

Bases teóricas para o uso de imagens SAR no estudo de áreas alagadas

Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515
12201-970 - São José dos Campos, SP, Brasil
evlyn@dsr.inpe.br

Resumo. Neste artigo procurou-se apresentar as bases teóricas para o uso de imagens SAR no estudo de áreas alagadas. Para isso, fez-se uma breve história da evolução dos sistemas de RADAR, com a preocupação de ressaltar as diferenças dos dados disponíveis no tocante às bandas de atuação, polarização, resolução espacial e a faixa imageada. Procurou-se também apresentar de forma resumida as principais características dos sistemas de radar que os tornam úteis ao estudo de áreas alagadas. São apresentadas também as características das imagens SAR, tais como frequência, polarização, ângulo de incidência e de direção de imageamento e sua influência no processo de extração de informações. O artigo examina também as características dos alvos que compõe os ambientes aquáticos e como elas afetam o sinal registrado nas imagens SAR. Finalmente são resumidos dois exemplos de aplicação de imagens SAR ao estudo de áreas alagadas da região amazônica cuja abordagem pode ser facilmente empregada no Pantanal.

Palavras-chave: imagens de radar de abertura sintética, áreas alagadas

Abstract. This paper presents the theoretical background for the use of SAR images in wetland. First, a brief history of RADAR system evolution is presented, having in mind to stress the different types of available data regarding. Second, Radar system features were presented in a way to highlight their potential use in wetland studies. The paper also presents the SAR image features, such as frequency, polarization, beam angles (incidence and azimuth) and their influence on the information content. The paper also analyses the main features of the wetland components and how they interact with microwave pulse. Finally two examples of applications are presented. In the selection of the examples it was stressed their applicability to Pantanal.

Key-words: synthetic aperture radar, wetlands

1. Sistemas RADAR: um breve histórico

As imagens de radar de abertura sintética são produzidas por sistemas sensores ativos que operam na faixa de microondas conhecidas por ondas de rádio. O nome RADAR tem sua origem ligada aos sistemas de detecção de objetos e determinação de sua distância a partir de medidas tomadas na região das microondas. Esses sistemas foram desenvolvidos em países de língua inglesa, e a palavra RADAR é um acrônimo derivado da expressão **Radio Detection and Ranging**.

A utilização de radiação de microondas para o sensoriamento remoto da superfície terrestre é relativamente recente. Os primeiros sensores imageadores operando na região de microondas só se tornaram operacionais no início da década de 1960. Embora a primeira demonstração do uso de radiação de microondas para a detecção de navios surgisse em 1903, apenas em 1920 começaram a ser desenvolvidos os primeiros sistemas de radar para a detecção de navios e aviões.

As primeiras aplicações científicas de um sistema ativo de radar, embora não imageador ocorreram em 1925 com a finalidade de se determinar a altura da ionosfera. Nesse sistema, um pulso de radiação era emitido e, seus ecos refletidos pela ionosfera eram registrados por uma estação localizada a alguns quilômetros de distância.

Somente a partir da década de 30 é que começaram a se desenvolver radares para a detecção de objetos mais próximos da superfície terrestre. De acordo com Ulaby et al. (1986), a primeira vez em que se aplicou com sucesso um sistema de radar para detecção de objetos foi em 1936. Estes sistemas eram localizados na terra, e permitiam que um pulso de radiação fosse dirigido para o alto, sendo detectado o sinal de retorno contendo a informação sobre a presença de aviões no campo de visado do sensor.

Ao término da II Guerra Mundial já haviam sido desenvolvidos sistemas de radar aerotransportados capazes de produzir uma imagem do terreno. As imagens geradas eram bastante rudimentares com grandes distorções geométricas. Com o desenvolvimento do sistema PPI (Plan-position indicator) elas passaram a menos distorções. Esse sistema permitia o posicionamento dos objetos num plano a partir do uso de uma antena cujo feixe podia ser girado 360 graus em torno do avião produzindo uma imagem do terreno num tubo de raios catódicos. O conteúdo de informações das imagens, entretanto, era relativamente pequeno, mostrando apenas duas ou três intensidades de sinal que podiam ser associadas a navios ou aviões, terra ou cidades e água.

Por volta de 1950, iniciou-se o desenvolvimento de um novo tipo de radar, o radar de visada lateral (side-looking airborne radar), conhecido por SLAR. Com este tipo de sistema, tornou-se possível obter uma resolução espacial maior por que puderam ser construídas e instaladas antenas maiores, as quais eram colocadas paralelamente à fuselagem do avião. O processo de varredura já havia sido desenvolvido para os PPI através da rotação da antena. Com o SLAR, a varredura foi obtida a partir do deslocamento da aeronave cuja antena produzia um feixe fixo com apontamento lateral. Como a varredura do terreno era contínua, o sinal passou a ser registrado em filmes. Muitos sistemas SLAR foram desenvolvidos na

década de 1950, operando em diferentes bandas, e produzindo imagens de alta resolução. Entretanto sua utilização era especificamente restrita a aplicações militares. Em 1952 foi desenvolvido um sistema conhecido por "Doppler beam-sharpening" que permitia utilizar o efeito doppler para produzir um feixe de antena mais estreito, dando origem ao protótipo do que seria o radar de abertura sintética. Apesar de esses desenvolvimentos tecnológicos terem sido realizados na década de 50, a sua difusão só ocorre muito mais tarde.

