

CURSO

Sensoriamento Remoto por Radares

Ulf Walter Palme e mail: ulf@ltd.inpe.br
José Claudio Mura e mail: mura@dpi.inpe.br
Evlyn M.L.M. Novo e mail: evlyn@ltd.inpe.br
João Viane Soares e mail: viane@ltd.inpe.br
Hermann J. H. Kux e mail: kux@ltd.inpe.br

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
OBT - Coordenadoria de Observação da Terra
Programa Microondas e Novas Tecnologias - MONTEC
Caixa Postal 515, 12201 - São José dos Campos, SP, Brasil

O presente *Curso "Sensoriamento Remoto por Radares"* é voltado para profissionais que atuam na área de sensoriamento remoto e que desejam uma introdução ou atualização de seus conhecimentos em radares imageadores e suas aplicações, propiciando, em função da carga horária, uma visão geral do assunto.

1 - INTRODUÇÃO

Como consideração inicial poderíamos lembrar que as fotografias aéreas são utilizadas há mais de um século para produtos preto e branco e mais de 50 anos para fotografia a cores; e que o emprego de imagens ópticas Landsat e SPOT pode ser considerado um sucesso, na medida em que sua interpretação e utilização já é praticamente de amplo domínio. Então, o que justifica a obtenção de imagens por sensores radar operando na faixa de microondas ?

A razão muitas vezes apontada como sendo a mais importante é que microondas, devido ao seu maior comprimento de onda, penetram nuvens (ou seja, as nuvens se tornam praticamente transparentes para as microondas) e os radares são independentes do sol como fonte de iluminação, permitindo o imageamento de áreas com condições meteorológicas críticas e à noite. A segunda razão é que microondas penetram mais na vegetação que ondas ópticas, além de penetrarem no próprio solo dependendo de seu teor de umidade. A terceira razão é que a informação de microondas é diferente, e portanto complementar, em relação a de ondas ópticas. Enquanto as ondas ópticas se utilizam das propriedades de ressonância molecular dos alvos para diferenciá-los, as microondas expressam as propriedades geométricas e dielétricas das superfícies observadas. Todas estas características permitem que o radar proporcione uma vasta gama de aplicações em diferentes campos do conhecimento. No entanto, no sentido de acessar estas aplicações torna-se necessário compreender a técnica e os fenômenos que ocorrem nestas faixas tão particulares, as assim denominadas microondas.

Inicialmente portanto o objetivo principal é condensar algumas informações e conceitos nem sempre encontrados nos livros e trabalhos publicados na área, considerados importantes para a correta compreensão do assunto radares imageadores em sensoriamento remoto. Introduz-se brevemente o leitor na terminologia técnica comumente utilizada na área.

2. FUNDAMENTOS

O termo **radar** é um acrônimo e deriva do inglês- **radio detection and ranging - detecção em faixas de radio e medição de distância**. Os radares operam portanto em uma parte das chamadas **faixas de radio** (hoje com a designação genérica de **faixas de microondas**, ou **espectro de microondas**). Existem diferentes tipos de radares desde os de aproximação em aeroportos, vigilância do espaço aéreo, radares meteorológicos, etc. e também os radares utilizados em Sensoriamento Remoto. Neste caso utilizam-se geralmente os radares imageadores de abertura real (RAR) e os radares de abertura sintética (SAR) como veremos mais adiante.

É conveniente mencionar que, de um modo geral, os sensores que se utilizam da radiação nas faixas de microondas podem ser divididos em **ativos** e **passivos** e estes por sua vez em **imageadores** e **não imageadores** (Fig. 2.1). Neste curso a ênfase está em radares imageadores.

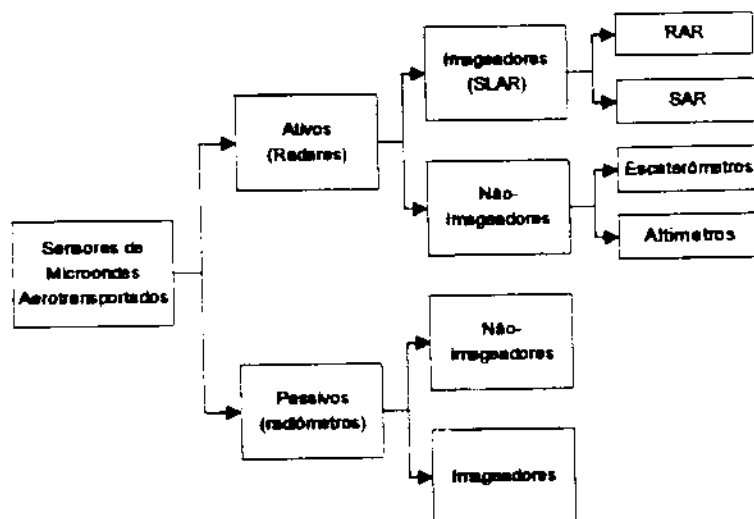


Fig. 2.1 - Classificação dos sensores de microondas.

Na terminologia radar, ao contrário do que ocorre nas faixas óticas, os técnicos e as publicações referem-se sempre à frequência que está sendo empregada e não ao comprimento de onda. A unidade básica de frequência é o Gigahertz (GHz) que corresponde a 10^9 Hz, e que equivale ao comprimento de onda de 0,3 m. A faixa, hoje considerada de operação para radares imageadores estende-se de 0,5 GHz a 30 GHz. As faixas de microondas empregadas em Sensoriamento Remoto de um modo geral compreendem o intervalo de 0,3 GHz (1 m) a 300 GHz (1 mm).

BANDA	FREQ. (GHz)	COMP. DE ONDA (cm)	BANDA	FREQ. (GHz)	COMP. DE ONDA (cm)	BANDA	FREQ. (GHz)	COMP. DE ONDA (cm)
P	0,225 a 0,39	133 a 76,9	C	4,20 a 5,75	7,0 a 5,20	Q	36,0 a 46,0	0,83 a 0,65
L*	0,390 a 1,55	77,0 a 19,3	X _L	5,75 a 10,9	5,2 a 2,75	V	46,0 a 56,0	0,65 a 0,54
S	1,550 a 4,20	19,30 a 7,0	K	10,9 a 36,0	2,75 a 0,83	W	56,0 a 100,0	0,54 a 0,30

Tabela 2.1 - Frequências de operação de radares.

Radares imageadores são portanto sistemas sensores **ativos**, ou seja, geram a energia em microondas necessária para iluminar a cena e registram os ecos provenientes das reflexões da cena, apresentando os mesmos sob a forma de uma imagem. Possuem portanto um **transmissor de microondas** que ilumina a cena

utilizando-se para esta função de uma antena, e um receptor de microondas que registra a energia refletida, empregando em geral a mesma antena (radar monoestático).

A qualidade da antena nos radares imageadores é tão importante quanto a qualidade de um sistema de lentes em uma câmera fotográfica ou em um imageador operando nas faixas do visível e infravermelho. Uma das características mais importantes em antenas para radares é o seu diagrama de radiação, que entre outros descreve a diretividade ou ganho da antena (sensibilidade da antena em função da direção) e qualidade da mesma, além de estabelecer, por exemplo, a largura da faixa imageada por determinado radar. Existem diferentes tipos de antenas que podem ser empregadas sendo as duas principais as do tipo guia fendido e do tipo "array".

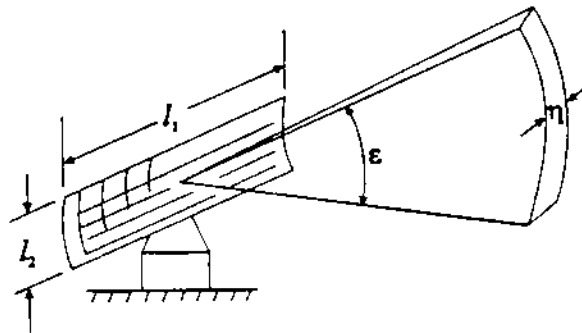


Fig. 2.2 - Antena retangular com o seu padrão de ganho.

FONTE : Modificado de Hovanessian (1980), p.6.

Radares imageadores utilizam uma geometria de imageamento própria, inerente e necessária ao seu princípio de funcionamento. Neste contexto surge o termo radares de visada lateral. Na teoria não é possível gerar uma imagem radar com visada nadir (perpendicular). A figura 2.3 apresenta a geometria de iluminação no solo de um radar SLAR/RAR, considerando que a abertura vertical e horizontal da antena, de comprimento l , são definidas respectivamente pelos ângulos ϕ_v e ϕ_h . A antena é instalada em uma aeronave, que se movimenta com uma velocidade v , a uma altitude h .

Observa-se na referida figura a geometria volumétrica e superficial de uma célula de resolução. A célula de resolução é definida como as menores dimensões entre dois alvos pontuais para existir separabilidade dos seus sinais ecos e em consequência poderem ser discriminados.

As resoluções espaciais são conhecidas pela designação de resolução em range (distância), que é a resolução na direção perpendicular ao deslocamento da plataforma; e resolução em azimuth, que refere-se à resolução ao longo do deslocamento da plataforma. As duas resoluções definem, para cada posição na imagem, o "pixel" ("picture element" - elemento de resolução espacial). A resolução em range, e a própria medição de distância, é possível através da determinação do tempo de propagação da onda eletromagnética com velocidade conhecida, e está associada portanto ao pulso que é gerado pelo transmissor de microondas. A resolução em azimuth, por sua vez, é definida principalmente pelo tamanho da antena.

Nos radares imageadores os nomes ABERTURA REAL e ABERTURA SINTÉTICA estão associados ao tipo de antena que está sendo considerada. Os dois radares são considerados de visada lateral (SLAR - Side Looking Airborne Radar) (Fig. 2.4). No entanto muitas publicações associam o nome SLAR somente ao radar de abertura real.

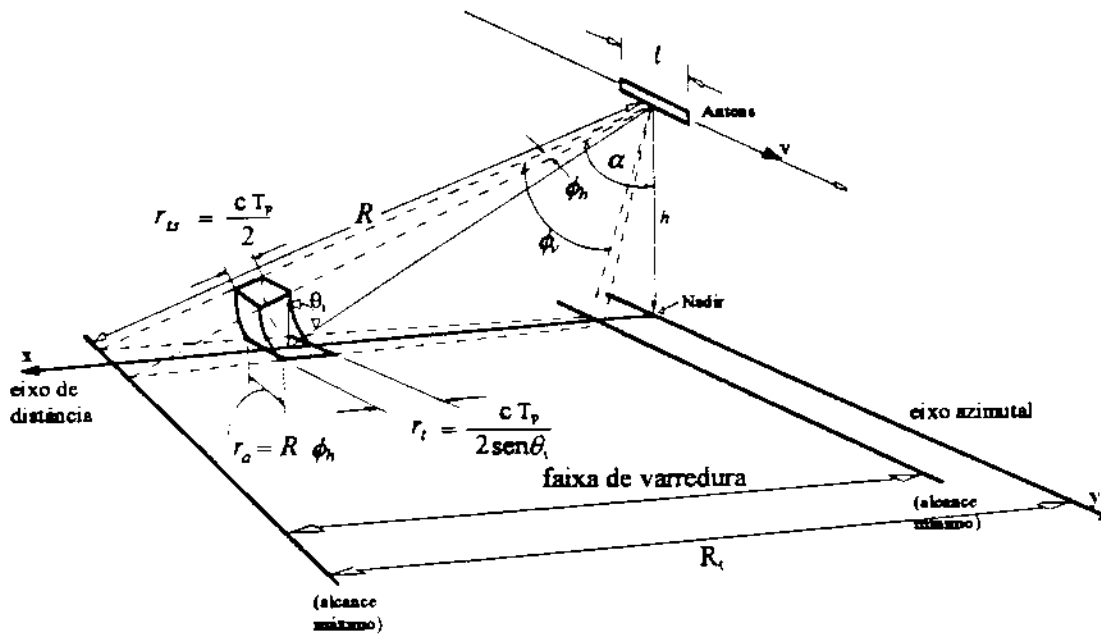


Fig. 2.3 - Geometria de iluminação de um radar SLAR-RAR.
 FONTE: Modificado de Ulaby et al. (1981), p. 46.

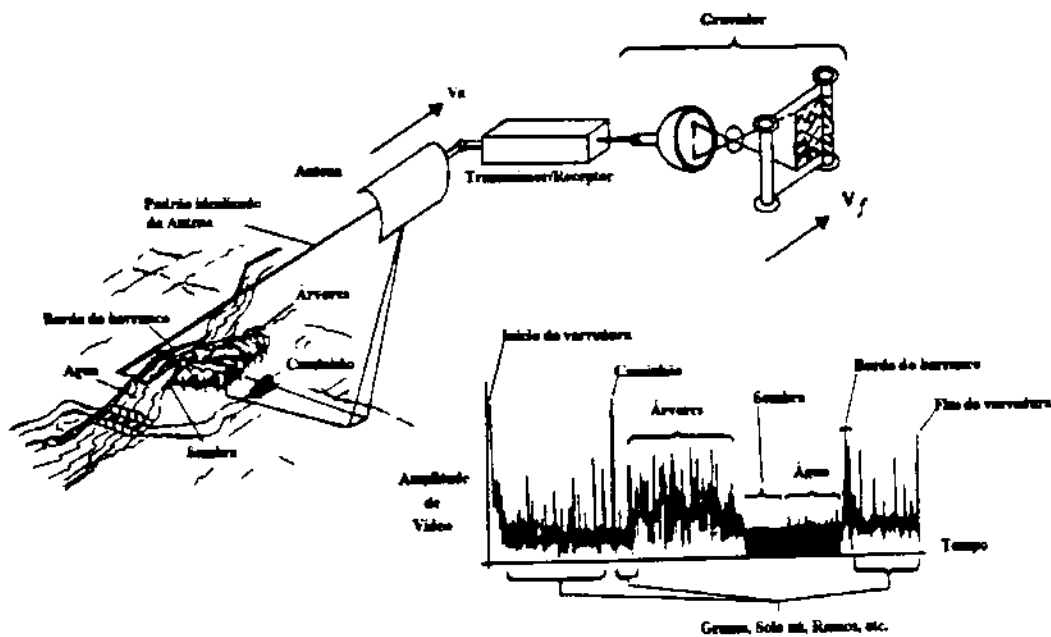


Fig. 2.4 - Princípio do Imageamento Radar.
 Radar de visada lateral tipo RAR.
 FONTE: Ulaby et al. (1986), p. 570.

A figura 2.5 apresenta um diagrama de blocos com os principais componentes de um sistema radar imageador (SAR). Os radares emitem pulsos numa taxa de 1000 a 2000 por segundo, com gravação coerente dos ecos. De modo geral a antena emite o sinal do transmissor (pulsos) e capta os sinais de retorno enviando-os ao receptor, de onde seguem para um conversor Analógico-Digital, para posterior gravação em fitas magnéticas de alta densidade (HDDR), ou processamento em tempo real para formação da imagem, ou ainda para transmissão para uma antena receptora em terra ("downlink").

