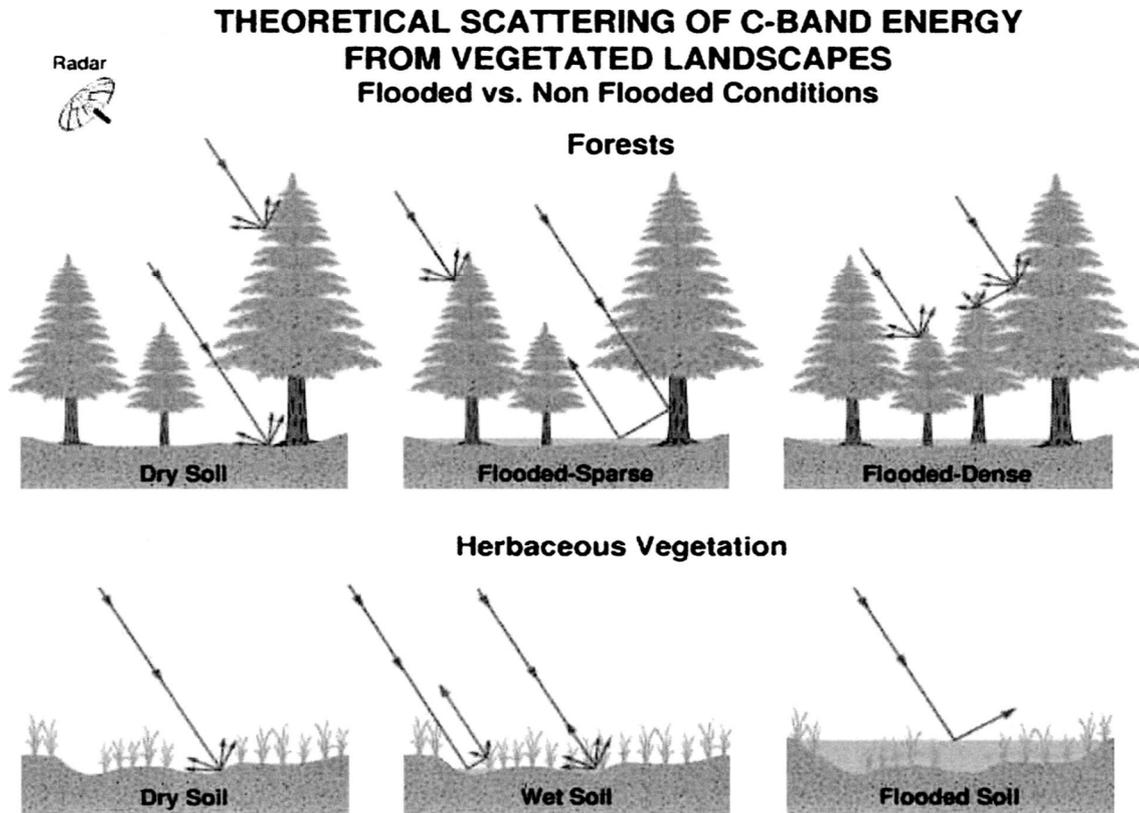
**Tabela 1** – Principais bandas dos sensores SAR. Fonte: Jensen, 2009 (adaptado)

Bandas na faixa de micro-ondas (RADAR)	Comprimento de onda em cm	Frequência em GHz
K	0,75 – 2,4	40,0 – 12,5
X	2,4 – 3,8	12,5 – 8,0
C	3,9 – 7,5	8,0 – 4,0
S	7,5 – 15,0	4,0 – 2,0
L	15,0 – 30,0	2,0 – 1,0
P	30,0 – 100,0	1,0 – 0,3

As principais superfícies que estabelecem a forma como a radiação de microondas interage com a superfície das áreas úmidas podem ser agrupadas em três tipos: estrutura da vegetação, rugosidade da superfície do solo e presença ou ausência de água (Bourgeau-Chavez et al., 2005) (**Figura 2**). Bourgeau-Chavez et al. (2005) demonstra uma representação teórica do espalhamento da banda C (5.7 cm) em ambientes de florestas e campos em diferentes condições ambientais (região inundada, solo seco e úmido) (Figura 2).

As bandas SAR são sensíveis as feições de mesmo tamanho ou maior do que o seu comprimento de onda, onde os objetos menores do que o comprimento de onda tornam-se transparentes ou invisíveis. As bandas de comprimento de onda mais curto relativas às bandas X (TerraSAR-X, Radarsat-1/2) e C (ENVISAT, ERS-1/2, Sentinel-1) são frequentemente utilizados para aplicações marítimas. A banda C por interagir com as

folhas e os galhos no topo do dossel da vegetação é usada para delinear plantas herbáceas em um ambiente de pântano (Costa et al. 2002) e plantações de arroz (Le Toan et al., 1997).



**Figura 2.** Influência da vegetação e das condições ambientais sobre a dispersão da radiação de microondas por radiação de abertura sintética (Bourgeau-Chavez et al. 2005).

A banda L com comprimento de onda mais longo, tipicamente de 23,5 cm (JERS-1, ALOS-PALSAR), é particularmente útil para mapear corpos d'água terrestres e vegetação inundada (Hess et al. 1990, 1995, Bourgeau-Chavez et al. 2000). Em superfícies de água terrestre, a energia do radar banda L pode ser refletida especularmente porque a ação do vento ou das ondas é normalmente insuficiente para produzir a energia de espalhamento de volta para a antena, diferentemente das condições oceânicas abertas que desenvolvem frequentemente ondas capazes de retroespalhar para a antena (Alpers, 1985). Portanto, as superfícies de águas abertas apresentam baixa energia de retorno aparecendo na imagem de forma mais homogênea e com coloração escura. Nas

vegetações inundadas, a banda L pode ter a capacidade de penetrar no dossel da floresta e retornar sinais da superfície da água (Alsdorf, 2003). Como as folhas das árvores geralmente são muito pequenas para serem detectadas, a banda L penetra mais profundamente na copa para interagir com os ramos, bem como para fornecer informações sobre as hastes e a superfície de água ou solo subjacente. Nesses ambientes inundados, observa-se um processo denominado de "duplo retorno", onde um pulso de radar segue um caminho que penetra na cobertura da vegetação, reflete a partir da superfície da água subjacente, retroespalha nos troncos da vegetação e retorna à antena (Richards et al. 1987; Hess et al., 1995; Alsdorf et al., 2007b). Esta propriedade torna a banda L particularmente significativa no contexto das zonas húmidas, para a distinção entre a floresta inundada e a floresta não inundada (Krohn et al., 1983; Hess et al., 1995). Diferentes estudos sobre áreas inundadas utilizam as imagens do JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite 1).

Alguns satélites SAR têm bandas polarimétricas (por exemplo ALOS, Envisat, Radarsat 2, Sentinel), permitindo transmitir um sinal de microondas com uma polarização específica (horizontal ou vertical) e subsequentemente receber a parte retroespalhada do sinal com polarização horizontal ou vertical, produzindo quatro combinações de polarização possíveis (HH, VV, HV, VH). Estas características polarimétricas ampliam o potencial de distinguir os diferentes alvos. Para a banda L, as polarizações HH e VV proporcionam a melhor penetração através do dossel da vegetação, enquanto as polarizações HV e VH fornecem mais informações sobre a cobertura vegetal (Rosenqvist et al., 1999). Na discriminação das fronteiras terrestres e aquáticas, os sensores SAR mais utilizados são os de polarização do tipo HH na banda C ou L (Schmullius e Evans, 1997).