Apenas em 1964 esta tecnologia se tornou disponível para aplicações civis. Pela primeira vez, em 1964, foi realizada uma cobertura extensa da superfície terrestre pelo sistema americano AN/APQ-9. Este sistema era um radar de abertura real, com comprimento de onda de 0.86 cm, a qual permitia recobrir uma faixa no terreno de 20 km, com uma resolução espacial de 23 km x 9,4 km com uma aeronave sobrevoando a altitude de 6 km. Esse sistema foi sucessivamente aperfeiçoado até que no fim da década já existiam sistemas SLAR sendo usados rotineiramente para o levantamento de recursos naturais com capacidade de recobrimento de faixas mais amplas do terreno e apresentando resolução espacial mais fina.

O Brasil foi um dos primeiros países do mundo a se beneficiar da tecnologia de radar para o levantamento dos recursos naturais de seu vasto território através do projeto RADAM. A partir de 1970, o Ministério das Minas e Energia do Brasil realizou o levantamento da Amazônia com um sistema SLAR operando na banda X., o qual foi posteriormente estendido a todo o território brasileiro. Tais imagens foram utilizadas para o mapeamento da cobertura vegetal, solos e geologia, e estão sendo aproveitados até o presente em estudos de detecção de mudanças ambientais.

O primeiro sistema de radar de abertura sintética orbital foi levado a bordo do satélite Seasat, lançado pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) no ano de 1978, com o objetivo de obter informações sobre os oceanos e sobre o gelo ártico. O envio de dados foi descontinuado três meses após o seu lançamento, embora a qualidade das imagens obtidas pelo sistema tenha excedido a expectativa da comunidade de usuários. O SAR a bordo do Seasat operava na banda L, com polarização HH. Recobria uma faixa de 100 km com uma resolução espacial de 18 m em azimute e 18 metros em range. Durante o tempo em que operou foram gravadas aproximadamente 40 horas de dados. A interrupção da aquisição de dados foi atribuída a uma falha do sistema elétrico. A partir de então a NASA passou a realizar missões sucessivas com o ônibus espacial (Space Shuttle) visando a adquirir dados SAR sobre regiões específicas e com o objetivo de avançar o conhecimento científico e tecnológico ligado à sua utilização operacional. Na década de 1980 foram realizadas duas missões de SIR-A e SIR-B. Em 1994 e em 2000 foram realizadas também missões com sistemas SAR mais sofisticados, com características precursoras dos sistemas SAR que se encontram a bordo de satélites lançados recentemente ou com lançamentos programados para os próximos anos.

Desde março de 1991 tornaram-se disponíveis os dados SAR de um sistema colocado a bordo do satélite Almaz-1 da antiga agência espacial soviética (Glavkosmos). O SAR a bordo do Almaz 1 apresentava como características básicas a operação na banda S (10 cm), polarização HH, ângulo de incidência passível de ser selecionado entre 30 e 60 graus. A faixa imageada pelo sistema também variava entre 20 e 45 km, com resolução transversal entre 15 e 30 metros e azimutal de 15 metros.

Naquele mesmo ano, em Julho, a European Space Agency (ESA) colocou em órbita o primeiro satélite europeu de sensoriamento remoto- European Remote Sensing Satellite (ERS-1) cuja carga útil incluía o Active Microwave Instrument (AMI) operando como SAR na banda C (5,66 cm) com polarização VV, e recobrindo uma faixa de 100 km com resolução espacial de 30 metros. O ERS-2 foi lançado alguns anos mais tarde com as mesmas

características do ERS-1 com o objetivo de garantir a continuidade dos dados e a possibilidade de uso das mesmas ferramentas analíticas.

A agência espacial japonesa (JAXA) também colocou em órbita em 1992 o satélite JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite) com um SAR operando na banda L (23,6 cm) e com polarização HH. Ao contrário do AIS da série ERS que priorizou aplicações oceanográficas, o SAR desenvolvido pelos japoneses era voltado prioritariamente para aplicações geológicas. O ângulo de incidência da antena é de 35 graus, e a largura da faixa imageada de 75 km, com uma resolução azimutal e transversal (range) de 18 metros. Todos esses satélites já se encontram fora de operação, mas possuem amplas bases de dados com cobertura global.

Embora com lançamento tardio em relação aos demais sensores ativos de microonda a RADARSAT International e a Canadian Space Agency com a cooperação do Canadian Centre for Remote Sensing colocaram em órbita em Novembro de 1995 o satélite RADARSAT com um único sensor a bordo, um SAR operando na banda C. Apesar do lançamento tardio, o RADARSAT, tinha como principal característica a aquisição de imagens na faixa das microondas de modo operacional para atender diversas necessidades das diferentes áreas de aplicação de sensoriamento remoto. O RADARSAT ainda se encontra em operação e, ao contrário dos satélites mencionados anteriormente, foi lançado como um satélite comercial. Sua configuração visou principalmente atender às necessidades de informação voltadas para a navegação no Ártico, mas os seus dados se mostraram úteis para inúmeras outras aplicações (Costa, 1995, Costa et al., 1998, Novo et al, 1998; Costa, 2000).