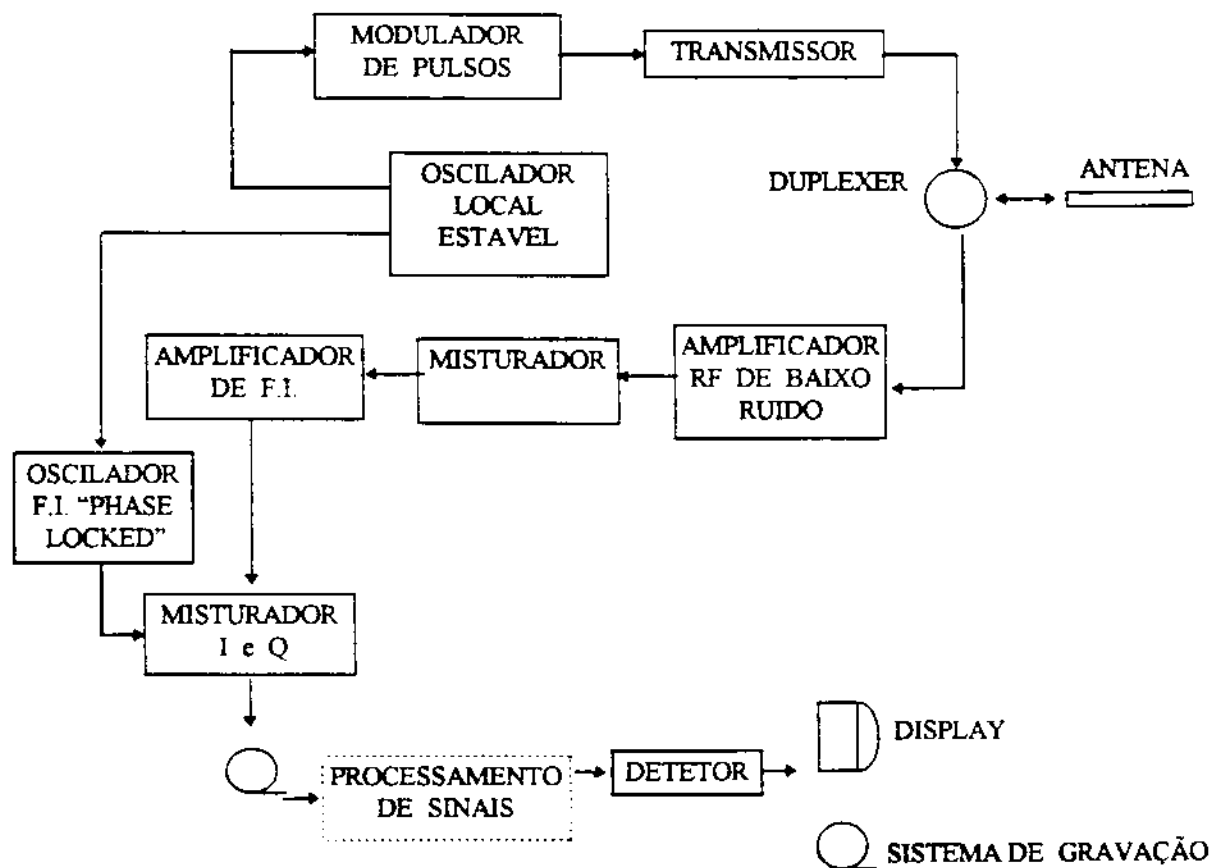


Fig. 2.5 - Diagrama simplificado de um radar imageador (SAR)

No caso do RAR e principalmente no SAR faz-se uso de um conceito conhecido na teoria de antenas que afirma que: quanto maior a antena, mais estreito é seu feixe; deste modo, a antena real é utilizada, através do deslocamento da plataforma (aeronave ou satélite), como um elemento de uma antena artificial, matemática ou sintética, *n* vezes maior que a real; convém salientar, portanto, que a necessidade de estabilidade de fase no "hardware" do SAR é fundamental para referenciar as posições da antena real em cada instante e assim "construir" a antena sintética; a estabilidade está, portanto, diretamente relacionada ao conceito de compressão em azimute ("beam sharpening"), ou seja, à antena sintética e à resolução em azimute.

A resolução em distância, ou range, por outro lado, é controlada pela largura do pulso transmitido. No caso do SAR empregam-se também aqui técnicas específicas de compressão do pulso, ou seja, compressão em range.

Finalizando, é interessante destacar que a etapa de **PROCESSAMENTO DO SINAL** é flexível e permite a geração da imagem SAR com diferentes resoluções em azimute até um certo limite estabelecido pelas configurações do sistema. A flexibilidade está associada a conceitos como "multi-look", etc., que serão abordados, pelo menos os principais, mais adiante.

2.1. RADAR DE ABERTURA REAL - RAR

2.1.1 - RESOLUÇÕES ESPACIAIS EM RANGE PARA O RAR

- resolução espacial em range (distância)

Para um pulso retangular de duração τ a resolução é:

$$\rho_r = c \frac{\tau}{2}$$

resolução espacial em range (slant range)

- alvos que estejam separados pela metade do comprimento do pulso em range (e um pulso no chamado "round trip delay") podem ser discriminados.
- resolução espacial em range no solo (projetada)
- em um ponto da imagem a uma certa distância horizontal no solo (R_g) o ângulo entre o "slant range" - rampa (R) e a vertical é θ sendo então a resolução em range no solo:

$$\rho_g = c \frac{\tau_p}{2 \sin \theta} = c \frac{\tau_p R}{2 \sqrt{R^2 - h^2}}$$

Conclusões:

1. resolução espacial em "slant range" independe da distância.
2. resolução espacial no solo melhora com a distância, (diferente da ótica) !!!

2.1.2 - RESOLUÇÃO ESPACIAL EM AZIMUTE PARA O RAR

Capacidade de discriminação entre dois objetos com mesmo range mas azimutes diferentes, é geralmente assumida como sendo a separação angular -3dB (50%).

$$\rho_{az(3dB)} = \theta_{(3dB)} R = \frac{\lambda}{d} R$$

onde: $\theta_{(3dB)} \cong \frac{\lambda}{d}$ e d = comprimento da antena.

Conclusão: resolução espacial deteriora com o aumento da distância ("range").

Interessante reforçar este ponto notando que as dimensões das células de resolução no solo variam com a distância em relação à antena. As células de resolução espacial próximas ao nadir ("near range"), possuem pequenas dimensões em azimute e grandes em "range", enquanto que no ponto mais distante ("far range") as células são pequenas em "range" e grandes em azimute, conforme ilustrado na Figura 2.6 (vide também Figura 2.3). Esta é uma característica típica dos radares de abertura real.

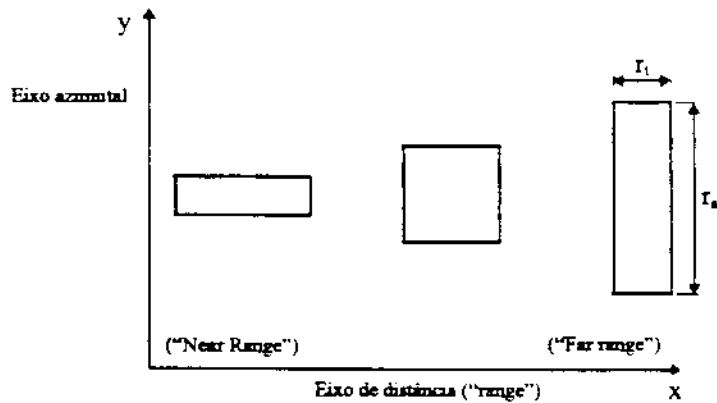


Fig. 2.6 - Área de uma célula de resolução espacial projetada no solo (relação de aspecto).

A variação da dimensão radial da célula de resolução é devida à variação do ângulo de incidência θ ; assim para grandes faixas de cobertura do radar teremos grandes variações no valor de θ , e por sua vez grandes variações na resolução radial r_r e resolução transversal r_t (Fig. 2.7)

Para obtermos a distância no solo em que ocorre a melhor uniformidade igualamos as resoluções em azimute e "range", ou seja, $r_a = r_r$

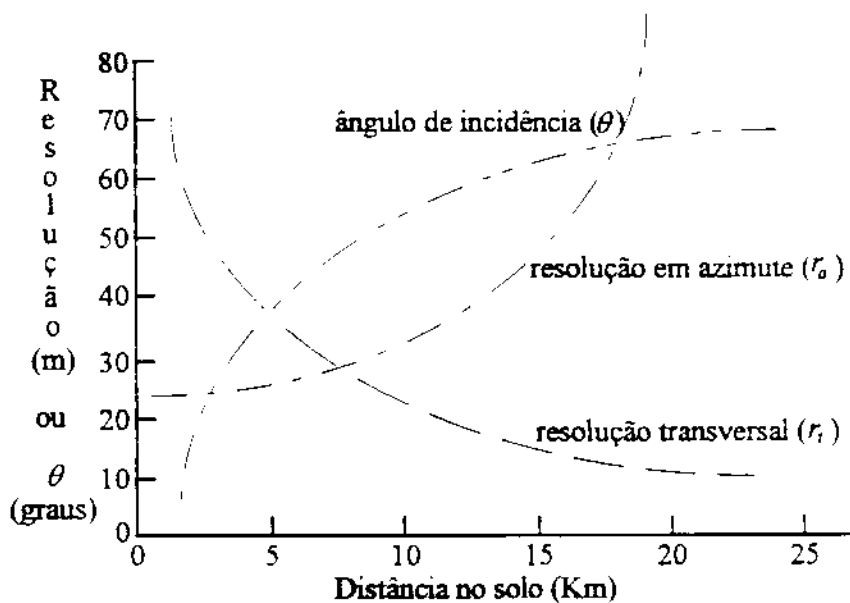


Fig. 2.7 - Exemplo de variação na resolução RAR com:
 $h = 7.5 \text{ km}$, $\tau = 100 \text{ ns}$ e $\beta_h = 3 \text{ mrad}$ (0.17°).
 FONTE: Adaptada de Ulaby *et al.* (1982), p. 572.

2.1.3 - EQUAÇÃO RADAR PARA O RAR

A equação radar permite, entre outros, analisar a "performance" de radares, bem como especificar novos sistemas.

- P_t - potência transmitida pelo radar e antena (pior caso é o de uma antena isotrópica, já que a potência é irradiada igualmente em todas as direções)
- a densidade de potência ($W.m^{-2}$) que incide em uma esfera imaginária de raio R é para o caso de uma antena isotrópica:

$$P_i = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

Ganho de uma antena (G) - capacidade de direcionar a potência irradiada na direção do alvo ou, potência direcionada ao alvo pela antena dividido pela que seria por uma antena isotrópica.

- usando-se uma antena *diretiva* (com ganho - G , geralmente expresso em dB) tem-se:

$$P_i = \frac{P_t G}{4\pi R^2}$$

- a radiação que incide sobre um alvo é espalhada em todas as direções em alguma intensidade: uma medida desta proporção espalhada é conhecida como seção de choque de radar (RCS), em m^2 - e que é uma PROPRIEDADE DO ALVO

$$P_e = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \quad \text{---> Potência do Eco}$$

- representa uma medida do tamanho do alvo como "vista" pelo radar; ou,
 - função de ganho do alvo em relação a um espalhador isotrópico.
- Se a antena do radar recebe potência em uma *área efetiva*, A_e em m^2 , então o sinal total (S), recebido pelo radar de um alvo com seção de choque σ a uma distância R é:

$$S = \frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 R^4}$$

Da teoria de antenas tem-se, no entanto, que:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad \text{---> } A_e = \frac{G \lambda^2}{4\pi}$$

Substituindo-se, portanto, a área efetiva (A_e) na equação acima, temos:

$$S = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Sinais recebidos por radares são geralmente contaminados por ruídos (flutuações estatísticas), tornando-se um problema, ou dificultando a determinação de sigma.

$$\frac{S}{N} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 N_o}$$

onde : $N_o = 4 k T B$ e representa a potência de ruído média

Como regra geral adota-se o seguinte critério para avaliar se um radar garante boa visibilidade (deteção) do alvo sobre o ruído (fundo):

$$\frac{S}{N} \geq 12 \text{ dB} = 15,85$$

2.2 - RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA - SAR

No que refere-se ao SAR o atual nível tecnológico é tal que *transmitindo pulsos muito curtos* ou por *compressão dos pulsos*, pode-se atingir resoluções espaciais em range melhores que 10m.

Por outro lado, no entanto, para um RAR com $\lambda = 3 \text{ cm}$ (10 GHz), $R = 50 \text{ km}$ e $d = 3 \text{ m}$ (antena), a melhor resolução em azimute que pode ser obtida é de 500 m, o que evidentemente inviabiliza as aplicações contempladas pelos radares; para satélites a situação é ainda pior.

SOLUÇÃO? Princípio SAR (Carl Wiley, 1950)

- no caso do SAR o deslocamento da aeronave/satélite é utilizado para se construir uma antena maior; isto é obtido transportando-se a antena real para posições onde ela agirá como um elemento de um "array" que proporciona resolução fina em azimute (utilizado em Radio Astronomia para a obtenção de resolução angular).
- em cada posição ao longo da trajetória de deslocamento da plataforma, o radar transmite um pulso e recebe um eco que é armazenado.
- de modo a se construir o "array" (no caso a antena sintética) cada pulso retornado (eco) dos elementos individuais tem que ser combinado coerentemente.
- adição coerente de pulsos de radar significa que os mesmos são somados após suas fases terem sido sincronizadas.
- portanto, deve-se realizar uma correção de fase a cada eco gravado por toda a extensão da antena sintética.
- em particular, a fase de cada pulso transmitido precisa ser controlada com precisão e o eco referenciado ao pulso através de um oscilador local estável.
- este oscilador também deverá fornecer ou garantir uma **estabilidade de fase** ao longo de toda a extensão da antena sintética de modo que cada eco possa ser sincronizado com os outros.

este pré-requisito de coerência é a diferença básica entre o SAR e o RAR.

A Figura 2.9 apresenta o conceito de focalização da abertura sintética para se produzir uma imagem SAR de um alvo puntual

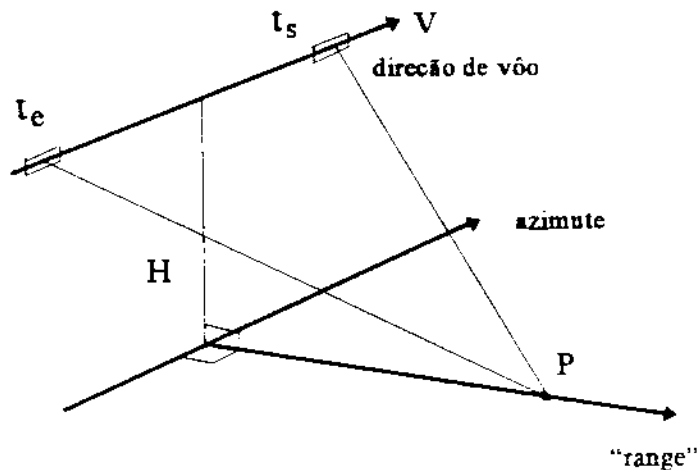


Figura 2.9 - Intervalo da abertura sintética $(t_s - t_e)$, e alvo puntual P

- para cada elemento da abertura o eco é gravado aplicando-se em seguida uma correção de fase ϕ_i
- os sinais resultantes, que deveriam estar agora sincronizados em fase, são somados coerentemente antes da detecção quadrática, sendo posteriormente mostrados em display.

2.2.1 - EQUAÇÃO RADAR PARA O SAR

No caso do RAR $\frac{S}{N} = \frac{Pt G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 N_o}$ e que corresponde à relação sinal/ruído de 1 eco no

SAR.

- no processamento SAR "n" ecos são recebidos e somados coerentemente, o que altera significativamente a relação sinal ruído (S/N) no caso do SAR.
- a construção de uma abertura sintética de "n" elementos proporciona uma melhora no ganho do sinal de saída de um alvo puntual por um fator "n²".

A relação sinal / ruído após o processamento SAR para um alvo puntual com seção de choque σ a um range R, é:

$$\frac{S}{N} = \frac{Pt G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 N_o} n$$

- relação S / N é melhorada por um fator "n".
- por outro lado o número de elementos "n" que a abertura sintética contém, é:

$$n = T_s PRF$$

- onde : T_s é o tempo de formação da antena sintética e PRF a frequência de repetição do pulso do radar (pulse repetition frequency).

Para obter a resolução espacial em azimute (ρ_{az}) deve-se ter $L = \frac{\lambda R}{2\rho_a}$ sendo que T_s está relacionado a L por:

$$T_s = \frac{L}{V} = \frac{\lambda R}{2V \rho_a}$$

- portanto, a forma final da equação radar para o SAR no *caso de um alvo puntual* é:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_t G^2 \lambda^3 \sigma PRF}{4\pi R^3 N_o 2V \rho_a}$$

- e no *caso de alvos extensos* tem-se:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_t G^2 \lambda^3 \sigma^o \rho_g PRF}{4\pi R^3 N_o 2V}$$

convém lembrar que $\sigma = \sigma^o (\rho_g \rho_a)$

- no caso do SAR a relação sinal / ruído independe da resolução espacial em azimute, ou seja, pode-se processar uma imagem SAR para qualquer resolução sem alterar a S/N dos alvos extensos da imagem (compressão em azimute não afeta).
- na imagem final, um alvo extenso com σ^o estará sujeito a flutuações estatísticas na intensidade do pixel, fenômeno conhecido como "speckle" que confere uma aparência rugosa à imagem.
- consequência do "speckle": medida única de σ^o de um pixel estará sujeita a enorme flutuação estatística tornando-se sem sentido. Solução: efetuar a média de muitos pixels de modo a atenuar as variações.

2.2.2. - RESOLUÇÃO EM AZIMUTE PARA O SAR

Suponha que uma abertura sintética com comprimento L é construída. O feixe desta antena seria a metade da antena física de mesmo tamanho, ou seja:

$$\beta_s = \frac{\lambda}{2L}$$

Por quê a diferença $\lambda/2L$ (SAR) λ/d (RAR) ?