Outro importante recurso das imagens SAR é a interferometria que permite a elaboração do modelo digital de elevação, favorecendo o monitoramento do nível de

água, o que é um recurso valioso nos estudos de áreas úmidas. A técnica de interferometria de passagem de repetição, utilizando dados da mesma localização e ângulo de visão, mas adquirida em momentos diferentes, é também frequentemente utilizada. Sobreposição destas imagens SAR a partir de diferentes tempos cria um interferograma, um produto baseado em imagem que mostra deslocamentos e variações nos níveis de água ao longo do tempo. O SAR interferométrico (InSAR) é uma ferramenta útil que fornece a introspecção em níveis de água em mudança e extensão da inundação.

A coerência SAR interferométrica multitemporal pode ser usada para delinear a área superficial inundada, pois as características de dispersão das superfícies de água mudam continuamente com as ondas, resultando em uma pobre coerência de repetição de passagem sobre a água (Smith e Alsdorf, 1998). Esta abordagem, no entanto, requer que a coerência temporal da superfície terrestre circundante permaneça relativamente maior, uma condição não tipicamente encontrada para ciclos de repetição orbital superiores a alguns dias (neve, chuva e vento entre aquisições e propriedades dielétricas da terra circundante e da vegetação Superfícies, resultando em má coerência em toda parte).

Diferentes técnicas de classificação de imagens radar têm sido aplicadas para o mapeamento de áreas inundáveis: redes neurais (Augusteijn & Warrender, 1998; Ghedira et al., 2000), classificação orientada a objeto (OBIA) (Costa et al., 2004; Evans et al., 2010; Hamilton et al., 2007; Hess et al., 2003; Silva et al., 2010), árvore de decisão (Bourgeau-Chavez et al., 2000; Simard et al., 2000; Parmuchi et al. 2002; Whitcomb et al., 2009), K-NN (Betbeder et al., 2014; Shiyu et al., 2011), e Support Vector Machine (Betbeder et al., 2014, Zhang et al. 2009).

A revisão de Hederson e Lewis (2008) descrevem uma falta de consistência nas técnicas de classificação, onde diferentes métodos foram comparados entre si

(supervisionados tradicionais, redes neurais, sistemas baseados em conhecimentos e especialistas, índices de dispersão e classificadores hierárquicos). As imagens foram analisadas usando tanto número digital como coeficientes de retroespalhamento  $\sigma^0$ dB. O mesmo pode ser dito para os filtros utilizados para minimizar os efeitos do speckle e preparar os dados para análise digital ou visual que apresentam diferentes procedimentos. O sucesso da técnica de análise parece ser mais dependente de (1) especificações do sensor (comprimentos de onda e polarizações); (2) critérios do projeto (unidade de mapeamento mínimo e detalhe das categorias mapeadas); e (3) características ambientais (função de transferência de modulação) do que a técnica. Técnicas avançadas de análise de imagens podem não ser críticas, pois abordagens simples parecem comparáveis nos resultados a métodos mais complexos.

## **2.1 Mapeamento das áreas inundadas usando imagens SAR na Amazônia**

Hess et al. (1995) utilizaram as bandas de radar C e L da missão Radar de Abertura Sintética Radar C/X (SIR-C/X-SAR) considerando polarizações múltiplas para investigar a extensão da inundação e a vegetação na Bacia Amazônica. Três das seis combinações de banda e polarização disponíveis (CHH, LHH e LHV) eram melhores na diferenciação entre tipos de cobertura de terra.

Wang et al. (1995) compararam as potencialidades das bandas C, L e P na detecção de áreas inundáveis na região do arquipélago de Anavilhanas do rio Negro, na floresta Amazônica. Os resultados demonstraram uma maior razão de retroespalhamento entre a floresta inundada e a floresta não-inundada nas seguintes condições: (a) polarização HH; (b) ângulos de incidência menores; e (c) maior comprimento de onda (Banda P). As diferenças eram pequenas entre as bandas C e L, mas grandes na banda P. Quando o tamanho da folha era igual ou maior do que o comprimento de onda da banda C, o índice

de área foliar (IAF) teve um grande efeito no retroespalhamento das florestas inundadas e não-inundadas (não sendo evidenciada na banda L ou banda P).

Rosenqvist et al. (2002) utilizaram dados do SAR JERS-1 para mapear ao longo do tempo a extensão de enchentes na bacia do rio Jaú tributário do rio Negro (Amazônia) e relacionando-os com dados in situ. Esses dados foram então utilizados como entrada de extensão de cheias para um modelo de fluxo de CH<sub>4</sub> com o objetivo de melhorar nossa compreensão das fontes continentais de gases de estufa. A metodologia foi dividida nas seguintes etapas: (a) caracterização das distribuições de retroespalhamento do SAR nas florestas inundadas e não inundadas; (b) cálculo de estimativas da extensão de inundação em cada imagem na sequência multitemporal de JERS-1 (a partir de um valor limite de nível de cinza); (c) estabelecimento de relações empíricas que liguem as estimativas de inundação do JERS-1 com as correspondentes alturas dos níveis dos rios medidos in situ; e (d) estimativa da extensão das áreas inundadas em uma base diária.

Hess et al. (2003) utilizaram um mosaico SAR JERS-1 para produzir classificações de níveis de água baixa e alta, neste caso para a principal planície de inundação do Amazonas. Descobriram que, da área estudada, 17% eram áreas úmidas, 96% das quais se tornaram inundadas na época de cheia, enquanto que apenas 26% foram inundadas na época de vazante. Embora estes estudos tenham utilizado com sucesso dados SAR para aplicações hidrológicas.

Costa (2004) mapeou as comunidades de vegetação na planície de inundação do Amazonas (região de Monte Alegre) a partir de imagens de Radarsat e JERS-1. O procedimento de classificação consistiu nas seguintes etapas: (1) filtragem de imagens SAR, (2) conversão de 16 a 8 bits, (3) aplicação de máscaras de água e de solo sobre as imagens, (4) segmentação e (5) classificação usando a distância de Battacharrya. Eventualmente, nas imagens radar ocorre uma maior segmentação devido o ruído speckle.

As classes adotadas foram: floresta inundada, floresta de terra firme, pastagem, savana, e plantas aquáticas.