Em 2002, foi lançado o satélite Envisat (Environmental Satellite) com um modelo mais avançado de radar de abertura sintética, o ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), operando na banda C, mas com duas polarizações (HH e VV) pela ESA como uma ampliação dos objetivos operacionais do programa ERS. Esse satélite ainda se encontra em operação e suas imagens têm sido usadas com sucesso em várias aplicações.

Como um avanço ao SAR que operou a bordo do satélite JERS-1, em 2006 a JAXA lançou um satélite avançado para observação da terra (Advanced Land Observing Satellite-ALOS), com vários sensores, dentre os quais o Phased Array type L-band Synthetic Aperture RADAR (PALSAR). O uso de um arranjo de antenas (phased array) permite que a fase relativa do sinal que chega à antena seja registrada e transformada em informação sobre a superfície. O PALSAR é um SAR com muitas características. O PALSAR opera também na banda L (23,6 cm) e pode adquirir dados em 4 polarizações (HH, VV, HH&HV, VV&VH) com resolução espacial de 10 m, no modo de imageamento de alta resolução (Fine Resolution) que permite o recobrimento de uma faixa de 70 Km por órbita. No modo de baixa resolução espacial (ScanSAR), as imagens podem ser obtidas em duas polarizações (HH, VV) com uma resolução de 100 metros e recobrimento de faixas entre 250 a 350 km.

2. Características dos Sistemas de RADAR

a) Aquisição de dados independentemente das condições atmosféricas

Apesar de terem se desenvolvido mais recentemente, os sistemas de RADAR possuem várias características que contribuem para seu amplo uso. Uma das características mais importantes para o uso dos sensores ativos de microondas é a de que a faixa de microondas apresenta elevado coeficiente de transmissão através de nuvens permitindo a aquisição de dados independentemente das condições atmosféricas.

Segundo Ulaby et al. (1986) nuvens de gelo suficientemente densas para obstruir a transmissão de radiação visível não têm o menor efeito sobre a radiação de microondas apresentando 99 % de transmissão para comprimentos de onda maiores que 1 cm. Nuvens de

água atenuam a radiação de microondas somente em comprimentos de onda menores do que 2 cm. A partir de 4 cm o efeito deste tipo de nuvem é desprezível.

Segundo dados apresentados em Elachi (1987) a porcentagem de transmissão atmosférica nos diferentes comprimentos de onda para um sensor colocado no zênite está em torno de 80 %, na região do visível, enquanto na região das microondas, ela atinge praticamente 100 %, demonstrando que atmosfera não afeta com a mesma intensidade sua interação com os alvos da superfície terrestre.

b) Maior capacidade de penetração na cobertura vegetal do terreno.

Uma das características importantes dos sistemas de RADAR é o de permitirem a obtenção de informações do terreno através da cobertura vegetal. A radiação de microondas tem maior poder de penetração nos dosséis de vegetação e no solo quando comparada à da radiação visível e infravermelho próximo.

A capacidade de penetração da radiação de microondas no dossel depende do comprimento de onda do sistema utilizado. Para as mesmas condições de geometria de imageamento e umidade, quanto maior o comprimento de onda da radiação de microondas, maior e sua capacidade de penetração tanto nos dosséis quanto nos solos (Elachi, 1987).

c) Sinergia com os dados de outras regiões do espectro.

As variações de energia detectadas no visível e infravermelho são resultantes de processos de ressonância molecular nas camadas superficiais do solo e da vegetação, enquanto que as variações de energia detectadas na região de microondas se devem às propriedades geométricas e dielétricas dos objetos.

3. Características das imagens de radar de abertura sintética

Um radar de abertura sintética **Synthetic aperture radar** (SAR) nada mais é do que um sistema de radar em que os dados coletados pela antena são submetidos a um sofisticado processamento para simular ou “sintetizar” uma antena suficientemente grande para produzir um feixe estreito, e dessa forma melhorar a resolução espacial dos dados.

As imagens de radar apresentam características bastante distintas das imagens ópticas a começar pela grandeza radiométrica correspondente aos níveis digitais. O sinal recebido pela antena de radar é amostrado e convertido numa imagem digital. O sinal registrado em cada pixel de uma imagem SAR depende do tipo de sistema utilizado. Nos sistemas mais simples, com uma única polarização, os dados medidos são apenas a amplitude e a intensidade do sinal. Nos sistemas SAR polarimétricos o sinal registrado é na realidade uma matriz de números complexos, da qual podem ser extraídas informações sobre amplitude, fase e intensidade de energia retro-espalhada pela superfície. Para que os níveis digitais (ND) equivalentes à intensidade da energia retro-espalhada possam se tornar equivalentes à refletividade dos objetos da superfície, a imagem SAR deve ser submetida a um processo de calibração radiométrica. Nesse processo, o ND de cada pixel é transformado em coeficiente de retro-espalhamento (Ulaby et al., 1986) expresso em decibéis (dB).