O diagrama de radiação de uma antena convencional de radar é determinado pelos deslocamentos de fase devidos à diferença unidirecionais ("one way") entre os elementos da antena e o alvo no solo.

No SAR a antena sintética é determinada pelos deslocamentos de fase causados pelo "two-way round trip" entre os elementos da antena e o alvo.

Deste modo, os elementos da abertura sintética estão afastados o dobro da distância que no caso da abertura real, de modo que o comprimento efetivo da antena seja $2L$.

O tamanho máximo da abertura sintética para um ponto a uma distância R é determinado pelo tempo que este ponto permanece dentro do feixe real do radar (tempo que o ponto é iluminado); isto equivale ao tamanho da área iluminada no solo em azimute para um dado range R . Também é igual à resolução em azimute no caso da abertura real, ou seja:

$$L \leq \frac{\lambda R}{d} \quad (1)$$

- portanto, a melhor resolução possível para a abertura sintética é:

$$\rho_a = \beta_s R = \frac{\lambda}{2L} R \quad (2)$$

Substituindo-se a eq. (1) em (2) obtém-se:

$$\rho_a \geq \frac{\lambda R}{2} \frac{d}{\lambda R} \quad \rho_a \geq \frac{d}{2}$$

- a resolução em azimute no SAR independe do range, do comprimento de onda, e da altura de vôo; e melhora com a diminuição do tamanho da antena real.
-
- nem sempre as imagens são processadas para a melhor resolução ($d/2$), utilizando-se aberturas sintéticas menores para reduzir a complexidade do processamento dos sinais.
-

focalização com abertura sintética = compressão em azimute

pois comprime a resolução inicial de 3dB da abertura real para a nova resolução da abertura sintética.
 obs.: sar não focado ("UNFOCUSSED SAR") - não se aplica correção de fase enquanto a mesma não variar de mais de $\pi/4$; deste modo é possível construir uma abertura sintética para um comprimento relativamente curto.

2.3. - SEÇÃO DE CHOQUE DE RADAR (σ) "radar cross-section"

O principal objetivo da maioria dos radares é a *medição de sigma* (σ)

- Definição da Física Clássica (FEYNMAN)

$$\sigma_s = \frac{\text{energia total espalhada / s}}{\text{energia incidente / m}^2 \text{ s}}, m^2$$

- Definição em Radar

$$\sigma = \frac{\text{potência refletida / unidade ângulo sólido}}{\text{densidade potência incidente / 4}\pi}, m^2$$

- pode ser imaginado como sendo a área de um refletor imaginário que produz um eco no radar de intensidade semelhante à do alvo em questão;
- apesar de expresso em m^2 não possui relação direta com a área física no solo;
- em geral σ é uma função complexa dependendo do tamanho do alvo, forma, orientação em relação ao radar, comprimento de onda, polarização, etc;
- difícil de ser calculado, exceto nos casos simples através do uso de modelos;

ALVOS PUNTUAIS - σ **ALVOS EXTENSOS** - σ^0, γ

σ^0 seção de choque de espalhamento por unidade de área (coeficiente de retroespalhamento), adimensional e geralmente expresso em dB;

$$\sigma^0 (dB) = 10 \log \sigma^0 (m^2 / m^2)$$

γ seção de choque de espalhamento por unidade de área projetada, sendo a área normal à direção de propagação pela qual a área é iluminada.

$$\text{RELAÇÃO GERAL: } \sigma = \sigma^0 A = \gamma (A \sin \psi)$$

σ área efetiva do alvo que é interceptada e que redireciona a energia.

σ^0 em dB referenciado a $1 m^2$

A área iluminada

ψ ângulo de depressão

3. - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS RADAR

Esta seção pretende abordar sucintamente alguns tópicos considerados fundamentais no que refere-se à interpretação de imagens radar.

<u>tópicos importantes:</u>	
GEOMETRIA	sombras "foreshortening" - encurtamento de rampas "layover" - inversão de relevo
RETROESPALHAMENTO	comprimento de onda e polarização ângulo de incidência permissividade rugosidade da superfície ângulo de aspecto

3.1. - GEOMETRIA

A seguir apresenta-se alguns conceitos importantes em relação a aspectos peculiares relacionados com a geometria SAR, que são exemplificados nas Figuras 3.1., 3.2 e 3.3.

3.1.1 - SOMBRAS

- ângulo de depressão definido como φ
- inclinação da rampa ("back slope") definido como α_b

$$\alpha_b < \varphi - \text{sem sombra} \quad (1)$$

$$\alpha_b = \varphi - \text{rampa iluminada} \quad (2)$$

$$\alpha_b > \varphi - \text{sombras} \quad (3)$$

Se a condição (3) é satisfeita então o tamanho da sombra em slant range (S_s) está diretamente relacionada à altura da feição acima de um datum (h) e à distância total em slant range (S_r) e inversamente relacionada à altura de voo. (H)

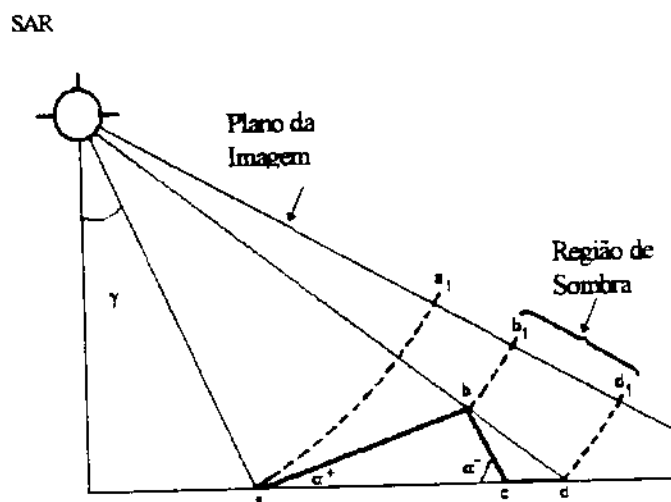


Fig. 3.1 - Sombras

3.1.2. - ENCURTAMENTO DE RAMPA ("FORESHORTENING")

Determinado pelo tempo que uma rampa é iluminada, ocorre encurtamento da rampa $LF = L \cdot \sin \theta$ para todos os casos, exceto quando o ângulo de incidência é 90° ("grazing incidence").

- todas as rampas com face voltadas para o radar são encurtadas, sendo mais crítico em near range - pode-se determinar a inclinação da rampa.

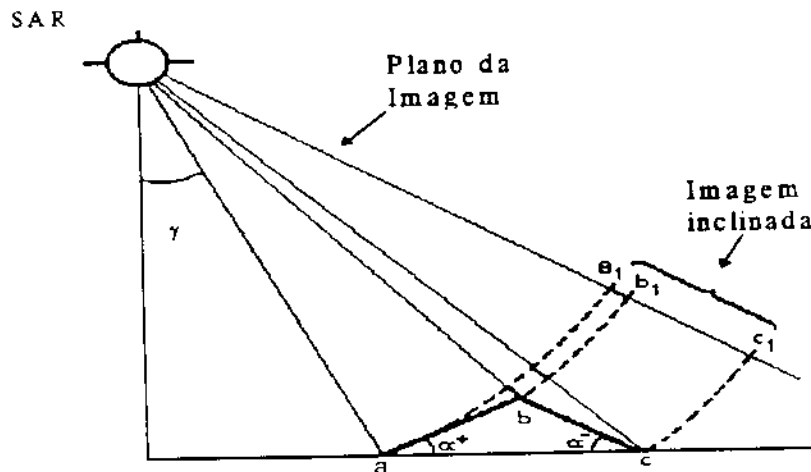


Fig. 3.2 - Encurtamento de Rampa ("Foreshortening")

3.1.3. -INVERSÃO DE RELEVO ("Layover")

É um caso extremo de deslocamento de relevo; ocorre quando o topo de uma feição está mais próximo do radar que a base.

- depende da diferença em slant range entre o topo e a base da feição
- depende e é função do:
 - ângulo da frente de ondas: ângulo de depressão ou posição em slant range
 - inclinação da rampa
- fenômeno associado a near range e rampas bem inclinadas.

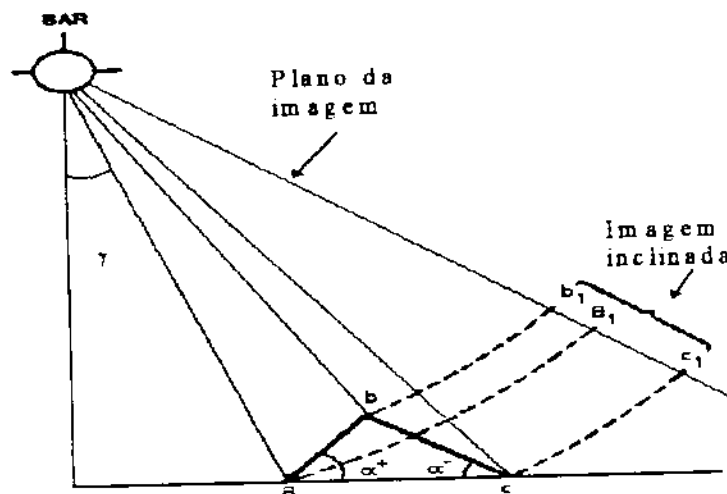


Fig. 3.3 - Inversão de relevo ("Layover")

3.2. - σ^0 vs INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS

- influencia a tonalidade de alvos na imagem radar e conseqüentemente a interpretação;
- não existem expressões analíticas para alvos naturais;
- **utiliza-se modelos simplificados;**
-

$$\sigma^0 = f(\lambda, \theta, P, \phi, \epsilon^*, \Gamma_1, \Gamma_2, V)$$

parâmetros radar	comprimento da onda ângulo de incidência polarização da onda incidente
parâmetros alvos	ângulo de aspecto permitividade (constante dielétrica) (rugosidade da superfície > que /10) (rugosidade da sub-superfície) (coeficiente de espalhamento em volume)

- o parâmetro que está afetando σ^0 é significativo?
- o parâmetro de interesse está afetando σ^0 ?
- qual o parâmetro do terreno que mais afeta σ^0 ?
- requer informações da área e quase sempre **campo!**
- **estratégia adequada:** selecionar os parâmetros radar de modo a otimizar os parâmetros alvos (a informação obtida), para uma dada aplicação.
- existem poucos radares imageadores **CALIBRADOS !!!**
- identificar, descrever e entender **TONALIDADE** em imagens radar, não é apenas reconhecer diferentes níveis de tonalidade !!!
- qual a tonalidade que representa uma classe (alvo)?

3.2.1. - COMPRIMENTO DE ONDA - λ (OU FREQUÊNCIA)

Variações no sinal (σ^0) atribuídos a λ estão diretamente relacionadas à **rugosidade** da superfície e à **permitividade** do material ou alvo.

- **rugosidade**
- como regra geral tem-se que quanto maior a **rugosidade** mais difusa a radiação espalhada ocasionando conseqüentemente um maior σ^0 ; —> reflexão difusa
- no caso de superfícies lisas pouca radiação retorna para o radar obtendo-se como resultado valores menores de σ^0 ; —> reflexão especular
tonalidade escuras geralmente associadas a corpos d'água.

- permissividade
- refletividade de alvo depende da magnitude de ϵ^* umidade, H_2O
- penetração da radiação: quanto $> \lambda$ $>$ penetração da radiação no alvo.
 - $\lambda \leq 1\text{cm}$ - maioria das superfícies são rugosas - penetração é desprezível
 - $\lambda > 1\text{m}$ - poucas superfícies são rugosas - penetração variável
 - em solos úmidos - centímetros
 - em solos secos - pode ser da ordem de metros

A Figura 3.4 ilustra a interação das microondas com diferentes alvos na superfície. Neste exemplo consideramos que o comprimento de onda é o mesmo em todas as diferentes situações. A Figura 3.5 exemplifica a penetração da radiação a vegetação em função da umidade e do ângulo de incidência.

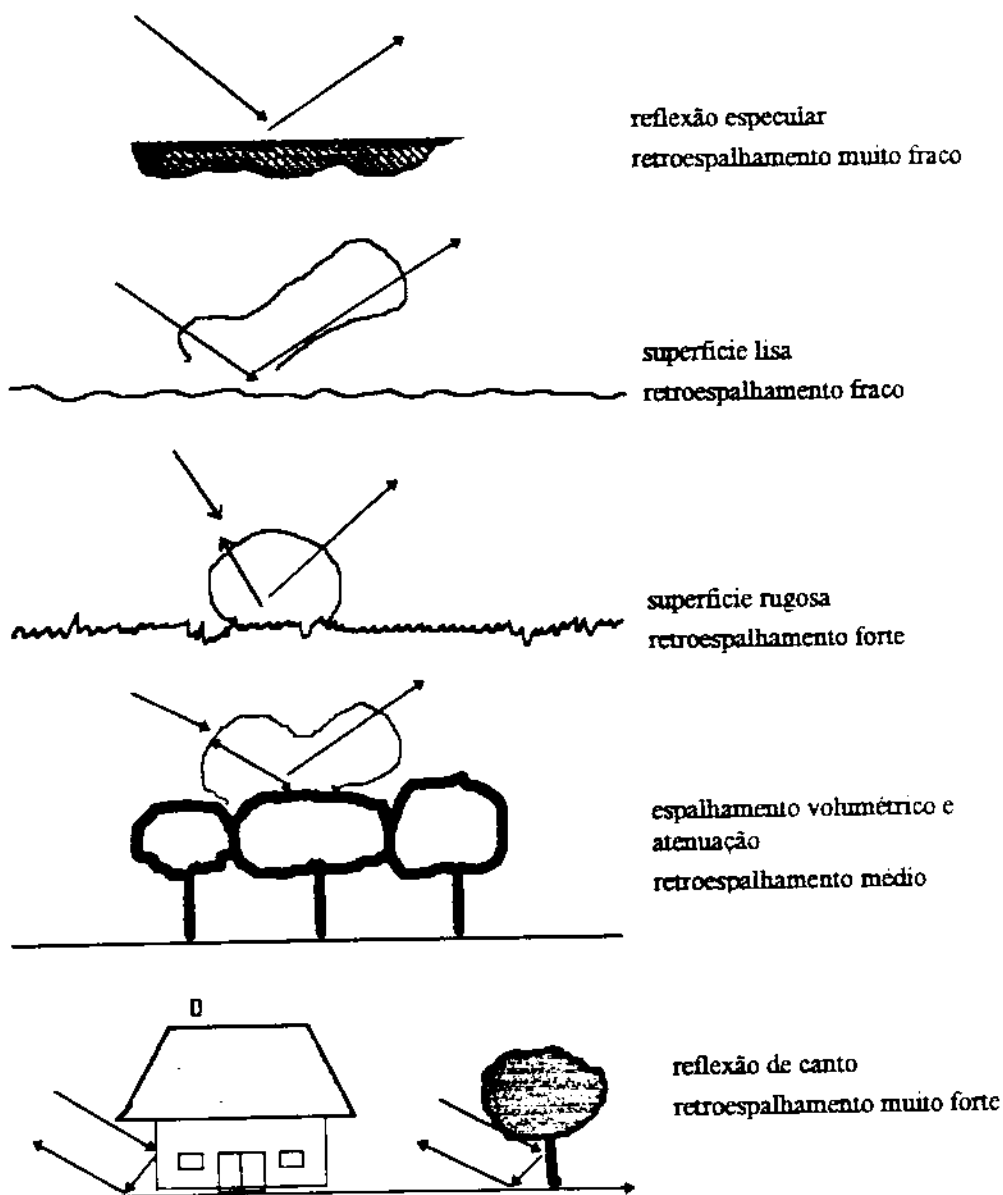


Figura 3.4. Interação das microondas com alvos na superfície.