Frappart et al. (2005) utilizaram mosaicos SAR JERS-1 da bacia do rio Negro para períodos de cheia e vazante em 1995 e 1996. Além disso, utilizou dados do satélite altimétrico Topex/Poseidon (T/P) e estações hidrográficas in-situ. A classificação foi baseada em um limiar de cada mosaico individual para recuperar classes pré-definidas. Os dois vetores de retro espalhamento individuais foram substituídos por dois vetores compostos baseados em (i) o coeficiente médio de retroespalhamento calculado ao longo das duas estações e (ii) a razão de ambas as estações dando o valor de mudança. O retroespalhamento médio fornece a rugosidade da vegetação enquanto que o canal de mudança produz a estimativa relativa à probabilidade de mudança. Como os dados fornecidos estão absolutamente calibrados e pouco sensíveis a qualquer outro efeito que a inundação (isto é, o crescimento da vegetação, a umidade do solo), qualquer alteração significativa está ligada a uma variação do estado de inundação. As imagens foram classificadas em oito classes: (1) água aberta; (2) floresta inundada ocasionalmente; (3) florestas não inundadas; (4) solo exposto ou vegetação baixa; (5) pastagens ocasionalmente inundadas; (6) vegetação baixa ocasionalmente inundada, (7) floresta sempre inundada, (8) vegetação submergida. A análise permitiu o mapeamento de áreas inundadas nas épocas de cheia e vazante para comparação.

Martinez e Le Toan (2007) classificaram séries temporais de imagens SAR JERS-1 nas planícies de inundações da região de Óbidos com o propósito de investigar a dinâmica da planície de inundação e da vegetação. O método de mapeamento considera duas variáveis: 1) o coeficiente médio de retroespalhamento calculado ao longo de toda a série temporal; e 2) a variação total calculada a partir de um estimador de "Mudança Absoluta". A primeira variável fornece classificação pela rugosidade dos tipos de

vegetação, enquanto a segunda variável produz uma estimativa direta da intensidade de mudança que está relacionada à dinâmica de inundação. O classificador é aplicado em toda a série temporal para mapear a extensão máxima e mínima da inundação definindo 3 condições de inundação: nunca inundada; ocasionalmente inundada; e permanentemente inundada (PF). Os resultados compararam a exposição à vegetação e a distribuição de inundações, ligando a enchente amazônica ao processo de sucessão ecológica.

Aires et al. (2013), desenvolve um método de downscaling para a bacia amazônica baseado em informações de alta resolução espacial a partir de um radar de abertura sintética (SAR) para estados de baixa e alta inundação e dados do GIEMS com baixa resolução espacial e alta resolução temporal. A informação a priori de alta resolução só está disponível para os dois estados extremos da inundação, uma vez que as observações SAR não fornecem uma maior amostragem temporal.

Arnesen et al (2013) realizaram o monitoramento da planície de inundação do Lago Curuai, no baixo Rio Amazonas, usando doze cenas do ALOS/PALSAR ScanSAR (banda L - HH) adquiridos entre 2006 e 2010, incluindo sete durante o ano hidrológico de 2007. Complementarmente, foram utilizadas as informações auxiliares relativas aos registros de nível de água, fotografias de campo, imagens ópticas (Landsat-5 / TM e MODIS / Terra e Aqua) e dados topográficos. As análises foram realizadas usando valores de amplitude (números digitais), mas os resultados finais foram convertidos para coeficientes de retroespalhamento normalizados ( $\sigma^0$ ), expressos em dB para permitir comparações com a literatura anterior. No mapeamento da cobertura da terra foi utilizada a classificação baseada em objeto (OBIA), considerando a árvore de decisão J4.8 implementada no Weka. Quatro classes foram consideradas: floresta inundada, floresta não inundada, solo (incluindo áreas com vegetação herbácea) e água aberta.

## **2.2 Análise de dados interferométricos na Amazônia**

Alsdorf et al. (2000) utilizaram dados SIR-C de banda L interferométricos para investigar as mudanças no nível da água na Amazônia. Usando duas imagens da mesma geometria de visualização, separadas por 24 h, a topografia da terra poderia ser estimada, bem como quaisquer deslocamentos que ocorressem entre os tempos de aquisição de imagem. Numa localização, descobriu-se uma depressão de fase quando as imagens foram comparadas, o que foi explicado por um deslocamento na superfície da água, uma diminuição no nível de água de aproximadamente 5 cm (Alsdorf et al., 2000). Descobertas semelhantes no nível da água foram encontradas em toda a faixa. Isso ilustra a capacidade deste método para estimar a mudança do nível da água, aumentando nossa capacidade de monitorar e, portanto, entender a dinâmica das cheias.

Alsdorf et al. (2001) avaliaram dados interferométricos do SAR JERS-1 sobre o lago Balbina (Amazonas) contendo aproximadamente 1500 ilhas que produz alterações de escala centimétrica na altura da superfície da água de 14 de fevereiro a 30 de março de 1997. A validação é fornecida por perfis de altimetria TOPEX POSEIDON multi-temporais, que medem diretamente as alturas de superfície em relação a um dado fixo. Ambos os métodos têm limitações. A altimetria TOPEX POSEIDON é uma ferramenta de criação de perfil, não uma ferramenta de imagem, enquanto que as observações interferométricas, que cobrem uma área, requerem um percurso de "salto duplo" que normalmente ocorre em vegetações inundadas. Este trabalho demonstrou que a combinação de ambos os métodos pode produzir medidas de alteração da altura da superfície da água espacialmente distribuída através de um grande corpo de água com apenas vegetação esparsa e inundada

Alsdorf (2003), avaliou dados interferométricos do SIR-C na diminuição dos níveis de água na Amazônia em um SIG. Verificou-se que as diminuições no nível da água não

correspondiam ao tamanho do corpo de água, mas a distância do percurso de fluxo do local de medição ao canal principal. Ao extrapolar esta faixa em toda a bacia utilizando uma imagem SAR JERS-1, o armazenamento total da bacia foi estimado e encontrado cerca de 30% menor do que as estimativas modeladas anteriormente. Esta maior compreensão da dinâmica das cheias prova a hipótese de que a modelagem dos níveis de água da planície de inundação corresponde aos níveis de água do canal principal como incorretos, pelo menos para este ano de estudo (Alsdorf, 2003).

Alsdorf et al. (2005) modelaram os fluxos da planície de inundação na Bacia Amazônica. O fluxo previsto pelo modelo também foi observado em dados SAR interferométricos, confirmando a capacidade do modelo para representar o fluxo neste local.

Alsdorf et al. (2007a) utilizam SAR interferométricos do JERS-1 para observar a migração da onda de inundação amazônica a jusante. Os dados JERS-1, com um período de repetição de 44 dias, observaram mudanças claras entre níveis de água altos e baixos ao longo dos diferentes anos. As mudanças nos níveis de água foram observadas com precisão e com um alto nível de detalhe e até mesmo permitiu identificar a direção do fluxo na planície de inundação (Figura 2). Conforme Alsdorf et al. (2007a), esses dados poderiam investigar a dinâmica, o transporte e os impactos de inundações, além de melhorar os modelos de inundação e os planos de manejo.

Jung e Alsdorf (2010) investigaram a coerência dos dados SAR interferométricos de passagem repetida recebidos pelo JERS-1 para três locais na Amazônia ao longo do tempo; Lago Balbina, Lago Cabaliana e confluência Solimões-Purus. Constatou-se que a coerência das áreas de vegetação inundada varia sazonalmente com as mudanças no nível da água, enquanto que a coerência permanente das águas abertas e das florestas não inundadas não variou. Este estudo mostra o potencial dos sistemas de SAR para observar

o ciclo anual da onda de cheia da Amazônia, usando mudanças de coerência. Todos estes estudos permitem que as planícies de inundação sejam melhor compreendidas em termos dos seus ciclos sazonais e da extensão da inundação que ocorre.