As imagens SAR se caracterizam pela frequência ou comprimento de onda da radiação de microondas, pela polarização, pelo ângulo de incidência e direção do pulso emitido pela antena. O comprimento de onda é uma variável importante porque controla o coeficiente de retro-espalhamento e a profundidade de penetração da radiação nos objetos da superfície. A constante dielétrica dos objetos varia com a frequência da radiação incidente, a qual afeta o coeficiente de retro-espalhamento. Para uma superfície com rugosidade constante, há um

aumento do espalhamento segundo à quarta potência da frequência (Elachi, 1987). A **Tabela 1** mostra as bandas usadas pelos sistemas SAR disponíveis.

Tabela 1. Faixas do espectro de microondas em que operam os sistemas SAR disponíveis.

| Banda | Frequência (GHz) | Comprimento de onda (cm) |
|-------|------------------|--------------------------|
| P | 0,4 -1,0 | 30-75 cm |
| L | 1,0 -2,0 | 15- 30 cm |
| S | 2,0 -4,0 | 7,5- 15 cm |
| C | 4,0 -8,0 | 3,7 -7,5 cm |
| X | 8,0 -12,0 | 2,5 - 3,7 cm |

A polarização de uma onda eletromagnética descreve a inclinação do plano de oscilação do campo elétrico (E) em relação ao plano de propagação da onda, em função do tempo. Quando o radar envia o pulso de microondas, a radiação pode ser polarizada no plano horizontal (H) ou vertical (V). Da mesma forma, a antena pode detectar o sinal de retorno segundo o plano H ou V. Assim sendo, as imagens de radar registram não só a intensidade da energia retro-espalhada pela superfície, mas também sua capacidade de alterar a polarização da radiação. A possibilidade de analisar as propriedades polarimétricas das superfícies amplia em muito o conteúdo de informações disponíveis em imagens de radar.

Os primeiros sistemas SAR geralmente operavam com uma única polarização, enviando e recebendo o sinal segundo um dado plano, seja vertical ou horizontal. Como já mencionado anteriormente, o SAR dos satélites ERS-1 e ERS-2 operava com a polarização VV, ou seja, tanto o pulso enviado quanto o pulso recebido são polarizados verticalmente. O SAR do satélite RADARSAT opera com a polarização HH. O sistema SAR avançado a bordo do satélite ALOS tem a capacidade de produzir imagens em quatro diferentes polarizações, as paralelas já mencionadas, e as cruzadas, ou seja, com emissão do pulso na polarização horizontal e recepção na polarização vertical (HV) e vice-versa. **A Figura 1** permite observar as diferenças na intensidade do sinal retro-espalhado por diferentes alvos da superfície em função das variações na polarização da imagem. A imagem foi adquirida por um SAR aerotransportado operando na banda P, em três polarizações: HH, HV e VV.

Na **Figura 1** pode-se observar as bandas individuais em cada polarização, bem como a composição colorida. As diferenças nas propriedades polarimétricas dos objetos pode ser observada na composição colorida. Pode-se ver que em A, o sinal dominante é o da polarização vertical, porque a cor mais presente é o azul. Em B, o sinal dominante é o da banda HV, expresso pela cor verde. A predominância do sinal da banda HV sugere que a superfície imageada possui grande capacidade de despolarização das ondas eletromagnéticas incidentes. De fato, isso ocorre porque a região encontra-se recoberta por denso banco de plantas aquáticas em que domina o chamado espalhamento volumétrico. Segundo Ulaby et al. (1986) mantendo-se fixo o comprimento de onda do pulso emitido pela antena, a profundidade de penetração da radiação é afetada pela polarização. Quando as folhas se comportam como pequenos espalhadores verticais a onda polarizada horizontalmente tenderá a não interagir com o dossel, e apresentará uma maior profundidade de penetração podendo interagir com o substrato. O sinal de retorno representará, portanto, o retroespalhamento proveniente do substrato. No caso de uma onda polarizada verticalmente, haverá uma forte interação da radiação com o dossel, havendo maior atenuação da radiação pela vegetação e conseqüente redução de sua profundidade de penetração. Com isto, o sinal de retorno para a antena representará o retroespalhamento produzido predominantemente pelo dossel.

Levando em conta as observações de Ulaby et al. (1986), é interessante observar que nas duas bandas de polarização paralela, o sinal de retorno desse alvo é muito pequeno. O mesmo ocorre, em C, que representa uma área cultivada que também provoca a despolarização da radiação incidente. A diferença de intensidade de sinal, entre B e C pode ser atribuída às diferenças de substrato. Em B, o substrato é a água, que tende a refletir especularmente na direção oposta à da antena. Em C o substrato é o solo, que tende a amplificar o sinal retro-espalhado. Em D pode-se observar a superfície da água, que por refletir especularmente a radiação de microondas produz um sinal de retorno baixo.