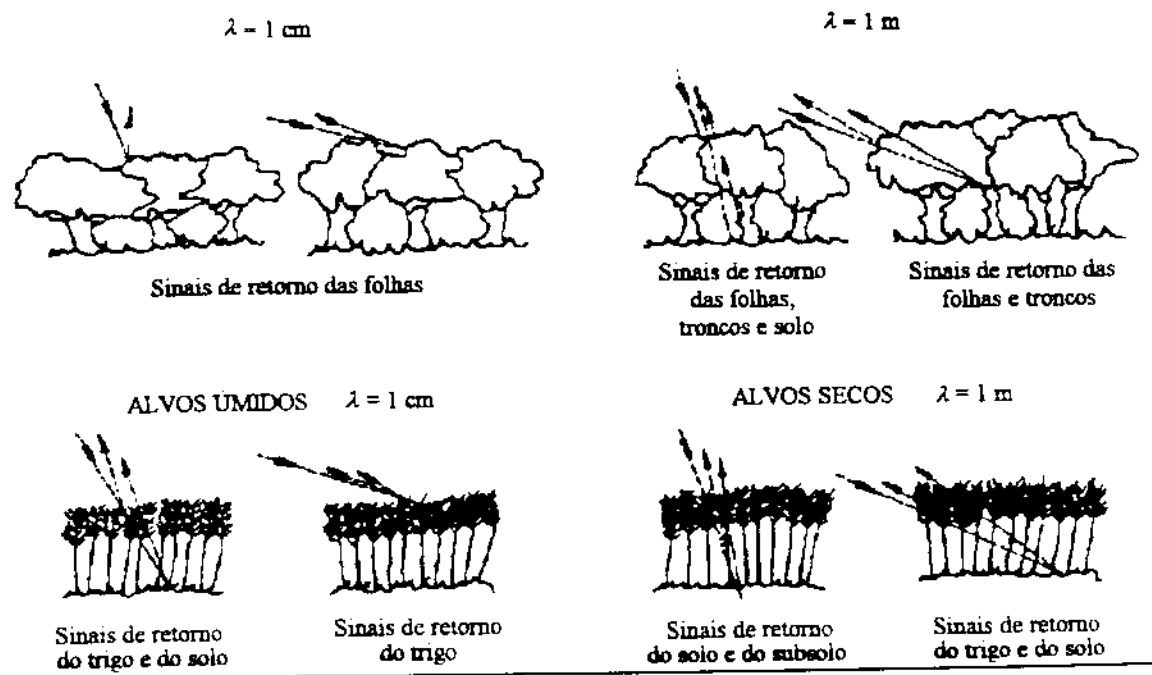


Fig. 3.5. - Penetração da radiação radar na vegetação, em função da umidade e do ângulo de incidência.
 FONTE: Adaptada de Ulaby *et al.* (1981), p. 4.

3.2.2. - ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

ângulo de incidência é definido no alvo

- σ^0 geralmente aumenta com a diminuição de θ
- σ^0 independe de θ para superfícies rugosas.
- quanto $> \theta$, σ^0_{VV} ou σ^0_{HH} dependem cada vez mais de ϵ^* e menos de Γ_1
- magnitude de σ^0 é muito sensível a pequenas variações de declividade (rampa) para θ pequenos.

3.2.3. - POLARIZAÇÃO

- ondas eletromagnéticas são descritas pelas *Equações de Maxwell*
- E refere-se ao **campo elétrico**; H ao **campo magnético** (vide Figura no Capítulo 4)
- permitividade e permeabilidade complexas controlam a propagação
- quando uma onda eletromagnética se dirige a um plano de interceptação (meio) suas amplitudes podem ser decompostas de modo que parte da onda está perpendicular e parte paralela ao plano (plano de incidência) (Fig. 3.6)
 - E_{\perp} ao plano de incidência - polarização vertical
 - E_{\parallel} ao plano de incidência - polarização horizontal
- todos os outros casos para polarização são derivados destes.

- radares imageadores geralmente transmitem radiação eletromagnética plano-polarizada. (Horizontal //, vertical \perp ao plano)

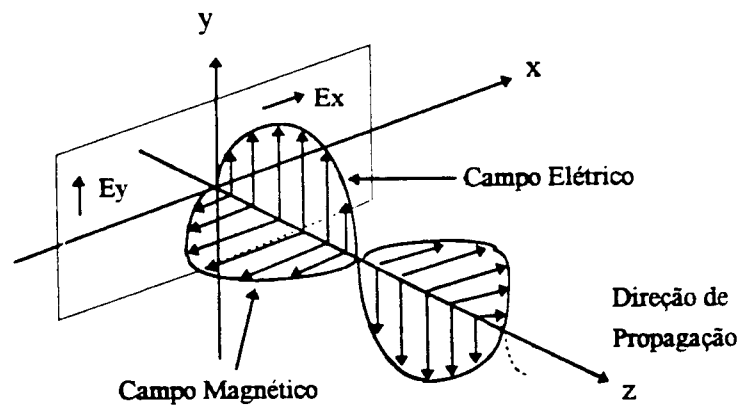


Figura 3.6 - Radiação eletromagnética - conceito de polarização

- quando a radiação eletromagnética interage com o alvo, ela é depolarizada e sofre rotação variável.
- as componentes vertical e horizontal são recebidas por antenas distintas.
- HH e VV: para alvos pontuais ou extensos, geralmente os ecos são mais fortes
- HV e VH: apesar de mais fracos, podem conter informações importantes sobre vegetação, gelo, neve ou formações geológicas. Devido ao espalhamento múltiplo pode estar relacionado à BIOMASSA.

3.2.4. - ÂNGULO DE ASPECTO- ϕ

• *declividade do terreno vs. ângulo de visada*

- além de afetar a influência de θ , Γ_1 e ϵ^* é responsáveis por distorções geométricas nas imagens de radar
- próximo à aeronave (near range):
- as rampas opostas são imageadas tangencialmente ou geram sombras (estão sombreadas)
- quanto mais acidentado o terreno, mais difícil se torna a interpretação da rede de drenagem e a determinação de estruturas geológicas !!!
- efeitos causados pelo declive em áreas de pouca vegetação, podem afetar tanto o σ^v , que se torna impossível detectar variações de rugosidade (Γ_1) ou ϵ^*

3.2.5. - PERMITIVIDADE - ϵ

- parâmetro associado ao *campo elétrico* (como a permeabilidade é associada ao campo magnético) que descreve as características elétricas de materiais;
- pode ser *real* ou *complexa* dependendo do material (alvo);
- *permitividade complexa* na literatura erroneamente designada de “*complex dielectric constant*” ou também somente “*dielectric constant*”;

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$$

- ϵ^* influencia a absorção e propagação de ondas eletromagnéticas (habilidade de armazenar e refletir energia)
- ϵ' \longrightarrow constante dielétrica

quantidade de energia que pode ser armazenada na forma de campo elétrico
(capacidade de polarização)

- ϵ'' —> fator de perda

refere-se à quantidade de energia que pode ser dissipada na forma de calor

$$\epsilon^* - \text{PERMITIVIDADE absoluta} \quad \epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \text{ relativo}$$

- ϵ_0 = permissividade do vácuo ($8,85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$)
- depende fortemente do teor de H_2O
- baixo teor de H_2O penetração grande reflexão é pouca

A Figura 3.7 apresenta um exemplo da penetração dos sinais radar no solo, em função do conteúdo volumétrico de água, da frequência e do tipo de solo

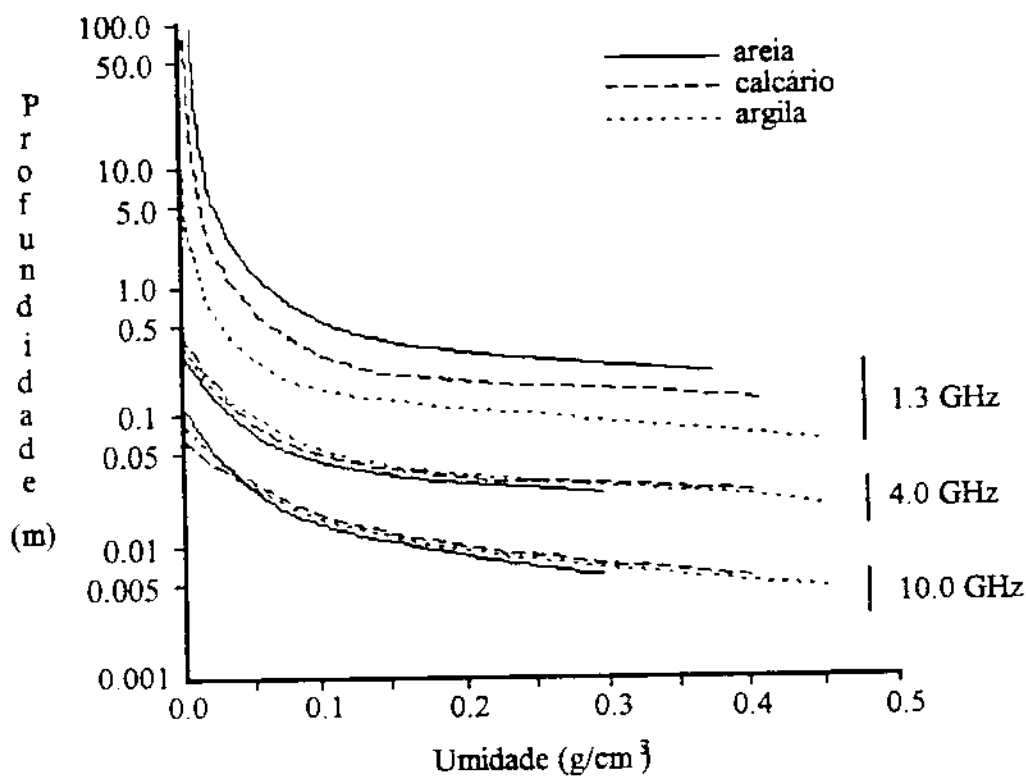


Fig. 3.7 - Penetração dos sinais radar no solo, em função do conteúdo volumétrico de água, da frequência e do tipo de solo.

FONTE: Adaptada de Ulaby et al. (1981), p. 4.

3.3. - TEXTURA EM IMAGENS SAR

TEXTURA - delineamento de limites de homogeneidade

- importante em mapeamentos (geologia, vegetação)
- frequência da mudança na tonalidade na imagem ou distribuição da tonalidade
- **MICROTEXTURA** - inerente ao radar (estatística de amostragem + "FADING") relacionada à resolução em range e azimute e ao número de amostras independentes.
- **MESOTEXTURA** - da ordem de algumas células de resolução; espacialmente organizada distribuição de elementos estruturais em comunidades vegetais
- **MACROTEXTURA** - organização é fundamental em geologia e geomorfologia; textura é menos afetada que tonalidade em radares não calibrados.

REFERÊNCIAS PARA CONSULTA

- Curlander, J. C.; McDonough, R.N. **Synthetic aperture radar: systems and signal processing**. New York, NY, John Wiley & Sons, 1991.
- Chuvieco, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid, Rialp S.A, 1990.
- Dallemand, J.F. et al. **Radar imagery: Theory and interpretation lecture notes**. Rome, FAO, 1993, 103p.
- de Loor, G. P. Introduction and some aspects of image formation in radar remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, 1(1):3-18, June, 1983.
- Eaves, L. J.; Reedy, E. K. **Principles of modern radar**, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1987.
- Hovanessian, S.A. **Synthetic array and imaging radars**, Artech House, Washington St., MA, 1980.
- Jasik, H. **Antenna engineering handbook**. McGraw-Hill Book, New York, NY, 1961.
- Kingsley, S.; Quegan, S. **Understanding radar systems**. Berkshire, McGraw-Hill Book, 1992.
- Krul, L.; de Loor, G. P. Experiments with microwave sensors. **International Journal of Remote Sensing**, 13(6-7):1201-1216, May, 1992.
- Krul, L. Introduction to the use of radar in remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, 1(1):159-178, June, 1983.

- Leberl, F.W. Photometric aspects of remote sensing with imaging radar. **Remote Sensing Reviews**, 1(1):71-158, June, 1983.
- Lo, Y.T.; Lee S.W. **Antena handbook**. Van Nostrand Reinhold, New York., NY, 1993.
- Moore, R. K. Imaging radar systems, In: Colwell, R.N. (ed). **Manual of Remote Sensing** (2^a ed). American Society of Photometry, Falls Church, VI, cap 10, p. 429-474. 1983.
- Proakis J.G.; Manolakis D.G. **Digital signal processing -Principles, Algorithms and Applications**, 2ed., New York, NY, 1992.
- Steinberg B.D.; Subbaram H.M. **Microwave imaging techniques**, New York, NY, 1991.
- Reeves G.R.; Anson A.; Landen D. **Manual of remote sensing**, Falls Church, Virginia, 1975.
- Trevett J.W. **Imaging radar for resources surveys.**, London, University press-Cambridge, 1986.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive: Microwave remote sensing fundamentals and radiometry**. V 1. Norwood, MA, Artech House, 1981.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory**. V. 2. Norwood, MA, Artech House , 1986.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive: from theory to applications**. V 3. Dedham, MA, Artech House, 1986b.

4 - PROCESSAMENTO DE IMAGENS SAR

Nesse capítulo são apresentados alguns tópicos relevantes do processamento SAR, visando a correção geométrica, radiométrica e a extração de informações. Os tópicos de interesse estão distribuídos em seções do modo como se segue, ou seja:

- **seção 4.1** - princípio de geração de imagens SAR, conceito de processamento “multi-look” e a formatação dos dados de imagem.
- **seção 4.2** - características estatísticas das imagens SAR baseadas no modelo multiplicativo do ruído “Speckle”, e filtros mais comuns utilizados na redução desse ruído.
- **seção 4.3** - um método de correção de padrão de antena para a uniformização radiométrica no sentido de “range”.
- **seção 4.4** - conversão da imagem inclinada para a imagem no solo, “slant to ground conversion”, bem como a conversão utilizando Modelo Numérico de Terreno, visando a correção de sombras, inversões (“layover”) e encurtamentos (“foreshortening”).
- **seção 4.5** - registro entre imagens SAR, bem como o registro com imagens de sensores óticos.
- **seção 4.6** - noções básicas de Polarimetria, o conceito de matriz de espalhamento e de assinatura polarimétrica.
- **seção 4.7** - noções básicas de Interferometria SAR para a geração de Modelos Numéricos de Terreno.

4.1 - GERAÇÃO DE IMAGENS SAR

Os dados (ecos) adquiridos por um sistema SAR necessitam sofrer um processamento para que seja gerada uma imagem correspondentes a esses dados. No passado esse processamento era feito por sistema ótico, pouco flexível, impreciso e caro. Com o desenvolvimento de computadores cada vez mais rápidos, foi possível gerar imagens SAR digitais mais precisas, através de algoritmos apropriados.

4.1.1 - FORMAÇÃO DA IMAGEM SAR

A geometria básica de um sistema de imageamento por Radar de Abertura Sintética é mostrado na Figura 4.1.1. Nesse sistema, a plataforma (avião ou satélite) com o sensor SAR se desloca a uma velocidade V em relação ao solo, a uma altura H , apontando a antena lateralmente com um ângulo θ em relação ao nadir.

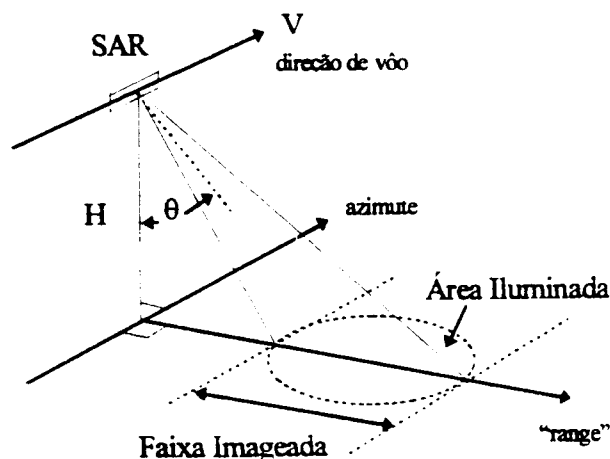


Figura 4.1.1 - Geometria do sistema SAR

À medida que a plataforma se desloca o transmissor envia pulsos de largura T_p a intervalos regulares de T segundos, como mostra a Figura 4.1.2

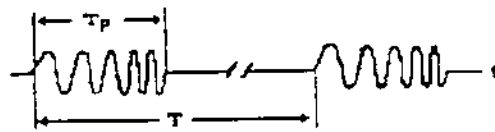


Figura 4.1.2 - Pulso transmitido

O pulso transmitido é modulado linearmente em frequência (conhecido como "chirp"), com uma variação de frequência entre um valor mínimo f_{\min} e um valor máximo f_{\max} .

Essa variação de frequência é conhecida como largura de banda do pulso, ou seja, $B_p = f_{\max} - f_{\min}$.

Para entender melhor o que ocorre em um sistema de imageamento SAR, utiliza-se como modelo o comportamento de um alvo puntual, desde a sua entrada até a saída do campo visual da antena.