Alsdorf et al. (2010) usaram métodos gravimétricos e de imagem por satélite (GRACE, SRTM, GPCP e JERS-1) para estimar as quantidades de água de enchimento e drenagem na planície amazônica em seis áreas de 330 km × 330 km. A quantidade de água armazenada e subseqüentemente drenada da planície de inundação do Amazonas anualmente representa cerca de 5% do volume total de água descarregada do Rio Amazonas para o Oceano Atlântico. Apesar de um aumento de cinco vezes na descarga do canal principal a montante para rio abaixo, o volume de água da planície de inundação trocada com o rio duplica apenas (baseado em todos os seis comprimentos de alcance de 330 km). As taxas de troca ao longo dos comprimentos de alcance de 330 km variam de 5500 m<sup>3</sup>/s durante o preenchimento da planície de inundação a -7500 m<sup>3</sup>/s durante a drenagem. A contribuição para a planície de inundação a partir do escoamento superficial local de terras altas representa menos de 20% do volume de água da planície de inundação durante um determinado período de tempo.

### **2.3 Integração de imagem SAR e MODIS**

Silva et al (2010) realizaram o mapeamento de região da planície de inundação do Leste da Amazônia (na região da lagoa de Monte Alegre). O método adotado foi a classificação baseada em objeto (OBIA), considerando 3 níveis de classificação. As classificações dos níveis 1 e 2 foram baseadas apenas em imagens SAR. O primeiro nível de classificação considerou os amplos padrões de cobertura da terra: áreas não inundáveis, planície de inundação e água aberta. O segundo nível dividiu a classe planície de inundação em três coberturas (floresta inundável, área de arbustos inundáveis e possíveis macrófitas). O terceiro nível de classificação combinou informações ópticas (MODIS) e

SAR para identificar a cobertura real de macrófitas em cada data específica, limitada pela área previamente mapeada como possíveis Macrófitas.

### **3. SENSORES ÓPTICOS**

As técnicas de sensoriamento remoto óptico têm sido amplamente utilizadas para mapear e monitorar as áreas úmidas (Phinn et al., 1999; Davidson e Finlayson, 2007). No entanto, os sensores remotos óticos não captam a superfície inundada com cobertura de nuvens, fumaça provenientes de incêndios florestais e sob coberturas florestais. Além disso, até recentemente os sensores com alta resolução temporal (MODIS – 250 metros) caracterizam-se por terem uma moderada resolução espacial. Esses problemas dos sensores ópticos são agravadas na Amazônia com áreas com alta densidade de coberturas de nuvens (Asner, 2001) e a presença de cerca de 70% da planície de inundação coberta por florestas inundadas (Mertes et al., 1995).

#### **3.1. Séries temporais MODIS e SPOT-VGT**

Imagens ópticas de alta resolução, de data única ou múltipla, fornecem informações locais precisas (Coste, 1998; Harvey e Hill, 2001), mas não permitem o freqüente monitoramento de grandes regiões. Recentemente, novos sensores com alta resolução espacial e temporal estão sendo disponibilizados como as imagens Planet e a WorldView

que aprimoram o uso de imagens ópticas para esse objetivo. No entanto, essas imagens não estão disponíveis para o passado recente. Uma abordagem utilizada foi a adoção por muitas pesquisas de imagens com resolução moderada de cobertura regional e com alta resolução temporal (Verdin, 1996; Roshier e Rumbachs, 2004).

### ***3.1.1. Índices Espectrais Normalizados***

Diferentes índices espectrais têm sido propostos para a detecção de áreas inundadas: normalized difference vegetation index (NDVI) (Rouse et al 1974), normalized difference water index (NDWI) (Gao et al., 1996), normalized difference moisture index (NDMI) (Wilson & Sader, 2002), shortwave infrared water stress index (SIWSI) (Fensholt & Sandholt, 2003), normalized difference infrared index (NDII) (Hardisky et al., 1983), normalized difference shortwave-infrared index (NDSWIR) (Gerard et al 2003), normalized difference water index (NDWI3) (Gerard et al. 2003), normalized burn ratio (NBR) (Key & Benson, 1999), modified normalized difference water index (mNDWI) (Xu et al., 2006), normalized difference pond index (MDPI) (Loacaux et al., 2007), normalized difference flood index 1 e 2 (NDFI1 e NDFI2) (Boschetti et al. 2014). Uma síntese desses índices está listada na **Tabela 2** desenvolvida por Boschetti et al. (2014).

**Tabela 2** - Índices espectrais para a detecção de água em sensores óticos (Boschetti et al., 2014).

<b>PANEL A</b>				
<b>Spectral range</b>	<b>SI</b>	<b>Original purpose</b>	<b>Equation</b>	<b>MODIS bands</b>
NIR-NIR	Normalised difference water index	Vegetation liquid water	$NDWI = \frac{\rho_{858} - \rho_{1240}}{\rho_{858} + \rho_{1240}}$	b2, b5
	Normalised difference moisture index	Forest analysis and detection	$NDMI = \frac{\rho_{858} - \rho_{1240}}{\rho_{858} + \rho_{1240}}$	b2, b5
	Shortwave infrared water stress index	Vegetation water content	$SIWSI = \frac{\rho_{1240} - \rho_{858}}{\rho_{1240} + \rho_{858}}$	b5, b2
NIR-SWIR	Normalised difference infrared index	Vegetation water content	$NDII = \frac{\rho_{858} - \rho_{1650}}{\rho_{858} + \rho_{1650}}$	b2, b6
	Normalised difference shortwave-infrared index	Identification of burn scar	$NDSWIR = \frac{\rho_{858} - \rho_{1640}}{\rho_{858} + \rho_{1640}}$	b2, b6
	Shortwave infrared water stress index	Vegetation water content	$SIWSI = \frac{\rho_{1640} - \rho_{858}}{\rho_{1640} + \rho_{858}}$	b6, b2
	Normalised difference water index	Change on lake shorelines	$NDWI_3 = \frac{\rho_{858} - \rho_{1640}}{\rho_{858} + \rho_{1640}}$	b2, b6
	Normalised burn ratio	Burn severity	$NDWI = \frac{\rho_{858} - \rho_{2130}}{\rho_{858} + \rho_{2130}}$	b2, b7
	VIS-SWIR	Normalised difference water index	Open water detection	$NDWI = \frac{\rho_{555} - \rho_{1640}}{\rho_{555} + \rho_{1640}}$
Modified NDWI		Water detection	$MNDWI = \frac{\rho_{555} - \rho_{1640}}{\rho_{555} + \rho_{1640}}$	b4, b6
Normalised difference pond index		Detection of small water bodies	$MDPI = \frac{\rho_{1640} - \rho_{555}}{\rho_{1640} + \rho_{555}}$	b6, b4
Normalised difference water index		Water end member selection	$NDWI = \frac{\rho_{645} - \rho_{1640}}{\rho_{645} + \rho_{1640}}$	b1, b6
Normalised difference water index		Open water detection	$NDWI = \frac{\rho_{555} - \rho_{2130}}{\rho_{555} + \rho_{2130}}$	b4, b7
Normalised difference flood index_2		Flood condition	$NDFI_2 = \frac{\rho_{645} - \rho_{2130}}{\rho_{645} + \rho_{2130}}$	b1, b7
VIS-NIR	Normalised difference water index	Open water detection	$NDWI = \frac{\rho_{555} - \rho_{858}}{\rho_{555} + \rho_{858}}$	b4, b2
	Normalised difference water index	Open water detection	$NDWI = \frac{\rho_{555} - \rho_{1240}}{\rho_{555} + \rho_{1240}}$	b4, b5
	Normalised difference flood index_1	Flood condition	$NDFI_1 = \frac{\rho_{645} - \rho_{1240}}{\rho_{645} + \rho_{1240}}$	b1, b5
	Normalised difference vegetation index	Water Mapping	$NDVI = \frac{\rho_{858} - \rho_{645}}{\rho_{858} + \rho_{645}}$	b2, b1