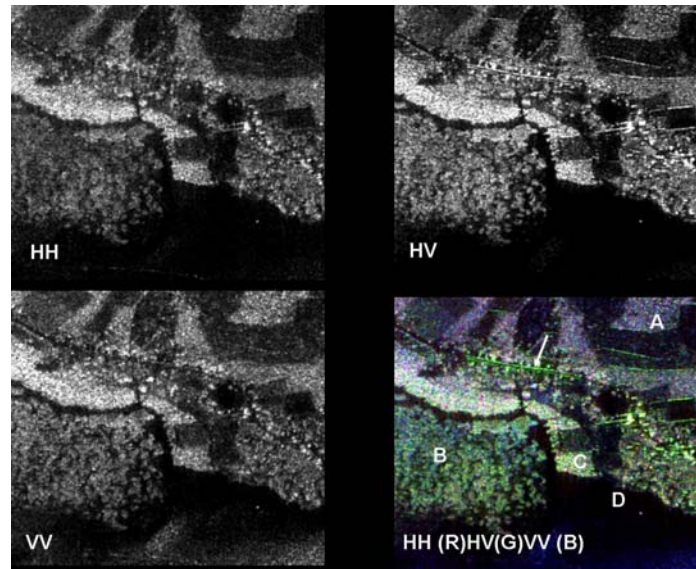


Figura 1. Efeito da polarização sobre a detecção de feições da superfície terrestre.

Outra característica importante dos dados SAR é o ângulo de incidência do pulso de radiação que é enviado para superfície. O ângulo de incidência pode ser definido como o ângulo formado entre o vetor de range e a direção vertical local (**Figura 2**). A figura mostra o imageamento segundo dois diferentes ângulos de incidência: uma incidência oblíqua (60°) e uma incidência *quase-nadir* (20°). Como a faixa imageada pelo radar recobre uma ampla região do terreno, suas imagens estão sujeitas a diferenças de retro-espalhamento em função da distância (e portanto do ângulo) entre a plataforma de aquisição e o objeto imageado. A região mais próxima à antena (*near-range*) tende a produzir valores mais elevados de retro-espalhamento do que a região distante da antena (*far-range*) em decorrência das modificações no ângulo de incidência local. Essas diferenças de retro-espalhamento decorrentes da variação do retro-espalhamento em função das variações de ângulo de incidência são corrigidas como parte do processo de correção radiométrica das imagens (Elachi, 1987).

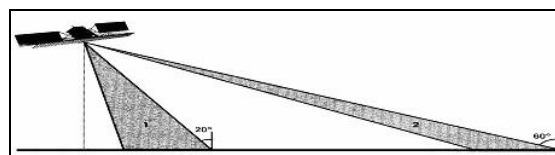


Figura 2. Ângulo de Incidência (Fonte: Radarsta, 1996).

Essa característica é de grande importância e tem sido bastante explorada pelos sistemas mais avançados de imageamento SAR. Independentemente da geometria específica da superfície imageada via de regra pode-se admitir que o aumento do ângulo de incidência da onda determina uma menor capacidade de penetração da radiação no dossel, reduzindo o efeito do substrato da vegetação (solo ou água, por exemplo) sobre o seu retro-espalhamento.

Portanto, quanto maior o ângulo de incidência, maior o efeito do dossel sobre o retro-espalhamento, qualquer que seja a sua configuração.

Como pode ser observado na **Figura 3**, o coeficiente de retro-espalhamento é fortemente afetado pelo ângulo de incidência. Diferentes superfícies podem ter seu sinal discriminado em função do comportamento angular do retro-espalhamento (Elachi,1987).

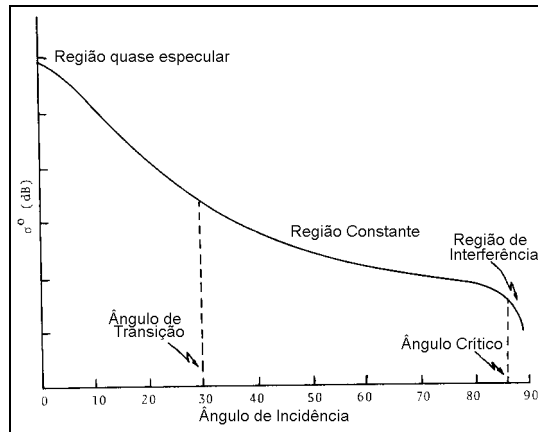


Figura 3. Efeito do ângulo de incidência sobre o coeficiente de retro-espalhamento

(Fonte: Adaptado de Elachi, 1987).

Estudos realizados por Costa(1995) indicam que o uso de imagens de radar adquiridas segundo diferentes ângulos de incidência permite a discriminação de plantas aquáticas. Novo et al. (1997) utilizando imagens do satélite RADARSAT adquiridas em dois ângulos de incidência distintos concluíram que o seu conteúdo de informação é equivalente ao de uma imagem multi-frequência no tocante a discriminação de alvos de interesse para o manejo do reservatório de Tucuruí.