A Figura 4.1.3 mostra o imageamento de um ponto P, desde a sua entrada no campo visual da antena no instante t_e até sua saída no instante t_s . No intervalo de tempo $(t_s - t_e)$ o radar envia um certo número N de pulsos, dessa maneira coleta-se N amostras do eco do ponto P nesse intervalo, essas amostras são armazenadas em algum dispositivo de memória. Durante o intervalo $(t_s - t_e)$ a plataforma SAR se desloca $V \cdot (t_s - t_e)$ metros, que é conhecido como o comprimento da "Abertura Sintética".

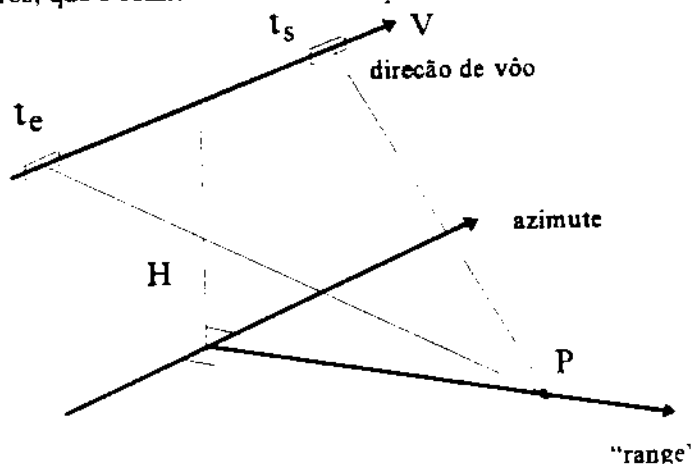


Figura 4.1.3 - Intervalo da abertura sintética $(t_s - t_e)$.

O eco recebido de cada pulso enviado, sofre uma variação de frequência devido a velocidade V da plataforma. Essa variação é conhecida como efeito Doppler. A variação de frequência no intervalo t_e até t_s é conhecida como largura de banda Doppler, B_D .

As variações de frequência B_p e B_D influenciam diretamente nas resoluções de "range" e azimute respectivamente.

4.1.2 - PRÉ-PROCESSAMENTO SAR

Para se gerar uma imagem SAR de alta resolução, utiliza-se a técnica de compressão de pulsos tanto em range quanto em azimute. A resolução atingível na direção de azimute depende da largura de banda Doppler, que por sua vez depende do comprimento da abertura sintética, ou seja: $\rho(a) = 1 / B_D$.

A Figura 4.1.4 apresenta a intensidade do sinal processado de um alvo puntual na imagem. As resoluções na direção de “range”, r , e na direção de azimute, a , estão localizadas em um plano de -3dB abaixo do pico.

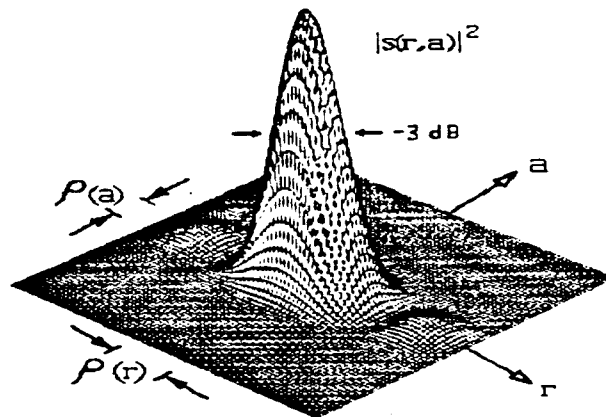


Figura 4.1.4 - Função de espalhamento pontual

4.1.3 - PROCESSAMENTO “MULTI-LOOK”

O ruído Speckle é um dos principais fatores que degradam a qualidade das imagens SAR. O Speckle é um ruído multiplicativo que é proporcional a intensidade do sinal recebido e é característico de sistemas que se utilizam de radiação coerente, como o SAR.

Para amenizar esse problema, utiliza-se o processamento “multi-look”, que consiste em dividir a abertura sintética em visadas (looks). A Figura 4.1.5 ilustra um exemplo da divisão da abertura sintética em 3 “looks”.

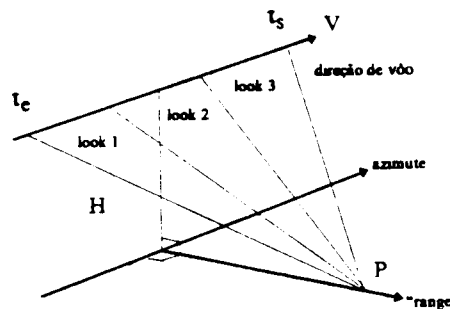


Figura 4.1.5 - Exemplo de “multi-look”, no. “looks” = 3.

A imagem final é composta pela média das imagens de cada “look”, geradas separadamente. Assume-se que as imagens de cada “look” sejam estatisticamente independentes entre si. Esta técnica aumenta a relação sinal-ruído da imagem final, proporcional a raiz quadrada do número de “looks”, diminuindo o efeito do ruído Speckle.

O processamento “multi-look” provoca uma degradação na resolução em azimute, uma vez que as imagens de cada “look” possuem uma largura de banda menor que a largura total B_D , ou seja:

$$B_{\text{look}} = B_D / n_l \quad \text{onde } n_l \text{ é igual ao número de “looks”}.$$

A resolução em azimute neste caso torna-se igual a: $\rho(a) = n_l / B_D$.

A perda de resolução em azimute é compensada por uma melhor qualidade visual da imagem, além disso, a resolução em azimute para imagens de 1 “look” são em geral menores que em “range”, dessa maneira o processamento “multi-look” pode ser utilizado para que as resoluções sejam iguais, tornando o pixel quadrado.

4.1.4 - FORMATOS DAS IMAGENS SAR

Normalmente as imagens gerada de 1 "look" são fornecida no formato "complexo", para que seja possível o conhecimento da fase de cada pixel da imagem. Certas aplicações, tais como polarimetria e interferometria, utilizam esse tipo de imagem.

As imagens "multi-look" normalmente são representas em imagens de Amplitude, ou seja:

$$A = \sqrt{U_i^2 + U_q^2}$$

As imagens de Amplitudes são também conhecidas como imagens detectadas linearmente.

As imagens também podem ser representadas em Intensidade, ou seja:

$$I = U_i^2 + U_q^2$$

4.1.5 - REFERÊNCIAS

- Mc Donough, R., N.; Raff, B., E.,; Kerr, J., L., "Image formation from spaceborne synthetic aperture radar signals". Johns Hopkins APL Technical Digest, 6(4), p: 300-312, 1985.
- Curlander, C., J.; McDonough, R., N., "Synthetic Aperture Radar- Systems and Signal Processing", John Wiley & Sons, INC, 1991.

4.2- REDUÇÃO DE RUIDO SPECKLE

A presença do ruído Speckle em imagens SAR reduz a separabilidade entre classes de uso do solo. É importante tratar o Speckle no sentido de aumentar a possibilidade de separação das classes. Existem dois métodos para se diminuir o ruído Speckle: o processamento "multi-look", descrito na secção 4.1, e a filtragem. Os filtros devem manter o valor médio do retorno do radar (backscatter), preservar as bordas presentes na imagem e as informações de textura.

O ruído Speckle esta sempre associado a sistemas de imageamento coerente, tais como os obtidos por microondas, laser e ultrasonografia. Considera-se que em uma célula de resolução de uma cena imageada, existam um número muito grande de elementos difusores, aleatoriamente distribuídos, de tal forma que esses elementos possam interferir uns aos outros construtivamente e destrutivamente, fazendo aparecer variações súbitas na intensidade da imagem, caracterizando o ruído Speckle, Figura 4.2.1.

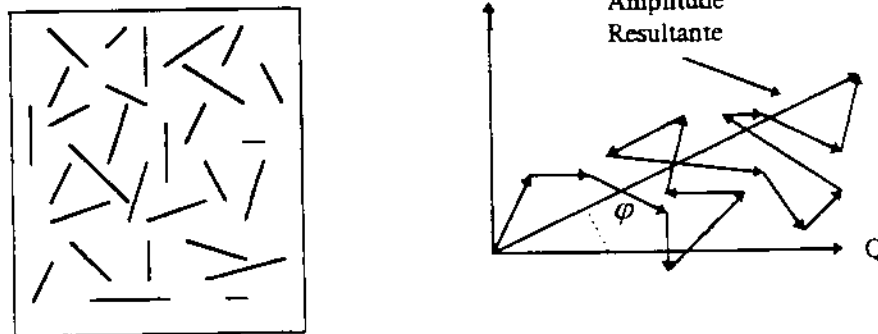


Figura 4.2.1 - Célula de resolução e o "backscatter" resultante

Imagens com ruído Speckle não podem ser tratadas com algoritmos usuais que utilizam modelo de ruído aditivo (filtro Wiener, por exemplo), uma vez que o Speckle corrompe o sinal de uma maneira multiplicativa. Dessa maneira as distribuições da amplitude da imagem e da intensidade não são Gaussianas.

Muitos filtros espaciais tem sido desenvolvidos para a redução do ruído Speckle e para o aumento da relação sinal-ruído, objetivando uma melhoria na separabilidade entre classes presentes em uma imagem, com a mínima perda de informação. Estes filtros podem ser divididos em dois grupos: os filtros convolucionais e os filtros pontuais, adaptativos ou não.

No primeiro grupo encontram-se:

Filtro de Média: é o filtro mais simples para a redução do ruído. Consiste em se trocar o nível de cinza de um pixel (valor observado) pela média aritmética dos níveis de cinza de uma janela de tamanho $N \times N$, centrada neste pixel. É um filtro geral, por não adotar nenhum modelo específico para o ruído.

Filtro de Frost [Frost-1982]: é um filtro convolucional linear, derivado da minimização do erro médio quadrático sobre o modelo multiplicativo do ruído. Neste filtro incorpora-se a dependência estatística do sinal original, uma vez que se supõe uma função de correlação espacial exponencial entre pixels. É um filtro adaptativo que preserva a estrutura de bordas.

No segundo grupo, os mais conhecidos são:

Filtro de Mediana: este filtro baseia-se em estatísticas de ordem. A aplicação do filtro consiste na troca do nível de cinza do pixel, pela mediana dos níveis de cinza observados em uma janela $N \times N$, centrada neste pixel. Este filtro é não linear, não adaptativo, geral e tem características de preservação das bordas.

Filtro de Lee [Lee-1981]: adota um modelo multiplicativo para o ruído e obedece o critério de "local linear minimum mean square error". Local, porque utiliza estatísticas locais do pixel a ser filtrado, admitindo a não estacionaridade da média e da variância do sinal; linear porque realiza uma linearização por expansão em série de Taylor da multiplicação do sinal e o ruído em torno da média, utilizando apenas os termos lineares. O resultado da linearização transforma o modelo multiplicativo do ruído em aditivo, ou seja, o ruído e o sinal tornam-se independentes; e, finalmente, "minimum mean square error", porque minimiza o erro médio quadrático através do filtro de Wiener (filtro baseado no critério de mínimo erro médio quadrático). O filtro de Lee é um filtro adaptativo e geral.

Filtro de Kuan/Nathan [Kuan et al.-1982]: adota o modelo multiplicativo. O procedimento é semelhante àquele de Lee, onde a estimação ponto a ponto é feita utilizando-se o filtro de Wiener. A diferença entre eles, entretanto, consiste no fato de que no filtro de Kuan/Nathan não se realiza nenhuma aproximação. É também um filtro adaptativo e geral.

A Figura 4.2.2 mostra a imagem original (ERS-1, 8 "looks") e as correspondentes imagens filtradas, utilizando os seguintes filtros: Filtro de média 5×5 , Filtro de Frost adaptativo, Filtro de mediana, Filtro de Lee fixo e Filtro de Kuan fixo (janela = 3).

A utilização de um determinado filtro é dependente da aplicação desejada [Sidnei-95]. Por exemplo, caso se deseje apenas segmentar uma imagem, necessita-se de um filtro que preserve os detalhes, ou seja, aquele filtro que apresente a menor perda de resolução possível.



Figura 4.2.2 - Imagem original e imagens filtradas

Para uma determinada aplicação, se o fator mais importante for:

- Relação sinal-ruído - *aconselha-se o uso do Filtro de Média.*
- Mínima perda de resolução - *aconselha-se o uso do Filtro de Frost*
- Relação sinal-ruído e mínima perda de resolução, concomitantemente -*aconselha-se o Filtro de Frost.*
-

Medidas quantitativas realizadas nos filtros testados, mostraram que os filtros de Lee, Kuan, Frost e de Média preservam o valor médio da imagem. Os filtros não específicos para ruído Speckle, Média e Mediana, apresentar uma considerável redução no desvio padrão, implicando em uma grande perda de informação (perda de resolução). O filtro de Frost apresentou a máxima preservação de textura e uma menor perda de informação.

4.2.3 - BIBLIOGRAFIA

Frost, V. S.; Stiles, J. A.; Shanmugan, K. S.; Holtzman, J. C., "A model for radar images and its applications to adaptive digital filtering of multiplicative noise", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-4, p: 157-166, 1982.

Kuan, D. T.; Sawchuk, A. A.; Strand, T. C.; Chavel, P., "Adaptive restoration of images with speckle", SPIE Proceeding V. 359, p: 28-38, Washington, 1982.

Lee, J. S., "Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images", Computer Graphics and Image Processing, 17, p: 24-32, 1981a.

Lee, J. S., "A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, SMC, p:85-89, 1981b.

Sidnei J. S. S., "Avaliação do desempenho de filtros redutores de Speckle em imagens de radar de abertura sintética". Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto, INPE, 1995.

4.2.4 - REFERÊNCIAS

Yanasse, C. C. F.; Frery, A. C.; Sant'Anna, S. J. S., "Stochastic distributions and the multiplicative model: relations, properties, estimators and applications to SAR image analysis", (INPE-5630-NTC/318), São José dos Campos, 1995.

Frery, A. C.; Yanasse, C. C. F.; Sant'Anna, S. J. S., "Statistical characterization of SAR data: the multiplicative model and extensions", Simposio de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota (SELPER), p: 502-515, México, 1995.

4.3 - CORREÇÃO DO PADRÃO DE ANTENA

Variações de baixa frequência no brilho das imagens, na direção de "range" são causados principalmente pela perda de potência relacionada com a geometria de visada lateral, que decai com $1/R^3$ no caso das imagens SAR, onde R é a distância entre a antena e um dado ponto na imagem.

Esse problema é mais acentuado em imagens adquiridas por avião, pois a razão entre o R_{min} (início da faixa imageada) e R_{max} (fim da faixa) é bem menor em relação as adquiridas por satélites, onde a razão é praticamente 1, Figura 4.3.1.

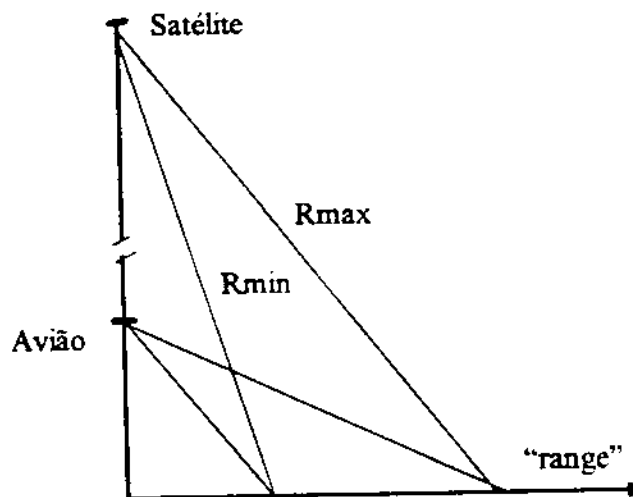


Figura 4.3.1 - Variação do "range" para aeronave e satélite

Esta perda de potência é corrigida no instante da aquisição de cada pulso, através do STC (Sensitivity Time Control), visando a correção do decaimento da potência. Devido a imperfeição no sistema STC ou outras perturbações da eletrônica do radar (variação do ganho do amplificador durante o tempo de aquisição do eco), mecânicas ou elétrica, a correção não é perfeita, permanecendo alguma variação residual

O objetivo da Correção do Padrão de Antena é criar uma imagem que tenha uma média uniforme nos níveis de cinza na direção de "range".

O algoritmo consiste em gerar um Padrão através da média das colunas da imagem. A média das colunas devem ser tomadas em regiões (janelas) tão homogêneas quanto possíveis. Deve-se garantir que exista a média em toda a direção de "range".