### 3.1.2. Algoritmo Open Water Likelihood (OWL)

O algoritmo OWL foi proposto por Guerschman et al. (2011) e representa a probabilidade da presença de água parada dentro de um pixel. A presente metodologia foi utilizada no mapeamento de áreas inundadas e planícies de inundações na Austrália e na comparação de dados diários ou composição de 8-dias (Chen et al. 2013). A formulação do OWL é expressa pela seguinte equação:

$$OWL = (1 + \exp(f))^{-1}$$

onde

$$f = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i * x_i$$

e

$a_0$	-3.41375620
$a_1$	-0.000959735270
$a_2$	0.00417955330
$a_3$	14.1927990
$a_4$	-0.430407140
$a_5$	-0.0961932990
$x_1$	SWIR (Shortwave-infrared) band6 (reflectance $\times$ 1000)
$x_2$	SWIR band7 (reflectance $\times$ 1000)
$x_3$	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index = (band2-band1)/(band2 + band1); Townshend and Justice 1986)
$x_4$	NDWI (Normalized Difference Water Index = (band2-band6)/(band2 + band6); Gao 1996), and
$x_5$	MrVBF (Multiresolution Valley Bottom Flatness; Gallant and Dowling 2003).

A imagem resultante a partir do emprego da formulação detecta as áreas inundáveis a partir do estabelecimento de um valor limite.

### 3.1.3. Emprego da Análise de Componentes Principais (ACP)

Aires et al. (2014) realizaram uma análise da variabilidade espaço-temporal da área de inundação do Delta do Níger, utilizando imagens GIEMS e MODIS e análise de componentes principais. A ACP permite evidenciar a variabilidade proveniente da

inundação, que pode ser caracterizada por um número limitado de comportamentos temporais relacionados à estação, tais como duração ou datas de início e fim da estação de inundação. A ACP pode ser utilizada também para compensar os valores faltantes ou reduzir os ruídos das séries temporais.

De Almeida et al (2015) utilizaram ACP para um conjunto de dados anual completo de imagens EVI2 filtradas (com base numa média de 12 anos no período 2001-2012) na cobertura vegetal do Pantanal. Houve uma concentração de variância de cerca de 99% nas três primeiras componentes, com as respectivas respostas de carga e distribuições (máximo, mínimo e alterações no sinal das cargas de autovetores) correspondentes às interrupções sazonais mais significativas. As três primeiras componentes principais mostraram os aspectos essenciais da variabilidade espaço-temporal da fenologia local, ou seja, o verde cumulativo ao longo do ano, a senescência tardia e mais generalizada associada ao clímax da estação seca e a senescência precoce associada a porções arenosas.

#### ***3.3.4. Classificação não supervisionada***

Chen et al. (2014) utilizaram imagens do MODIS NDVI de 16 séries de séries temporais no período 2000-2012 para classificar os tipos de cobertura de zonas úmidas. Os autores adotaram a classificação não supervisionada ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis) com números variáveis de clusters e uma estatística de divergência transformada (TD), para implementar a classificação anual da série temporal de NDVI suavizada.

#### ***3.3.5. Algoritmo Contextual***

As lagoas podem ser facilmente reconhecidas por análise visual de composições coloridas devido ao forte contraste com o meio ambiente. Para aproveitar esta característica, Gond et al. (2004) utilizaram um índice de contraste local obtido a partir

do cálculo da diferença entre a média regional (obtida em uma janela móvel de cálculo) e o valor do pixel (Thomas et al., 1981). A superfície deve ser grande para ser quase insensível aos valores das lagoas particulares. Neste estudo, o tamanho da janela era de 45x45 pixels (2025 km<sup>2</sup>). O índice de contraste local fornece valores próximos de zero para as superfícies típicas das paisagens e de zero para as áreas com características específicas. Limiares simples são então suficientes para selecionar consistentemente todas as superfícies de características específicas, como é o caso dos corpos de água.

## **4. ESCOLHA DAS IMAGENS PARA O MAPEAMENTO DAS ÁREAS INUNDÁVEIS**

A partir do embasamento dos artigos citados na pesquisa bibliográfica, foram avaliados diversos satélites atuais para atender os objetivos propostos para a realização do projeto. Seguem abaixo a descrição e as razões para escolha das imagens Sentinel para definição das áreas indubitáveis da União.

### **4.1 Descrição das imagens Sentinel-1**

Entre as novas missões de constelações de Satélites lançados ultimamente, o Sentinel possui as características necessárias para o desenvolvimento do projeto. As missões Sentinel, desenvolvida pela agência espacial europeia (ESA) é composta por dois satélites em cada missão contendo imageamento ótico e de radar (polarimétrico e interferométrico). O projeto terá 6 missões, porém até o momento apenas os satélites Sentinel 1A, 1B, 2A possuem imagens disponíveis na web e o satélite 3 A começou neste mês a disponibilizar as imagens. Os produtos de dados SENTINEL são disponibilizados de forma sistemática e gratuita para os usuários. Os dados de radar serão entregues dentro de uma hora após a recepção para casos de emergência em tempo quase real, dentro de três horas para áreas prioritárias e dentro de 24 horas para dados arquivados.

#### ***4.1.1 Imagens Sentinel 1A e 1B (SAR)***

A missão Sentinel -1 é composta dos satélites Sentinel 1-A (lançado em 2014 e 1-B (lançado em 2016). Estes satélites fazem o imageamento por radar a partir da Banda C. O satélite possui um complexo sistema de radar que transmite e recebe as ondas eletromagnética em polarização simples (HH ou VV) e dual polarização (HH+HV ou VV+VH) que permite melhorar os resultados da classificação de diferentes tipos de alvos. O instrumento SAR adquire as imagens em quatro módulos de imageamento:

Stripmap (SM) – Adquire imagens em uma faixa de 80 km do terreno com resolução de 5m x 5m. Este produto só está disponível sob demanda em casos excepcionais para apoiar ações de gerenciamento de emergência. Possui polarização simples HH e VV e dual polarização HH+VV e VV+VH.

Interferometric Wide swath (IW) - Os dados são adquiridos em três faixas usando a técnica de imagem de observação do terreno com varredura progressiva (TOPSAR). Esta técnica aumenta a resolução geométrica das imagens, a partir da redução dos ruídos na imagem devido aos retornos ambíguos do sinal, assegurando o alinhamento de pares interferométricos, (De Zan and Guarnieri 2006). IW é o modo operacional principal da SENTINEL-1 sobre a superfície terrestre. Possui polarização simples HH e VV e dual polarização HH+VV e VV+VH.