A direção de imageamento se refere à orientação geométrica do feixe transmitido em relação a feições lineares do terreno como culturas agrícolas, acidentes topográficos e lineamentos geológicos. Quando a direção de imageamento é perpendicular à feição linear há um aumento da interação entre ela e a frente de onda. Com isto, há um aumento no coeficiente de retro-espalhamento. Ao contrário, quando a feição linear é paralela à feição do terreno, há menor interação entre ela e a radiação incidente, havendo conseqüentemente uma redução no coeficiente de retro-espalhamento. O efeito da direção de imageamento pode ser levado em consideração para explicar a presença das feições lineares realçadas na **Figura 4**.

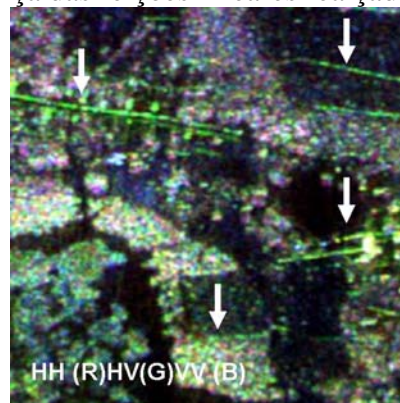


Figura 4 –Efeito da direção de imageamento no realce de feições lineares presentes na cena (Composição colorida multipolarimétrica- banda P).

4. Características de retro-espalhamento dos componentes das áreas alagáveis

As áreas alagáveis, como o próprio nome deixa claro, são áreas sujeitas a oscilações, periódicas ou não, entre fases terrestres e aquáticas (Junk,1997). Isso significa que um fator definidor das áreas alagáveis é a duração e a intensidade com que a água encontra-se presente no ambiente. Fatores tais como regime hidrológico, cobertura vegetal, substrato, geomorfologia, intervenção humana, entre outros, geram uma grande variedade de ambientes alagáveis tais como as Florestas Periodicamente Inundadas, Savanas Periodicamente Inundadas, Planícies costeiras, e os ambientes alagáveis de origem antrópica como é o caso dos grandes reservatórios amazônicos.

A água, como elemento controlador da tipologia de ambientes alagados é de grande relevância para a aplicação dos dados SAR porque ela afeta a constante dielétrica da superfície, e com isso seu coeficiente de retro-espalhamento. O comportamento do retro-espalhamento do solo é governado pelas características geométricas da superfície e pelas propriedades dielétricas do solo, as quais dependem de seu teor de água (umidade). A constante dielétrica do solo aumenta com o aumento seu teor de umidade embora sua taxa de variação com a umidade dependa do comprimento de onda. Quanto maior o comprimento de onda, maior é a sensibilidade da constante dielétrica à porcentagem de umidade presente no solo. (Elachi, 1987). Isto significa que imagens SAR na banda L tendem a ser mais sensíveis à umidade do solo do que em bandas de menor comprimento de onda.

As áreas alagadas, entretanto, raramente se apresentam sem cobertura vegetal. Mesmo nas fases de inundação em que se convertem em sistemas aquáticos, podem apresentar-se colonizadas por vegetação aquática emersa. Assim sendo, a radiação de microondas interage em primeiro lugar com a vegetação, antes de interagir com o substrato. Assim sendo, o conhecimento da interação da radiação de microondas com os dosséis de vegetação é de grande importância para a aplicação de imagens SAR ao estudo de áreas alagadas.

Independentemente de seu substrato existem características da cobertura vegetal que afetam o comportamento do retro-espalhamento dentre as quais distinguem-se: a constante dielétrica, a altura, densidade e biomassa do dossel, o tamanho, forma e orientação dos componentes individuais. Como o conteúdo de umidade, a biomassa, a altura, densidade das plantas podem variar de espécie para espécie, e ao longo de seu ciclo de vida, o seu coeficiente de retro-espalhamento tenderá a variar também, podendo ser utilizado para discriminá-las.

Pesquisas realizadas por Noernberg (1996) indicaram que na região das microondas as interações entre radiação eletromagnética e as plantas aquáticas são em parte governadas pelas características macroscópicas dos diferentes gêneros, tais como: forma, rugosidade, arranjo espacial. Segundo o autor, os diferentes gêneros de plantas aquáticas apresentam características macroscópicas diferentes (forma, arquitetura e dimensão) que podem afetar a interação com a radiação eletromagnética e, conseqüentemente, permitirem a discriminação entre eles. Desta forma só podem ser discriminadas as macrófitas emersas, isto é, as que estão total, ou parcialmente acima do nível da água. Isto porque as plantas macrófitas submersas, por estarem abaixo do nível da água, não interagem com a radiação eletromagnética na região das microondas.