O Padrão obtido através da média deve ser ajustado por um polinômio (normalmente de grau 8) para que se retire as flutuações de alta frequência, permanecendo somente as flutuações de baixa frequência. O Padrão ajustado pode então ser utilizado para a correção da flutuação.

4.4- CONVERSÃO "SLANT TO GROUND RANGE"

O eco recebido de cada pulso emitido pelo radar é amostrado em intervalos regulares de T_a segundos, e armazenados em algum dispositivo de memória, Figura 4.4.1.

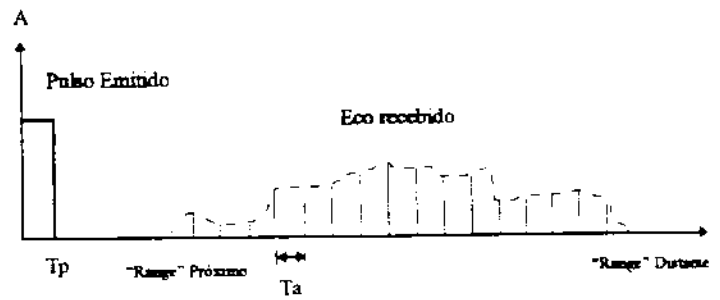


Figura 4.4.1 - Amostragem do eco recebido a intervalos T_a

O processo de amostragem faz com que a informação contida em cada intervalo T_a , não tenha a mesma área para as amostras situadas no "range" próximo em relação as do "range" distante, devido a variação do ângulo de incidência θ , como mostra a Figura 4.4.2.

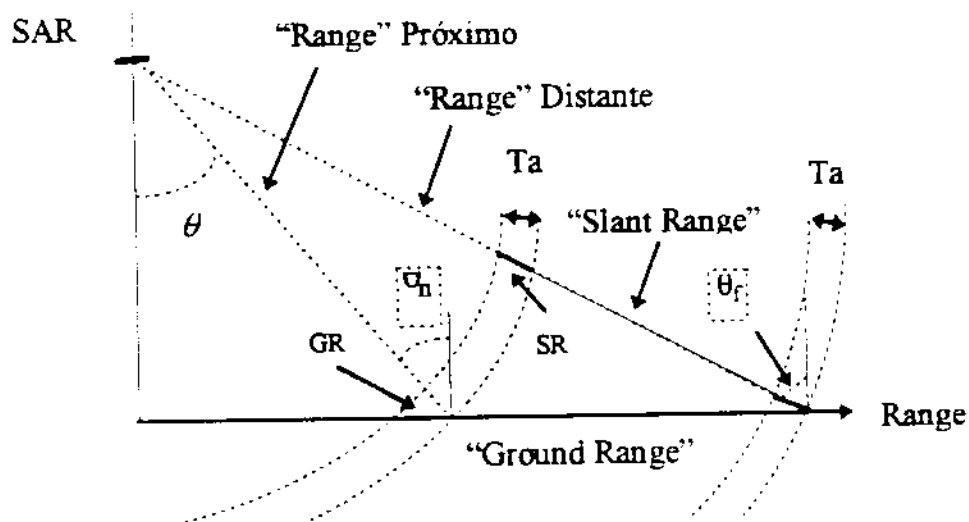


Figura 4.4.2 - Imagem em "Slant" e "Ground Range"

A imagem formada é chamada de "inclinada" ou em "slant range". Essa imagem possui uma distorção geométrica, pois as amostras SR igualmente espaçadas na faixa imageada não são igualmente espaçadas no chão, GR. Para que a imagem possa ser registrada e geocodificada, as amostras no chão devem ser igualmente espaçadas, para tanto necessita-se converter a imagem de "slant" para "ground range".

A conversão consiste em projetar as amostras (pixels) no chão e depois reamostrá-las com um espaçamento uniforme. A relação entre a resolução em "slant range", δ_{SR} , e em "ground range", δ_{GR} , depende do ângulo de incidência θ , da seguinte forma:

$$\delta_{GR} = \delta_{SR} / \cos \theta$$

A conversão ideal é aquela que leva em conta o modelo numérico do terreno (MNT), possibilitando a correção das distorções provocada pelos efeitos de inversão (layover), sombra e encurtamento.

Em geral, nem sempre o MNT correspondente a imagem é disponível. Imagens obtidas por plataformas aerotransportadas, de regiões não montanhosas, são em geral convertidas para "ground range" supondo-se a terra plana. Nesse tipo de imagem o ângulo de incidência é alto devido a baixa altitude da plataforma, com isso, o efeito "layover" praticamente não existe, existindo apenas o problema de sombra se a região for montanhosa.

4.4.1 - CONVERSÃO UTILIZANDO MNT

A conversão utilizando Modelo Numérico de Terreno (MNT) visa corrigir as distorções geométricas inerentes ao sistema SAR (visada lateral), Figura 4.4.3, ou seja, encurtamento (item 1, segmento a-b encurtado), inversão (item 2, segmento a-b invertido de posição) e sombra (item 3, segmentos b-c-d não imageados). Através da conversão utilizando MNT, pode-se gerar imagens projetadas ortogonalmente ao solo, conhecidas como orto-imagens.

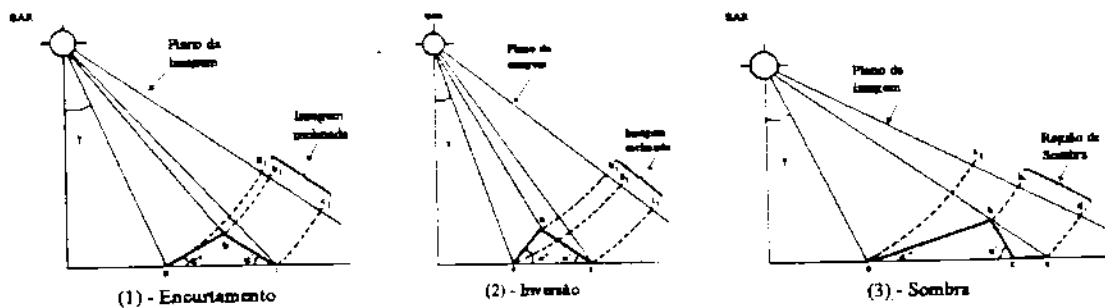


Figura 4.4.3 - Distorções inerentes do sistema SAR

A conversão utilizando MNT consiste basicamente dos seguintes passos:

- a) Geração de uma imagem SAR simulada a partir do MNT correspondente a imagem.
- b) Registro entre as imagens SAR simulada, SAR original e MNT.

A geração da imagem simulada é obtida a partir da geometria de aquisição da imagem original (altura da plataforma, ângulo de incidência θ , "range" próximo e "range" distante) e do MNT relativo a imagem. Com isso é possível conhecer a localização das áreas de inversão e de sombra na imagem original.

O registro da imagem simulada, da imagem original e do MNT é realizado com o auxílio de pontos de controle comuns a essas três imagens (cruzamento de rodovias, pista de aeroportos, pontes, etc...). Através desses pontos de controle gera-se um modelo polinomial de correção das imagens. A imagem original é então reamostrada segundo o modelo polinomial.

Caso o MNT e a imagem simulada estejam em uma projeção cartográfica (UTM por exemplo), a imagem reamostrada final é dita geocodificada.

4.4.2 - REFERÊNCIAS

Kropatsch, W., G.; Strobl, D., "The Generation of SAR Layover and Shadow Maps From Digital Elevation Models", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, no. 1, p: 98-107, January 1990.

Curlander, J., C., Pang, S., S., "Rectification of Terrain Induced Distortions in Radar Imagery", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 53, no. 5, p: 507-513, May 1987.

4.5 - REGISTRO DE IMAGENS SAR

O registro de imagens é o processo de sobreposição de duas ou mais imagens adquiridas a partir da mesma região geográfica, fazendo com que uma sobreponha perfeitamente sobre a outra

O registro de imagens é uma etapa fundamental quando se deseja fazer uma integração de dados adquiridos a partir de sensores diferentes (fusão de imagens/sensores), visadas diferentes, análise temporal das imagens (registro temporal e detecção de mudanças), etc...

Em sensoriamento remoto, há um grande número de sensores de recursos naturais, com diferentes características geométricas e radiométricas. A combinação de imagens pode melhorar o processo de extração de informação

4.5.1 - O PROBLEMA DE REGISTRO DE IMAGENS

Quando uma imagem é adquirida por sensores a bordo de satélites ou aeronaves ela contém distorções radiométricas e geométricas.

As distorções radiométricas afetam os valores dos níveis de cinza da imagem, e são provocadas pelo efeito atmosférico, e erros de medição dos instrumentos (Richards, 1986).

As distorções geométricas mudam a geometria da imagem de modo que a posição, o tamanho e a forma do pixel são alterados durante o processo de aquisição de imagens.

São várias as fontes de erros geométricos tais como a rotação da terra durante o processo de aquisição, a curvatura da terra, variações da velocidade e altitude da plataforma, mudanças na elevação topográfica, etc... [Richards-1986]. Alguns destes efeitos são mostrados na Figura 4.5.1

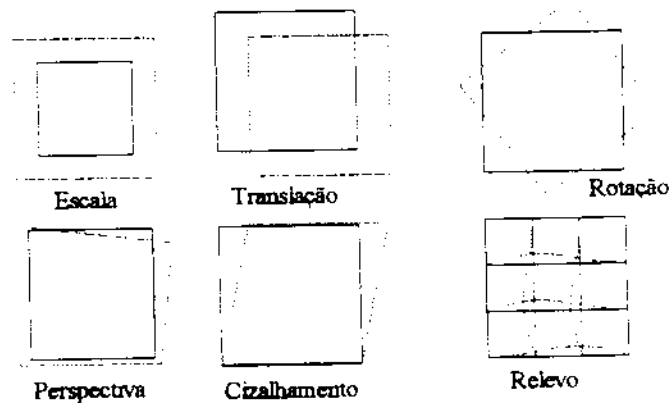


Fig. 4.5.1 - Efeitos de distorções geométricas.

Distorções sistemáticas como aquelas provocadas pela rotação da terra e órbita não-polar do satélite, podem ser corrigidas usando modelos orbitais e dados de calibração. Outras distorções imprevisíveis devem ser removidas com a ajuda de pontos de controle e modelos matemáticos de distorção (modelo polinomial).

4.5.2 - O REGISTRO

O processo de casamento ou sobreposição é realizado através de uma *transformação espacial* que relaciona as coordenadas espaciais das imagens, e modela a distorção geométrica entre elas. A imagem considerada como o padrão de referência, sobre a qual a segunda é sobreposta, é chamada de *imagem de*

referência, e a imagem a ser registrada com a *imagem de referência* é denominada *imagem de ajuste*, Figura 4.5.2

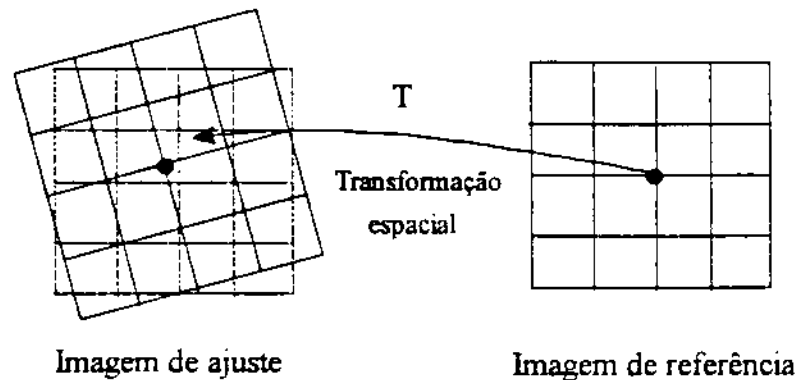


Fig. 4.5.2 - Transformação espacial das coordenadas da imagem de referência para as coordenadas da imagem de ajuste.

A função de transformação espacial pode ser obtida através de pontos de controle (registro manual), obtidos manualmente nas imagens (cruzamento de estradas, pontes, pista de aeroportos, ou qualquer outro objeto que seja claramente visível nas duas imagens) ou por métodos automáticos baseados em áreas (métodos de correlação) ou em feições.

A Figura 4.5.3 ilustra o processo de registro manual mostrando três pares de feições (*pontos de controle*) nas imagens.

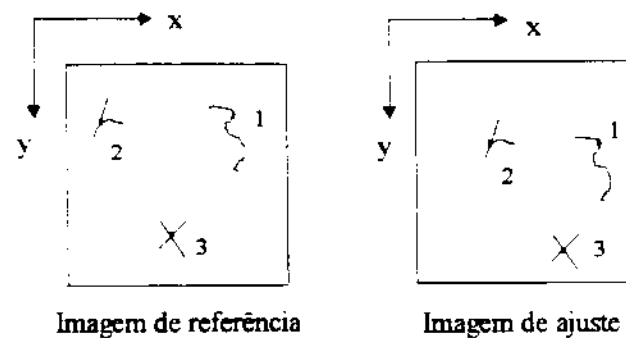


Fig. 4.5.3 - Registro manual.

4.5.3 - REGISTRO ENTRE IMAGENS SAR

O sucesso no registro entre imagens SAR depende do grau de similaridade entre elas, desse modo imagens não similares são difíceis de serem registradas com precisão. O grau de similaridade depende por sua vez da topografia do terreno, do ângulo de iluminação do radar, da resolução geométrica e do ruído Speckle.

Quando as imagens são de terreno plano, as diferenças geométricas entre elas podem ser removidas sistematicamente obtendo-se um casamento com alto grau de precisão.

Quando as imagens são de terreno montanhoso as dificuldades aumentam bastante, principalmente entre imagens obtidas com ângulos de visada diferentes, pois as localizações das bordas nas imagens mudam de uma imagens para a outra, devido principalmente a diferenças de sombras e inversões (layover) entre elas.

Imagens pertencentes a órbitas ascendentes e descendentes apresentam grandes diferenças nos ângulos de incidência entre elas, esperando-se um casamento pobre, principalmente em regiões montanhosas.

No registro manual entre imagens SAR as dificuldades aparecem na localização dos pontos de controle, principalmente devido ao ruído Speckle. Para minimizar esse problema o ruído Speckle deve ser atenuado através de filtros apropriados, que preserve as bordas nas imagens, facilitando a localização de cruzamentos que são candidatos naturais a pontos de controle.

No registro automático, o método mais utilizado é o "registro por área" [Anuta-70, Barnea-72]. O método consiste na correlação entre pequenas janelas extraídas das imagens. O algoritmo consiste em deslocar uma janela em relação a outra e calcular o coeficiente de correlação entre elas. Quando o coeficiente de correlação for máximo tem-se o casamento das janelas, desse modo pode-se conhecer o deslocamento entre as duas imagens na área compreendida pela janela. Utilizando diversas janelas espalhadas por toda a área compreendida pelas imagens, Figura 4.5.4, consegue-se gerar um mapa de deslocamento de uma imagem em relação a outra, gerando-se daí a função de transformação espacial (modelo polinomial) para o registro entre elas.

O registro automático nem sempre pode ser aplicado na área completa das imagens, pois pode existir regiões de baixa similaridade entre as imagens, onde não se consegue obter um alto coeficiente de correlação.

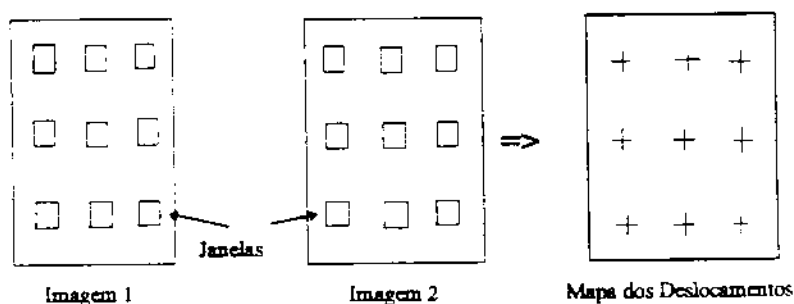


Figura 4.5.4 - Esquema do registro automático por área

4.5.4 - REGISTRO ENTRE IMAGENS SAR E IMAGENS ÓTICAS

As diferentes geometrias de aquisição das imagens SAR e óticas, os diferentes tipos de iluminação utilizados (ótico - passivo, Sol; SAR- ativo, microondas) e as diferentes faixas espectrais utilizadas, fazem com que as imagens desses dois sensores tenham um grau de similaridade baixo, tanto na geometria como na radiometria.

O problema de registrar esses dois tipos de imagens é que as estruturas presentes, tem respostas diferentes aos dois tipos de sensores. As bordas nas imagens, apesar dos problemas de respostas diferentes, é o meio ainda possível de se registrar essas imagens.