Extra Wide (EW) - Os dados são adquiridos em cinco faixas usando a técnica de imagem TOPSAR. O modo EW fornece cobertura de faixas muito grande (400 km) com resolução espacial variando de 20 m a 40 m. O modo EW destina-se principalmente ao uso em zonas polares, para monitoramento dos derrames de óleo no mar. Como o IW, o modo EW também pode ser usado para interferometria, uma vez que compartilha as mesmas características. Possui polarização simples HH e VV e dual polarização HH+VV e VV+VH.

Wave (WV) - O modo Wave adquire dados em cenas de 20 km por 20 km, com resolução espacial de 5 m por 5 m, a cada 100 km ao longo da órbita. É adquirida alternadamente em dois ângulos de incidência diferentes. As cenas no mesmo ângulo de incidência são separadas por 200 km. WV é o modo operacional do SENTINEL-1 utilizado para mapeamento de oceano. Os produtos de dados SENTINEL-1 distribuídos pela ESA são:

- Nível-0 - para uso específico (dado bruto).
- Nível-1 – Single Look Complex (SLC) - Imagens complexas com distribuição limitada a áreas relevantes.
- Nível-1 – Ground Range Detected (GRD) - Imagens projetadas para o sistema WGS84. A projeção do elipsoide dos produtos GRD é corrigida usando a altura do terreno especificada. Produto sistematicamente distribuído.
- Nível 2 (OCN) - Aquisição de dados geofísicos do oceano (sistematicamente distribuídos).

O conjunto de satélites SENTINEL-1 A e 1 B consegue mapear a superfície terrestre no modo IW uma vez a cada 6 dias no equador, porém devido ao espaçamento da órbita variar com a latitude, o período de revisão é significativamente maior em latitudes maiores.

#### ***4.1.2 Escolha do produto para utilização no projeto***

As especificações dos produtos Sentinel foram avaliados para a identificação da mais adequada para o projeto de pesquisa. A **Tabela 3** mostra as respectivas aplicações para cada produto.

Para atender aos objetivos do projeto foram escolhidos o produto Interferometric Wide swath (IW), nível 1 (GRD), utilizado especificamente para o monitoramento de enchentes. Este é o modo de operação principal para a maioria das aplicações em terra. Executa o mapeamento com tecnologia TOPSAR com polarização simples HH e VV e dual polarização HH+VV e VV+VH.

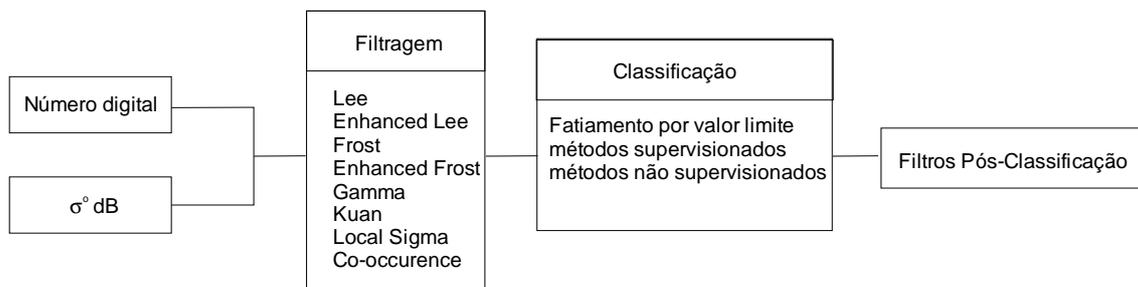
**Tabela 3** – Aplicação específica para cada módulo.

Aplicação	SM	IW	EW	WV
Ártico		X	X	
Vigilância de navios		X	X	
Monitoramento de poluição de óleo		X	X	
Ventos marinhos				X
Floresta		X		
Agricultura		X		
Mapeamento urbano		X		
<b>Monitoramento de enchentes</b>	X	X		
Análise de terremotos	X	X		
Escorregamento e monitoramento de vulcões	X	X		

Fonte: ESA, 2017.

## 5. METODOLOGIA

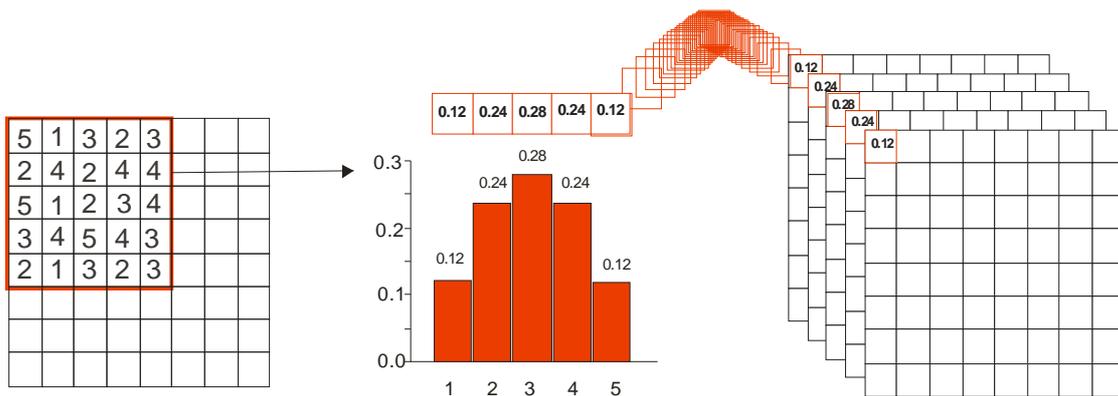
Diferentes proposições foram realizadas para o tratamento de imagens radar. No entanto, os procedimentos mais utilizados compreendem uma sequência que utiliza a imagem como número digital ou coeficiente de retroespalhamento  $\sigma^{\circ}$ dB seguida de uma filtragem, classificação e o emprego de filtros pós-classificação.



**Figura 5.1.** Sequência do processo de classificação das imagens de radar.

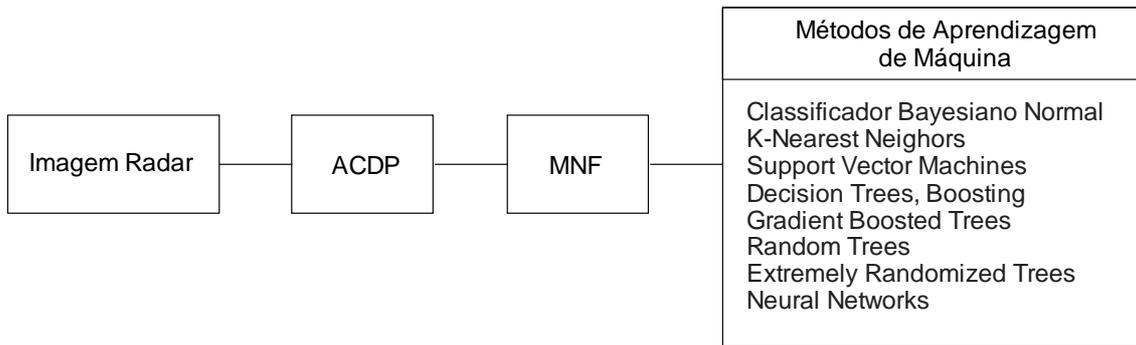
No presente projeto além dessas combinações tradicionais será utilizada uma nova abordagem de tratamento das imagens radar que permite realçar a imagem e eliminar os ruídos utilizando o método de Análise de Componentes de Densidade de Probabilidade (ACDP) combinado com a transformação Minimum Noise Fraction (de Carvalho Júnior et al., 2014).