Na **Figura 5** pode-se observar as diferenças de intensidade de energia retro-espalhada pelos bancos de *Typha dominguenses*, *Scirpus crassipes*, e água em uma sub-cena de imagem SAR do sistema RADARSAT. A altura e biomassa média da *Typha* é bem maior do que a do *Scirpus*. Por isso, a penetração da radiação no dossel de *Scirpus* atinge o substrato líquido, e o sinal de retorno é uma mistura do espalhamento de canto (double-bounce) e o espalhamento do dossel. No caso da *Typha*, devido à maior biomassa, o pulso é atenuado no interior do dossel, sem atingir a superfície da água.

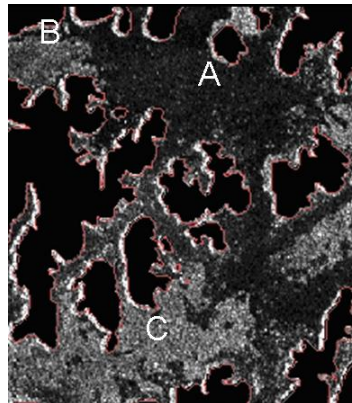


Figura 5 – Diferenças de retro-espalhamento das superfícies líquida (A), do dossel de *Typha domiguensis* (B), e do Dossel de *Scirpus crassipes* (C). Subcena de imagem RADARSAT (S5, HH).

Ao estudar o relacionamento entre a biomassa úmida e o coeficiente de retroespalhamento (σ°) derivado de imagens multi polarização obtidas por um sistema SAR aerotransportado, operando na banda C. Noernberg (1996) construiu gráficos (**Figura 6**) em que os valores médios do σ° foram localizados em ordem decrescente de biomassa úmida (Floresta, *Eichhornia*, Heterogêneo e *Scirpus*). É interessante observar que existe uma relação inversa entre a biomassa e a altura das três classes de plantas aquáticas. Há um aumento do σ° nas polarizações HV e VH à medida que a biomassa úmida das classes de plantas aquáticas diminui. A polarização HH também mostra este comportamento, mas o aumento do σ° é mais acentuado entre a classe *Eichhornia* e Heterogêneo, que entre Heterogêneo e *Scirpus*. A classe Heterogêneo representava, segundo o autor bancos de plantas flutuantes em que os vários gêneros ocorriam em igual proporção. Segundo o autor, o comportamento teórico esperado seria o de maior espalhamento pela classe *Eichhornia* visto possuir maior biomassa úmida, e conseqüentemente maior constante dielétrica. Isto não ocorre, entretanto, visto que o seu valor do σ° é bem menor do que o das classes *Scirpus* e Heterogêneo. Este fato estaria associado com a orientação espacial dos elementos espalhadores

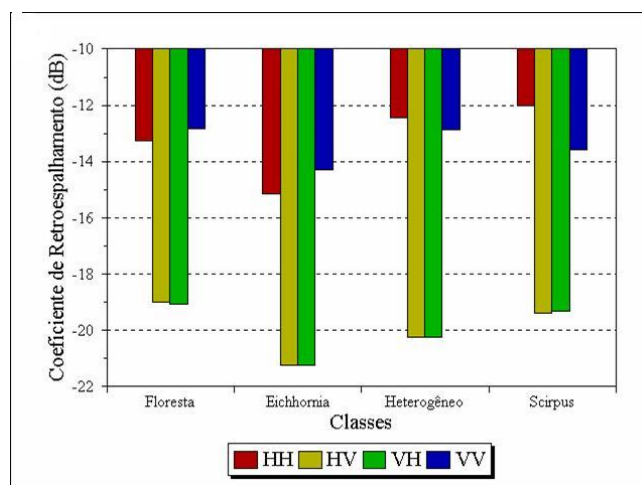


Figura 6. Valores médios do σ° das classes: Floresta; *Eichhornia*; Heterogêneo e *Scirpus*. Esta ordem de apresentação representa uma ordem decrescente da biomassa úmida nas classes. Estes dados de biomassa foram obtidos no mês de maio de 1996, no reservatório de Tucuruí (Fonte: Noernberg, 1996).

Um exemplo do aproveitamento da sinergia entre os dados SAR e ópticos é oferecido pelo estudo realizado por Graciani (2002). O autor fez uma fusão entre as imagens Landsat e imagens SAR do satélite RADARSAT. Para tanto ele utilizou as bandas TM 3, 4 e 5 às quais atribuiu as cores B, G e R, respectivamente. Na seqüência essas bandas foram transformadas para as componentes IHS. Por último, a componente I foi substituída pela imagem SAR e as três bandas IHS foram convertidas novamente para o espaço RGB (**Figura 7**). Ao se comparar fusão RADARSAT- TM/Landsat com a imagem RADARSAT fica evidente o caráter complementar dos dados ópticos. O volume de informações que podem ser derivadas da imagem fusão é muito maior do que aquele passível de ser extraído da imagem de SAR em uma única polarização.