No registro manual, o ruído Speckle da imagem SAR deve ser filtrado apropriadamente, de maneira a preservar as bordas, para uma melhor localização dos pontos de controle.

No registro automático, o método da correlação de bordas [Yao-83 e Guindon-85] tem sido utilizado com sucesso para alguns tipos de imagens.

4.5.5 - BIBLIOGRAFIA

Anuta, P.E., "Spatial registration of multispectral and multitemporal digital imagery using fast Fourier Transform techniques", IEEE Trans. on Geoscience Electronics, 8(4), p: 353-368, Out 1970.

Barnea, D.I.; Silverman, H.F., "A class of algorithms for fast digital image registration", IEEE Trans. Comput., 21(2), p: 179-186, 1972.

Guindon, B., "Automated Control Points Acquisition in Radar Optical Image Registration", Canadian J. Remote Sensing, Vol 11, No. 1, p: 103-112, 1985.

Richards, J., R., "Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction", Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1986.

Yao, S.; Gilbert, J., "Registration of a Synthetic Aperture Radar Image and Thematic Mapper Imagery for Remote Sensing Applications", IGARSS'83, San Francisco, Vol. 1, pt WP-4, p: 1.1-1.6

4.5.6 - REFERÊNCIAS

Fonseca, L., M., G., "Registro automático de Imagens: uma revisão", Relatório Interno a ser publicado, INPE, 1995.

4.6 - POLARIMETRIA

O sensoriamento remoto por microondas fornece informações sobre a estrutura geométrica e dielétrica dos objetos na imagem.

O imageamento convencional (uma polarização) fornece a medida simples da refletividade. Utilizando-se um Radar Polarimétrico pode-se determinar a dependência da reflectividade com a polarização.

Através da assinatura polarimétrica de um objeto pode-se fazer fortes inferências no processo físico do retro-espalhamento (backscattering), ou seja, na identificação e caracterização do mecanismo dominante. Dessa maneira pode-se conhecer melhor como a estrutura geométrica e a constante dielétrica de um objeto contribuem na formação do retro-espalhamento.

Imagens polarimétricas são conseguidas através da polarização do campo elétrico das antenas transmissora e receptora. A Figura 4.6.1 mostra o sistema de coordenadas de posicionamento da antena (x,y,z), bem como a representação de uma onda eletromagnética polarizada verticalmente. A polarização horizontal (H) está orientada na direção "x" e a vertical (V) na direção "y". A direção "z" é a direção do apontamento da antena para o alvo (direção de propagação).

Os tipos de polarizações comumente utilizadas em sensoriamento remoto são:

HH - Transmissão horizontal e recepção horizontal.

HV - Transmissão horizontal e recepção vertical.

VV - Transmissão vertical e recepção vertical.

VH - Transmissão vertical e recepção horizontal

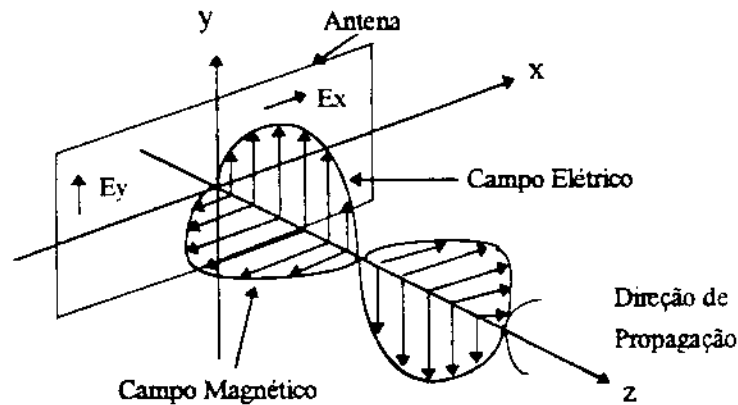


Figura 4.6.1 - Representação do sistema de coordenadas de posicionamento da antena e de uma onda eletromagnética polarizada verticalmente.

Existe uma forma de representação do campo elétrico que é conhecida como “elipse de polarização”, como mostrado na Figura 4.6.2.

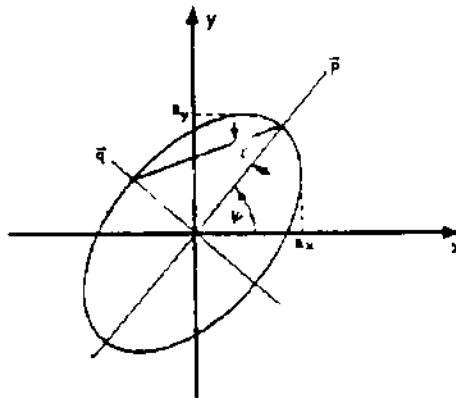


Figura 4.6.2 - Elipse de Polarização

O fator de achatamento da elipse é dado pelo ângulo χ , onde para $\chi = 0$ tem-se a polarização linear e para $\chi = 45$ graus tem-se a polarização circular a esquerda e para $\chi = -45$ tem-se a polarização circular a direita. No caso de $\chi = 0$ e $\psi = 0$ ou 180 graus, tem-se a polarização horizontal, e para $\psi = 90$ graus a polarização vertical.

O imageamento polarimétrico é usualmente implementado pela configuração do radar para que esse possa medir as quatro componentes do retro-espalhamento de cada célula de resolução, ou seja, S_{HH} , S_{HV} , S_{VH} e S_{VV} , onde:

S_{HH} - é o retro-espalhamento de polarização horizontal resultante de uma onda incidente polarizada horizontalmente.

S_{HV} - é o retro-espalhamento de polarização vertical resultante de uma onda incidente polarizada horizontalmente

S_{VH} - é o retro-espalhamento de polarização horizontal resultante de uma onda incidente polarizada verticalmente

S_{vz} - é o retro-espalhamento de polarização horizontal resultante de uma onda incidente polarizada verticalmente

Esses quatro parâmetros complexos (possuem amplitude e fase) podem ser representados em uma matriz de espalhamento para cada célula de resolução, dada por:

$$S = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix}$$

A partir da matriz de espalhamento pode-se conhecer como o espalhamento transforma a onda incidente, ou seja, como ela relaciona as componentes do campo elétrico do espalhamento, (E'_x, E'_y) , com as componentes do campo elétrico da onda incidente, da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = \frac{e^{ikr}}{kr} \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$$

r é a distância entre a antena e o espalhamento.

$k = 2\pi / \lambda$ (λ é o comprimento de onda)

Através da matriz de espalhamento pode-se conhecer as características geométrica e dielétricas dos objetos.

Qualquer estado da polarização dos campos elétricos E'_x e E'_y , associados ao retro-espalhamento do radar e a dependência da amplitude com a polarização, podem ser ilustrados graficamente em função dos ângulo de elipticidade χ e do ângulo de orientação ψ . Esta representação é chamada de assinatura polarimétrica. A Figura 4.6.3 ilustra esse tipo de representação.

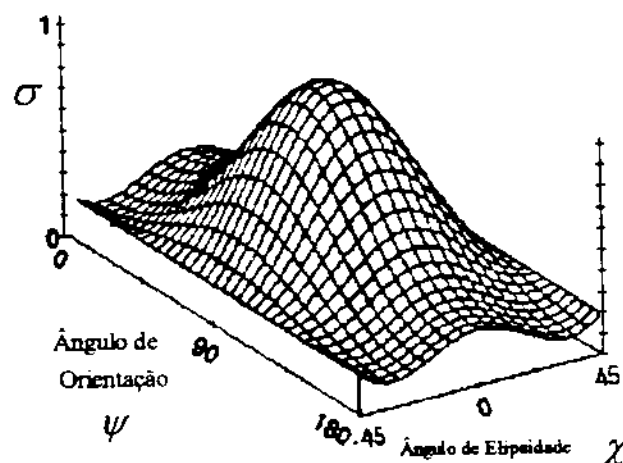
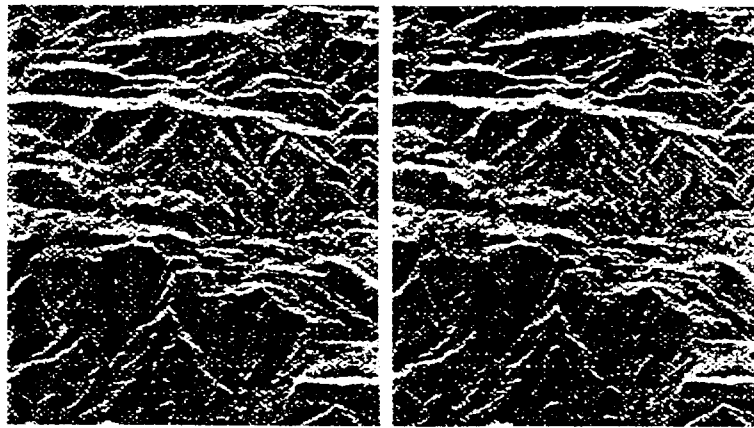


Figura 4.6.3 - Assinatura Polarimétrica

As imagens polarimétricas podem ser utilizadas nas seguintes aplicações:

- Sintetizar a polarização de uma região da imagem (assinatura polarimétrica).
- Classificação de imagens, utilizando o conhecimento da amplitude e da fase das imagens (complexas).
- Caracterização de superfícies.



(a) imagem 1

(b) imagem 2

Figura 4.7.2 - Módulo das duas imagens complexas

A elevação do terreno é determinada a partir da fase absoluta, obtida da fase relativa através do processo de "phase unwrapping". A Figura 4.7.3 apresenta a representação tridimensional da elevação da área coberta pelas imagens 1 e 2.

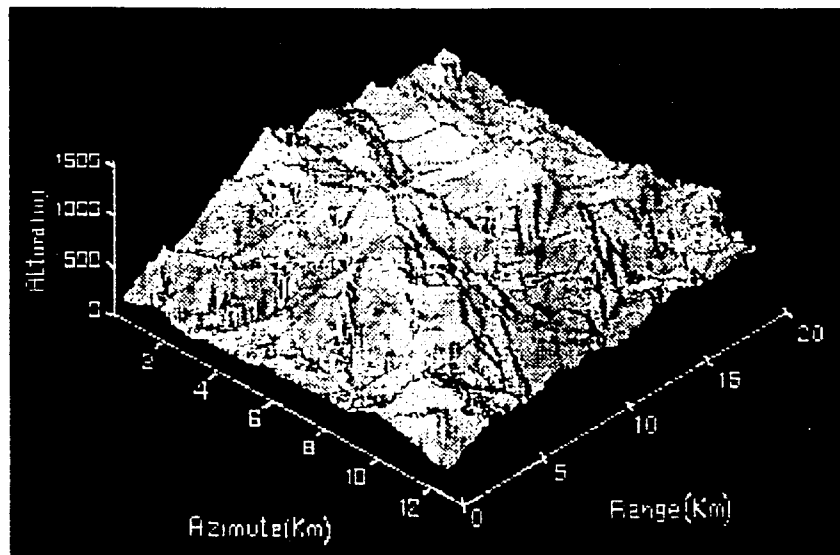


Figura 4.7.3 - Representação tridimensional da elevação do terreno.

4.7.1- BIBLIOGRAFIA

Graham.L.,C., "Synthetic interferometer radar for topographic mapping", Proc. IEEE, 62, p: 763-768, 1974.

Zebker, H.; Goldstein, R., M., "Topographic mapping from interferometric SAR observations", J. Geophys. Res., 91, p: 4993-4999, 1986.

Gabriel, A., K.; Goldstein, R., M., "Crossed orbit interferometry: Theory and experimental results from SIR-B", Int. J. Remote Sensing, 9, p: 857-872, 1988.

4.7.2 - REFERÊNCIAS

Goldstein, R., M.; Zebker, H., A.; Werner, C., "Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping", Radio Sci., 23, p 713-720, 1988.

Mura, J., C., "Mapeamento Topográfico por Interferometria Utilizando Imagens SAR do ERS-1", V-SIBGRAPI, p: 61-64, 1993.

5. PRINCIPAIS SISTEMAS RADAR

5.1 - O PROGRAMA ERS

O programa ERS (European Remote Sensing Satellite) teve seu primeiro satélite lançado em 17 de Julho de 1991. Este satélite é administrado pela European Space Agency e tem como principal objetivo a utilização de sistemas ativos de microondas para o estudo de fenômenos oceanográficos. O primeiro satélite da série, o ERS-1 tinha uma vida útil programada de dois anos para este satélite, mas ainda está ativo mesmo após o lançamento do ERS-2 em 21 de maio de 1995. Estes satélites estão a uma altitude de 800 Km e em função das missões programadas a sua repetitividade pode variar entre 3 dias, recobrando áreas limitadas do planeta, e 35 dias, para se obter uma cobertura completa da Terra. O SAR a bordo dos satélites da série ERS opera na banda C, com polarização VV e pequeno ângulo de incidência (em torno de 23 graus) o que o torna mais adequado a aplicações oceanográficas. O INPE recebe rotineiramente dados deste satélite desde o seu lançamento.

5.2 - O PROGRAMA RADARSAT

O RADARSAT é o primeiro satélite de sensoriamento remoto canadense. Ele foi lançado, com sucesso no dia 4 de Novembro de 1995. Ele foi concebido, à semelhança do Programa SPOT, para ser um sistema comercial. O RADARSAT possui um único sensor a bordo, que é um sensor ativo de microondas, Synthetic Aperture Radar (SAR) operando na banda C (5,3 Ghz de frequência ou comprimento de onda de 5,6 cm), e polarização HH. Ao contrário do programa ERS, cujo principal objetivo era o de estudos oceanográficos, o sistema RADARSAT foi concebido para responder a diversas necessidades de aplicações descritas na tabela 5.1.

Uma das características mais relevantes do RADARSAT é que ele pode ser programado para obter imagens em diferentes modos de aquisição, o que permite que o produto adquirido satisfaça de modo personalizado às necessidades do usuário final dos dados.

Cada modo de aquisição dos dados RADARSAT é definido pelo tamanho da área imageada e pelo tipo de resolução espacial do dado. A tabela 5.2 resume os principais modos de aquisição dos dados RADARSAT, a área imageada em cada modo, e a resolução espacial dos dados.

Outra característica inovadora do programa RADARSAT é que os diferentes modos de aquisição poderão ser adquiridos em diferentes ângulos de incidência. O ângulo de incidência da radiação é um parâmetro de extrema importância para muitas aplicações. Uma das grandes limitações dos dados ERS-1 para aplicações em Geologia é o pequeno ângulo de incidência, que é fixo, e não pode ser alterado. No caso dos dados RADARSAT, este ângulo de incidência pode ser escolhido pelo usuário em função de suas necessidades de aplicações. O range de ângulos disponíveis pelo RADARSAT pode variar entre 20° e 60° conforme pode ser observado na Figura 5.1.

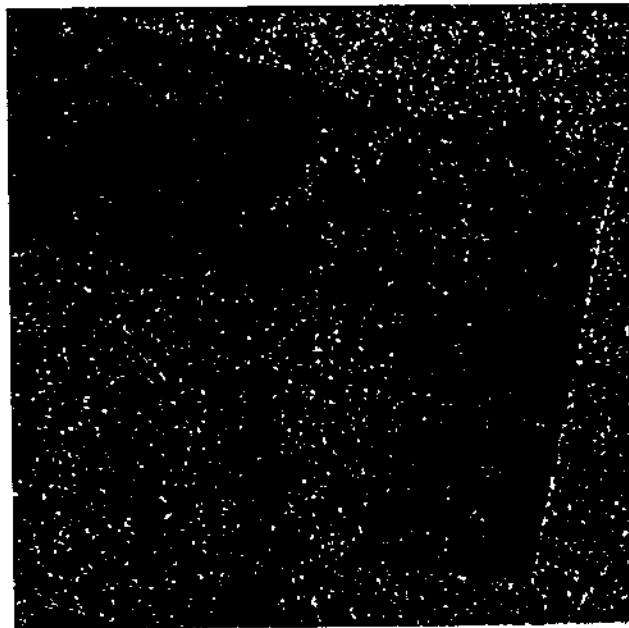


Fig. 7.10: Imagem simulada do RADARSAT, modo fino, de área de pastagem mostrada na Fig. 9. Observar detalhes da rede de drenagem, mata galeria na área desmatada e diferentes feições de rebrota.