O método ACDP estabelece um histograma de frequência para uma janela móvel que transcorre a imagem, distribuindo o valor de cada categoria do histograma (intervalo de valores) em uma banda específica (**Figura 5.2**). Desta forma, gera-se uma sequência de imagens, onde a frequência de cada categoria do histograma é representada por uma imagem. No método ACDP, as seguintes variáveis são definidas pelo usuário: (a) número de categorias presentes no histograma e (b) o tamanho da janela.



**Figura 5.2** – Procedimento para gerar as componentes de densidade de probabilidade: uma janela móvel (no exemplo com dimensão de 5 x 5) calcula o histograma de frequência e estabelece uma sequência de imagens onde cada imagem representa uma componente (Fonte: CARVALHO JÚNIOR et al., 2012).

Com o resultado da ACDP de cada imagem SAR, efetua-se a transformação (MNF) (Green et al, 1988) cujo objetivo é reduzir a dimensionalidade dos dados de acordo com a qualidade da imagem, melhorando a identificação da relação sinal-ruído (Carvalho Júnior et al., 2012; Carvalho Júnior et al, 2002). Além disso, para o processo de classificação serão utilizados algoritmos de aprendizagem de máquina ainda pouco testados em imagens de radar: Classificador Bayesiano Normal, K-Nearest Neighbors, Support Vector Machines, Decision Trees, Boosting, Gradient Boosted Trees, Random Trees, Extremely Randomized Trees e Neural Networks. Portanto uma nova sequência de processamento será testada para as imagens (**Figura 5.3**)



**Figura 5.3** - Sequência proposta para o processamento de imagens de radar para identificação das áreas inundáveis.

## Referências

- Aires, F., Papa, F., Prigent, C., Crétaux, J. F., & Berge-Nguyen, M. (2014). Characterization and Space–Time Downscaling of the Inundation Extent over the Inner Niger Delta Using GIEMS and MODIS Data. *Journal of Hydrometeorology*, 15(1), 171-192.
- Alsdorf, D., Bates, P., Melack, J., Wilson, M., Dunne, T., 2007a. Spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. *Geophysical Research Letters* 34 (8), L08402. doi:10.1029/2007GL029447.
- Alsdorf, D., Birkett, C., Dunne, T., Melack, J., Hess, L., 2001. Water level changes in a large Amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry. *Geophysical Research Letters* 28 (14), 2671–2674. doi:10.1029/2001GL01296250.
- Alsdorf, D., Dunne, T., Melack, J., Smith, L., Hess, L., 2005. Diffusion modeling of recessional flow on central Amazonian floodplains. *Geophysical Research Letters* 32 (21), L21405. doi:10.1029/2005GL024412.
- Alsdorf, D., Han, S.-C., Bates, P., Melack, J., 2010. Seasonal water storage on the Amazon floodplain measured from satellites. *Remote Sensing of Environment* 114 (11), 2448–2456. doi:10.1016/j.rse.2010.05.020.
- Alsdorf, D.E., 2003. Water storage of the central Amazon floodplain measured with GIS and remote sensing imagery. *Annals of the Association of American Geographers* 93 (1), 55–66. doi:10.1111/1467-8306.93105.
- Alsdorf, D.E., Lettenmaier, D.P., 2003. Tracking fresh water from space. *Science* 301 (5639), 1491–1494. doi:10.1126/science.1089802.
- Alsdorf, D.E., Melack, J.M., Dunne, T., Mertes, L.A.K., Hess, L.L., Smith, L.C., 2000. Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain. *Nature* 404 (6774), 174–177. doi:10.1038/35004560.

- Alsdorf, D.E., Rodriguez, E., Lettenmaier, D.P., 2007b. Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics* 45 (2), RG2002. doi:10.1029/2006RG000197.
- Asner, G. P. (2001). Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3855-3862.
- Augusteijn, M. F., & Warrender, C. E. (1998). Wetland classification using optical and radar data and neural network classification. *International Journal of Remote Sensing*, 19(8), 1545-1560.
- Bartholomé, E., 2006. The VEGETATION mission. In: Bartholomé, E. (Ed.), *VGT4 Africa User Manual*, first ed. Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg.
- Betbeder, J., Rapinel, S., Corpetti, T., Pottier, E., Corgne, S., & Hubert-Moy, L. (2014). Multitemporal classification of TerraSAR-X data for wetland vegetation mapping. *Journal of applied remote sensing*, 8 (1), 083648-083648.
- Boschetti, M., Nutini, F., Manfron, G., Brivio, P. A., & Nelson, A. (2014). Comparative analysis of normalised difference spectral indices derived from MODIS for detecting surface water in flooded rice cropping systems. *PloS one*, 9(2), e88741.
- Bourgeau-Chavez, L. L., E. S. Kasischke, S. M. Brunzell, J. P. Mudd, K. B. Smith, A. L. Frick. (2000). Analysis of spaceborne SAR data for wetland mapping and flood monitoring in Virginia riparian ecosystems. *International Journal of Remote Sensing* 22: 3665–3687.
- Bourgeau-Chavez, L. L., Smith, K. B., Brunzell, S. M., Kasischke, E. S., Romanowicz, E. A., & Richardson, C. J. (2005). Remote monitoring of regional inundation patterns and hydroperiod in the greater everglades using synthetic aperture radar. *Wetlands*, 25(1), 176-191.
- 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, 1817–1835.

- De Carvalho Júnior OA, Carvalho APF, Meneses PR, Guimarães RF (2002). Classificação e Eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 20 (1). doi:
- De Carvalho Júnior OA, Maciel LMM, De Carvalho APF, Guimarães RF, Silva CR, Gomes RAT, Silva NC (2014). Probability Density Components Analysis: A New Approach to Treatment and Classification of SAR Images. *Remote Sensing* (6): 2989-3019. doi: 10.3390/rs6042989.
- De Carvalho Júnior, O. A., Carvalho, A. P., Meneses, P. R., & Guimarães, R. F. (2002). Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise seqüencial da transformação por fração de ruído mínima. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20(1), 31-41.
- De Zan F, Guarnieri AM (2006) TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 44:2353–2360.
- ESA: Sentinel 1, retrieved from Copernicus, observing the Earth: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>, last access 23 April 2017.
- Evans, T. L., Costa, M. P. F., Telmer, K. H., & Silva, T. S. F. (2010). Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to map land cover and seasonal inundation in the Brazilian Pantanal. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3, 560–575.
- Fensholt R, Sandholt I (2003) Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sens Environ* 87: 111–121. doi:10.1016/j.rse.2003.07.002.
- Frappart, F., Calmant, S., Cauhope, M., Seyler, F., Cazenave, A., 2006. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon Basin. *Remote Sensing of Environment* 100 (2), 252–264. doi:10.1016/j.rse.2005.10.027.
- Frappart, F., Seyler, F., Martinez, J.M., Leon, J.G., Cazenave, A., 2005. Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. *Remote Sensing of Environment* 99 (4), 387–399. doi:10.1016/j.rse.2005.08.016.