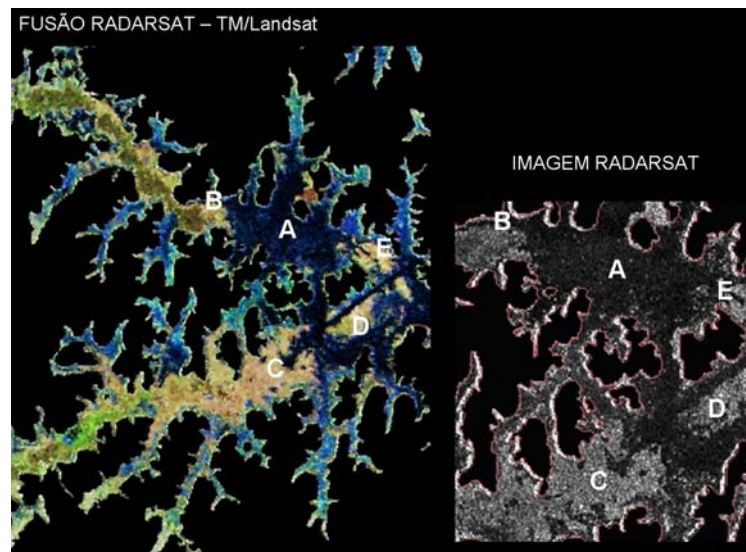


Figura 7. Sinergia dos dados ópticos e de radar (Adaptado de Graciani, 2000).

5. Aplicações SAR no estudo de áreas alagadas do Brasil

Existem vários exemplos de aplicações de dados SAR ao estudo de áreas alagadas do Brasil. A grande maioria deles se concentra na região Amazônica, mas a abordagem adotada pode ser facilmente aplicada no estudo dos ambientes alagáveis do Pantanal. Dentre os trabalhos realizados cabe destacar os estudos realizados por Costa (2000) e Hess et al.(2003).

Costa (2000) utilizou uma série temporal de imagens JERS -1 e RADARSAT para estimar a produtividade primária de plantas aquáticas do Lago Grande de Monte Alegre. Essas estimativas se basearam em modelos empíricos que permitiram determinar a variação da biomassa da vegetação a partir de dados de retroespalhamento.

Hess et al. (2003) mapeou pela primeira vez o limite das áreas alagadas ao longo da calha do rio Amazonas e de seus principais afluentes a partir do uso de mosaicos de imagens do satélite JERS-1. Ela também usou as imagens para gerar um mapa de estado da cobertura vegetal, identificando várias classes dentre as quais, florestas inundadas, florestas não inundadas, chavascais, campos, entre outras classes.

6. Considerações Finais

Existe uma grande variedade de dados SAR disponíveis. A comunidade científica que se interessa pelo monitoramento de áreas alagáveis ainda não explorou todo o potencial oferecido pelos dados. Para que o uso desses dados possa ser mais eficiente torna-se fundamental o conhecimento das propriedades das imagens SAR, que são bastante diversas

das propriedades das imagens ópticas. É necessário também um sólido conhecimento dos processos de interação da radiação de microondas com os componentes das áreas alagáveis: a água, o solo e os diferentes tipos de cobertura vegetal.

Referências Bibliográficas

- Costa, M. P. F. **Net Primary Productivity of Aquatic Vegetation of the Amazon Floodplain: a Multi-SAR Satellite Approach.** Tese (Doctor of Philosophy). University of Victoria, 2000.
- Costa, M. P. F.; Novo, E.M.L.M; Ahern, F.; Mitsuo II, F.; Mantovani, J.E.; Ballester, M.V.; Pietsch, R.W. The Amazon Floodplain through Radar Eyes: Lago Grande de Monte Alegre case Study. **Canadian Journal of Remote Sensing**, **24 (4)**: 339-349, 1998.
- Costa, M. The effect of Airborne SAR-C *Multipolarization and Multiangle Images in Backscattering Separability of Aquatic Plants in the Brazilian Amazon Basin.* Technical Report, CCRS, Ottawa, On., Canada, 1995.
- Elachi, C. *Introduction to Physics and Techniques of Remote Sensing* New York. Wiley & Sons. , 1987.
- Hess, L.L., Melack, J., Novo, E. M. L. M., Barbosa, C. C. F., Gastil, Mary. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the Central Amazon Basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 404-428. 2003.
- Junk, W. General aspects of floodplain ecology with special reference to Amazonian floodplains. In: Junk, W. (ed) **The Central Amazon Floodplain.** Ecological Studies 126. Springer. 1997.
- Noernberg, M. A . **Discriminação de Plantas aquáticas utilizando dados SAR multipolarimétricos na Banda C.** (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1996. INPE-6119-TDI/580.
- Novo, E. M. L. M.; Costa, M.P.F.; Mantovani, J.E. Radarsat Exploratory Survey on Macrophyte Biophysical Parameters in Tropical Reservoirs. **Canadian Journal of Remote Sensing**, **24 (4)**: 367-375, 1998.
- Novo, E.M.L.N.; Costa, M.P.F.; Mantovani, J.E., Ballester,M.V RADARSAT relative backscatter and macrophyte canopy variables: preliminary results for Tucuruí reservoir and lago Grande floodplain, Brazilian Amazon. **GER'97**, May 25-30, Ottawa, Canada, .., 1997.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive.** Reading, Addison-Wesley, v. 3, 1986.