- Gao B (1996) NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens Environ* 58: 257–266.
- Gerard F, Plummer S, Wadsworth R, Sanfeliu AF, Iliffe L, et al. (2003) Forest Fire Scar Detection in the Boreal Forest With Multitemporal SPOTVEGETATION Data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 41: 2575–2585.
- Ghedira, H., Bernier, M., Ouarda, T. B. M. J. (2000). Application of neural networks for wetland classification in RADARSAT SAR imagery. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International (Vol. 2, pp. 675-677)*. IEEE.
- Gond, V., Bartholomé, E., Ouattara, F., Nonguierma, A., Bado, I., 2004. Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarqué sur SPOT-4. *Int. J. Remote Sens.* 25 (5), 987–1004
- Green AA, Berman M, Switzer P, Craig MD (1988). A Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 26 n. 1. p. 65-74.
- Guerschman JP, Warren G, Byrne G, Lymburner L, Mueller N, Van-Dijk A (2011) MODIS-based standing water detection for flood and large reservoir mapping: algorithm development and applications for the Australian continent. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship Report, Canberra, Australia
- Haas, E. M., Bartholomé, E., & Combal, B. (2009). Time series analysis of optical remote sensing data for the mapping of temporary surface water bodies in sub-Saharan western Africa. *Journal of Hydrology*, 370(1), 52-63.
- Hamilton, S. K., Kellndorfer, J., Lehner, B., & Tobler, M. (2007). Remote sensing of floodplain geomorphology as a surrogate for biodiversity in a tropical river system (Madre de Dios, Peru). *Geomorphology*, 89(1), 23-38.

- Hardisky, M. A., Klemas, V., & Smart, R. M. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 77-83.
- Hess, L. L., J. M. Melack, D. S. Simonett. 1990. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. *International Journal of Remote Sensing* 11:1313–1325.
- Hess, L. L., J. M. Melack, S. Filoso, Y. Wang. 1995. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33:896–904.
- Hess, L. L., Melack, J. M., Novo, E. M., Barbosa, C. C., & Gastil, M. (2003). Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. *Remote sensing of environment*, 87(4), 404-428
- Hess, L.L., Melack, J.M., Filoso, S., Wang, Y., 1995. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33 (4), 896–904. doi:10.1109/36.406675.
- Hess, L.L., Melack, J.M., Novo, E., 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), 404–428. doi:10.1016/j.rse.2003.04.001.
- Jones, K., Lanthier, Y., van der Voet, P., van Valkengoed, E., Taylor, D., & Fernández-Prieto, D. (2009). Monitoring and assessment of wetlands using Earth Observation: The GlobWetland project. *Journal of environmental management*, 90(7), 2154-2169.
- Jung, H.C., Alsdorf, D., 2010. Repeat-pass multi-temporal interferometric SAR coherence variations with Amazon floodplain and lake habitats. *International Journal of Remote Sensing* 31 (4), 881–901. doi:10.1080/01431160902902609.
- Kasischke, E., Bourgeau-Chavez, L. (1997). Monitoring south Florida wetlands using ERS-1 SAR imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63, pp. 281–291

- Key CH, Benson NC (1999) Measuring and remote sensing of burn severity: the CBI and NBR. In: Neuenschwander LF, Ryan KC, editors. Joint Fire Science Conference and Workshop, Vol. II, Boise, ID, 15–17 June 1999. Boise, University of Idaho and International Association of Wildland Fire. p. 284.
- Lacaux JP, Tourre YM, Vignolles C, Ndione JA, Lafaye M (2007) Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sens Environ* 106: 66–74.
- Martinez, J.M., Le Toan, T., 2007. Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. *Remote Sensing of Environment* 108 (3), 209–223. doi:10.1016/j.rse.2006.11.012.
- Ouma YO, Tateishi R (2006) A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: an empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data. *Int J Remote Sens* 27: 3153–3181. doi:10.1080/01431160500309934.
- Pappenberger, F., Frodsham, K., Beven, K., Romanowicz, R., & Matgen, P. (2007). Fuzzy set approach to calibrating distributed flood inundation models using remote sensing observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(2), 739-752.
- Parmuchi, M. G., Karszenbaum, H., & Kandus, P. (2002). Mapping wetlands using multi-temporal RADARSAT-1 data and a decision-based classifier. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(2), 175-186.
- Ramsey III, E., (1998). Radar remote sensing of wetlands. *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*, R. Lunetta, and C. Elvidge (Eds). Chapter 13, pp. 211–243 (Chelsea, MI: Ann Arbor Press)
- Rosenqvist A, Forsberg B, Pimentel T, Rauste Y, Richey J. 2002. The use of spaceborne radar data to model inundation patterns and trace gas emissions in the Central Amazon floodplain. *International Journal of Remote Sensing* 23: 1303–1328.

- Rosenqvist, A., Forsberg, B.R., Pimentel, T., Rauste, Y.A., Richey, J.E., 2002. The use of spaceborne radar data to model inundation patterns and trace gas emissions in the central Amazon floodplain. *International Journal of Remote Sensing* 23 (7), 1303–1328. doi:10.1080/01430060110092911.
- Rouse JW, Hass RH, Deering DW, Sehell JA (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation.
- Schmullius, C., Evans, D., (1997). Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology, and oceanography: a tabular status quo after SIR-C/X-SAR. *International Journal of Remote Sensing*, 18, pp. 2713–2722.
- Seyler, F., Calmant, S., Da Silva, J., Filizola, N., Cochonneau, G., Bonnet, M.P., Costi, A.C.Z., 2009. Inundation risk in large tropical basins and potential survey from radar altimetry: example in the Amazon Basin. *Marine Geodesy* 32 (3), 303– 319. doi:10.1080/01490410903094809.
- Shiyou, S., Yang, C., Ruihua, G., Wang, Z., Chen, Z., & Li, Y. (2011). Spatial and Temporal Expansion of Reed Marsh in the Wuliangshuai Wetland in Inner Mongolia. In *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability* (pp. 4840-4848).
- 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, 1998–2010.
- Simard, M., Saatchi, S. S., & De Grandi, G. (2000). The use of decision tree and multiscale texture for classification of JERS-1 SAR data over tropical forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2310-2321.
- Whitcomb, J., Moghaddam, M., McDonald, K., Kellndorfer, J., & Podest, E. (2009). Mapping vegetated wetlands of Alaska using L-band radar satellite imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35(1), 54-72.
- Wilson EH, Sader SA (2002) Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sens Environ* 80: 385–396.

Woodhouse, I. H. (2006). Introduction to microwave remote sensing. Boca Raton: CRC Press.

Xu H (2006) Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int J Remote Sens* 27: 3025–3033. doi:10.1080/01431160600589179.

Zhang, Y., Wang, C., Wu, J., Qi, J., & Salas, W. A. (2009). Mapping paddy rice with multitemporal ALOS/PALSAR imagery in southeast China. *International journal of Remote sensing*, 30 (23), 6301-6315.