A órbita do RADARSAT tem um ciclo de 24 dias, ou seja, o satélite retorna ao mesmo local a cada 24 dias. A antena do RADARSAT, entretanto, pode ser movida, de modo que se possa aumentar a frequência de aquisição de dados. A frequência de aquisição pode variar com a latitude em com o modo de aquisição. No modo ScanSAR, por exemplo, o ciclo pode variar entre 2 e 5 dias no Equador e 1 dia na Latitude de 70 graus.

Os dados de radar também podem ser obtidos em duas diferentes direções de imageamento, ou seja, com a antena direcionada para oeste, e com a antena direcionada para leste. Durante a órbita descendente (do Polo Norte ao Polo Sul), a antena observa a Terra em direção Oeste, enquanto que na órbita ascendente (do Polo Sul para o Polo Norte) a antena observa a Terra em direção Leste. Esta característica é extremamente útil quando se trabalha em áreas de relevo montanhoso, por que permite observar feições que se encontram sombreadas quando uma única direção de observação é utilizada.

5.3 O PROGRAMA JERS

O principal objetivo do Japanese Earth Resources Satellite -1 (JERS-1) é o de coletar dados globais sobre a superfície terrestre e realizar observações efetivas sobre os recursos florestais, minerais, o meio ambiente, etc. O satélite JERS-1 foi lançado em fevereiro de 1992 através de um veículo lançados H-I, a partir do Centro Espacial de Tanegashima. O período ativo do satélite foi previsto para 2 anos, mas seu desempenho continua excelente até o momento.

O satélite JERS-1 possui dois sensores: um radar de abertura sintética (SAR) e um sensor ótico (OPS), o qual é composto de dois radiômetros (um operando no visível e infravermelho -VNIR, e outro operando no infravermelho médio - SWIR). O satélite JERS-1 ocupa uma órbita polar, sol-síncrona, cujo período orbital permite uma frequência de aquisição de dados de 44 dias. A tabela 5.4 resume as principais características do satélite JERS-1.

Tabela 5.4 - Características do Satélite JERS-1

Altitude do satélite	568 km	Sobre o Equador
Período	96 minutos	
Inclinação da Órbita	97,67°	
Órbita	Solsincrona	movimento para oeste
Período de Retorno	44 dias	659 revoluções
Revoluções por dia	15 - 1/44	
Horário Solar Local	10:30 - 11:00	
Distância entre órbitas adjacentes	60.7 km	Sobre o Equador
Excentricidade	0,0015 ou menos	

A tabela 5.5 resume as características do sensor ativo de microondas existente a bordo do satélite JERS-1.

Tabela 5.5 - Características principais do SAR a bordo do satélite JERS-1

Característica	Desempenho
Banda	L
Polarização	HH
Ângulo de Incidência	35°
Resolução	
Range	18 m (no centro da faixa)
Azimute	18 m (com 3 looks)
Largura da Faixa	75 km
Potência Transmitida	1100 -1500 W
Largura do Pulso	35 +/- 5 ms
Frequência de Transmissão do Pulso	1505,8 Hz - 1606.Hz
Sinal Equivalente ao Ruído	-20,5 dB

Atualmente existem 15 estações de recepção de dados do satélite JERS-1. Os dados sobre o Brasil, que não possui antena, são adquiridos mediante solicitação que é atendida em função da disponibilidade do sistema de gravação a bordo.

As características relevantes dos principais sistemas SAR, incluindo os instalados em aeronave, estão condensados na Tabela 5.6

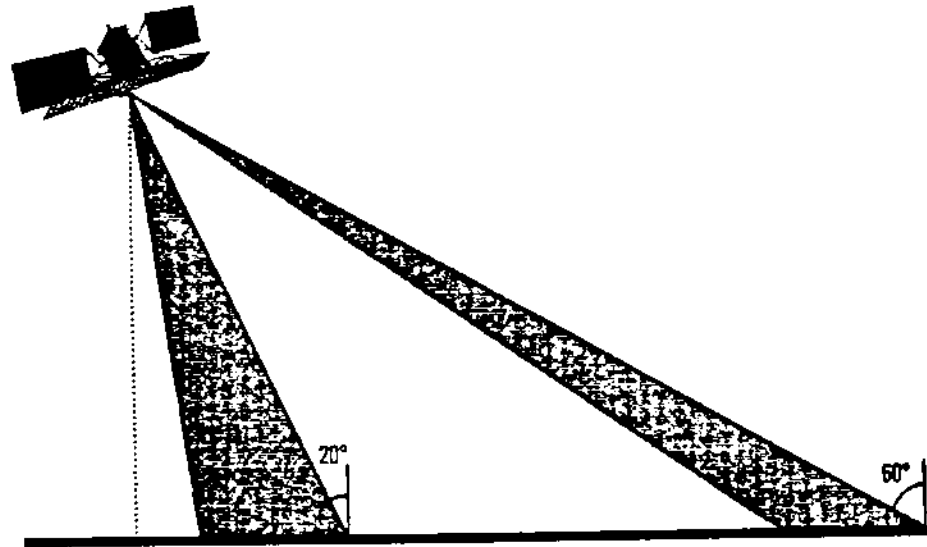


Figura 5.1 - Variação dos ângulos de imageamento do RADARSAT (Fonte: RADARSAT, 1995).

Tabela 5.1 - Respostas dos dados RADARSAT a feições de superfície

Parâmetro da Superfície	Resposta observada em imagens do RADARSAT
Rugosidade da superfície	A quantidade de energia retroespalhada para o satélite é influenciada pela rugosidade da superfície. Isto permite distinguir diferenças de textura na imagem, as quais permitem diferenciar entre áreas desmatadas, áreas de cultivo, florestas, etc.
Topografia	O retorno do radar é maior para as vertentes perpendiculares à incidência da frente de onda. Isto faz com que o efeito de sombreamento provocado pela topografia favoreça o mapeamento de feições de relevo, e a inferência de informações relevantes para a geologia e geomorfologia.
Limite Terra/Água	Superfícies líquidas lisas provocam a reflexão especular das microondas para fora do campo da antena do radar. Como resultado, os dados do RADARSAT são extremamente úteis para a discriminação de limites entre a terra e água.
Feições Antrópicas	Feições antrópicas, tais como prédios, navios, etc refletem fortemente a radiação de microondas. Isto faz com que as imagens sejam extremamente úteis a aplicações que necessitam identificar alvos pontuais (aplicações militares, por exemplo)
Umidade	O grau de umidade do solo ou da vegetação afeta fortemente o retorno da radiação de microondas. Diferenças de umidade, portanto, podem ser avaliadas a partir de mudanças tonais nas imagens.

Tabela 5.6 - Características dos principais sistemas SAR

Sistemas	Frequência (banda)	Polarização	Faixa Imageada (km)	Ângulo Incidência	Resolução Espacial (m)	Altitude (km)	Aquisição Dados	Resolução Temporal
Aeronave								
AIRSAR USA	P, L, C	HH,HV VV,VH	12 x 60	0 a 70 sel.	4-8 rng 4-8 az	8-12	6 hs	missão
DCS USA	X, KU	HH,HV VV,VH	0,22-1,5	2 a 85	1 1,5 alt	0,5-7,5	3-7 hs	missão
IFSARE USA	X	HH	10	30 a 60	3 1-3 alt	6-12	3 hs	missão
P3/SAR USA	L, C, X, UWB	HH,HV VV,VH	5-10	20 a 70	3 rng 1,5 az	??	7-10 hs	missão
SAR 580 CANADA	C, X	HH,HV VV,VH polarim.	18-65	0 a 74	6-20 rng 6-10 az	6,5	5 hs	fora operação
STAR-1 CANADA	X	HH	24-48	55 a 85	8-16 rng 6 az	9,5	6 hs	missão
STAR-2 CANADA	X	HH	2 x 65 2 x 100	60 a 85	15-25	12	6 hs	missão
E-SAR ALEMANHA	P, L, C, X	HH,HV VV,VH	2-15	30 a 60	1-8	5	4 hs	missão
Satélite								
ALMAZ-1 RUSSIA	S	HH	25	30 a 55	15-30 rng 15 az	300	fora operação	fora operação
ERS-1/ERS-2 EUROPA	C	VV	100	19 a 27	25	785	12 min. p/ órbita	35 dias
JERS-1 JAPÃO	L	HH	75	38	18	568	20 min. p/ órbita	44 dias
RADARSAT CANADA	C	HH	45-500	10 a 60	11-100 rng 9-100 az	798	28 min. p/ órbita	24 dias
Sub-orbital								
SIR-C USA	L, C	HH,HV VV,VH	15-90	17 a 63	8-30 rng 30 az	225	50 hs	missão
X-SAR ALEMANHA	X	VV	15-45	17 a 63	30	225	50 hs	missão

FONTE: BIRK, W.C. et al. *Synthetic Aperture Radar Imaging Systems*. IEEE AES Systems Magazine, novembro 1.995, pp. 15-23

Principais Aplicações do Radar Imageador (SAR)

AGRICULTURA

- Identificação e mapeamento de culturas agrícolas e fiscalização
- Identificação da ação de determinadas pragas e doenças
- Determinação relativa da umidade de solos; eficiência de sistemas de irrigação.

CARTOGRAFIA

- Levantamento planimétrico (escalas de 1:20.000 a 1:500.000)
- Levantamento altimétrico (interferometria)

FLORESTAS

- Determinação de grandes classes de floresta
- Identificação da ação de determinadas doenças
- Mapeamento de desflorestamento
- Identificação de áreas de corte seletivo
- Estimativa de biomassa

GELO E NEVE

- Mapeamento/classificação de gelo
- Monitoração de degelo - inundações

GEOLOGIA

- Análise estrutural (falhas, dobras, estruturas intrusivas, etc.)
- Análise geomórfica (glacial, vulcânica, deslizamentos de terra, drenagem)
- Lineamentos
- Litologia

HIDROLOGIA

- Detecção da umidade do solo
- Detecção de vegetação flutuante
- Detecção de poluição em corpos d'água

MEIO AMBIENTE

- Monitoração de enchentes
- Danos causados por tempestades
- Ação de garimpeiros
- Direitos territoriais de pesca
- Poluição do mar

OCEANOGRAFIA

- Monitoração do estado do mar, correntes, frentes de vento
- Espectro de ondas para modelos numéricos de previsão
- Mapeamento de topografia submarina (condições específicas)
- Poluição marinha causada por derrames de óleo e filmes
- Detecção de barcos - pesca ilegal
- Apoio para o estabelecimento de rotas marítimas

USO DA TERRA

- Classificação do uso da terra
- Inventário, monitoração ("change detection"), planejamento
- Padrões de irrigação/déficit hídrico
- Salinização de solos

6. APLICAÇÕES

Neste item são apresentados alguns exemplos de aplicações onde o radar se destaca.

6.1 RECURSOS HÍDRICOS E OCEANOGRAFIA

6.1.1 INTRODUÇÃO

Antes de começarmos a tratar de algumas aplicações de dados de radar, é fundamental delimitarmos o nosso objeto de estudo, conceituando operacionalmente o que entendemos aqui principalmente por sistemas aquáticos.

Os sistemas aquáticos, como o próprio nome sugere, são os sistemas naturais cuja principal característica é a presença da água. Os oceanos, os lagos, os rios são obviamente sistemas aquáticos, visto que a água é o principal componente do ambiente a regular seus processos. As áreas alagadas, entretanto, não são facilmente identificadas como tal, havendo os que preferem classificá-las como uma outra categoria de sistema natural de transição entre os sistemas terrestres e aquáticos.

No caso específico deste curso, as áreas alagadas serão incluídas como sistemas aquáticos com base no conceito de Burrows (1990) segundo o qual, estas representam o termo genérico para caracterizar um sistema onde a água é a substância ou a influência (ou ambos) dominante no processo de desenvolvimento das plantas e conseqüentemente da produção primária. Assim para Burrows (1990), os lagos seriam um caso particular de áreas alagadas visto que para ele, a água pode estar encobrindo o solo, ou estar em subsuperfície de forma contínua ou frequente, e as plantas podem estar enraizadas no solo, o qual pode consistir de solos mineralizados ou sedimentos orgânicos, ou podem ainda estar flutuando na água.

Assim sendo, quando nos referirmos a aplicações de radar ao estudo de sistemas aquáticos estaremos apresentando exemplos que envolvem: 1) a delimitação de áreas inundáveis, 2) o monitoramento de umidade do solo; 3) o monitoramento dos oceanos; 4) o monitoramento de lagos e reservatórios 5) monitoramento da comunidades de plantas aquáticas que ocupam estes ambientes.

Os sistemas aquáticos portanto apresentam pelo menos três tipos de componentes da superfície terrestre passíveis de serem detectados por sensores ativos de micro-ondas: água, solo úmido e vegetação emersa (flutuante ou não).

Antes de abordarmos as aplicações de radar é importante compreendermos as bases físicas que permitem sua utilização para o estudo de sistemas aquáticos. Estudaremos, portanto, brevemente, as interações entre a radiação de micro-ondas e os principais componentes dos sistemas aquáticos: água, solo úmido e vegetação emersa.

6.1.2 INTERAÇÕES ENTRE A RADIAÇÃO DE MICROONDAS E OS COMPONENTES DOS SISTEMAS AQUÁTICOS.

6.1.2.1 - ÁGUA

As interações entre a radiação de micro-ondas e as superfícies líquidas é afetada por variáveis ligadas ao sistema radar tais como: comprimento de onda, ângulo de incidência do pulso de micro-ondas, polarização e por variáveis que afetam a rugosidade da superfície da água como velocidade e direção dos ventos.

Desde o fim da 2a. Guerra Mundial tem sido realizados estudos sobre o retroespalhamento da superfície da água. Este estudos têm se concentrado na determinação do efeito que a rugosidade da superfície da água tem sobre o coeficiente de retroespalhamento.

Os resultados destas pesquisas demonstraram que: 1) a rugosidade da superfície da água afeta o coeficiente de retroespalhamento e sua dependência em relação à polarização do pulso incidente.

Quando a superfície da água é lisa, o coeficiente de retroespalhamento para a polarização horizontal é menor do que o da polarização vertical. À medida que a rugosidade da superfície aumenta, há uma diminuição do efeito da polarização sobre o retroespalhamento da água. Conseqüentemente, em situações de águas tranqüilas, dados de radar obtidos com polarização HH permitiriam uma melhor delimitação entre água e terra.

O coeficiente de retroespalhamento das superfícies da água varia inversamente com λ^4 para superfícies lisas, ou seja, quanto maior o comprimento de onda do pulso incidente menor o retroespalhamento. Isto significa, que para superfícies de águas tranqüilas, o coeficiente de retroespalhamento da água na banda L (23 cm) é muitas vezes menor do que o coeficiente de retroespalhamento da água na banda C (5.6 cm). Para superfícies rugosas o retroespalhamento tende a ficar independente do comprimento de onda.

Estudos relatados por Johnson e Munday Jr. (1983) demonstraram que a direção dos ventos afeta o coeficiente de retroespalhamento na polarização vertical. De acordo com estes estudos, o coeficiente de retroespalhamento é máximo quando a direção do pulso é a mesma da direção do vento, e mínimo quando a direção do pulso é perpendicular à direção do vento. No caso da polarização horizontal o efeito da direção do vento pode variar em função do comprimento de onda, rugosidade da superfície e ângulo de incidência. Esta informação é importante sob o ponto de vista de aplicação por que sugere que a polarização vertical é mais sensível à direção dos ventos do que a horizontal, sendo portanto mais adequada para a extração deste tipo de informação.

Tendo em vista o efeito que o vento tem sobre a rugosidade da superfície da água, existem numerosos estudos em que se procurou relacionar a velocidade do vento ao coeficiente de retroespalhamento da água. De acordo com estes estudos, o coeficiente de retroespalhamento aumenta com a velocidade do vento, mas atinge um ponto de saturação em torno de 10 nós para comprimentos de onda longos (banda L, por exemplo) e 40 nós para comprimentos de onda curtos (banda K, por exemplo). Este ponto de saturação, entretanto, é afetado por outras variáveis tais como ângulo de incidência e polarização.

A Figura 6.1 mostra a variação do retroespalhamento em função da velocidade do vento para diferentes ângulos de incidência. Através da Figura pode-se observar que com o aumento do ângulo de incidência, há um aumento da dependência do retroespalhamento em relação ao ângulo de incidência. O retroespalhamento nadir, entretanto, apresenta-se como uma função inversa da velocidade do vento. Esta inversão é esperada (Elachi, 1987) por que com o aumento da rugosidade com o aumento da velocidade do vento diminui o número de facetas propícias à reflexão especular na direção do sensor.

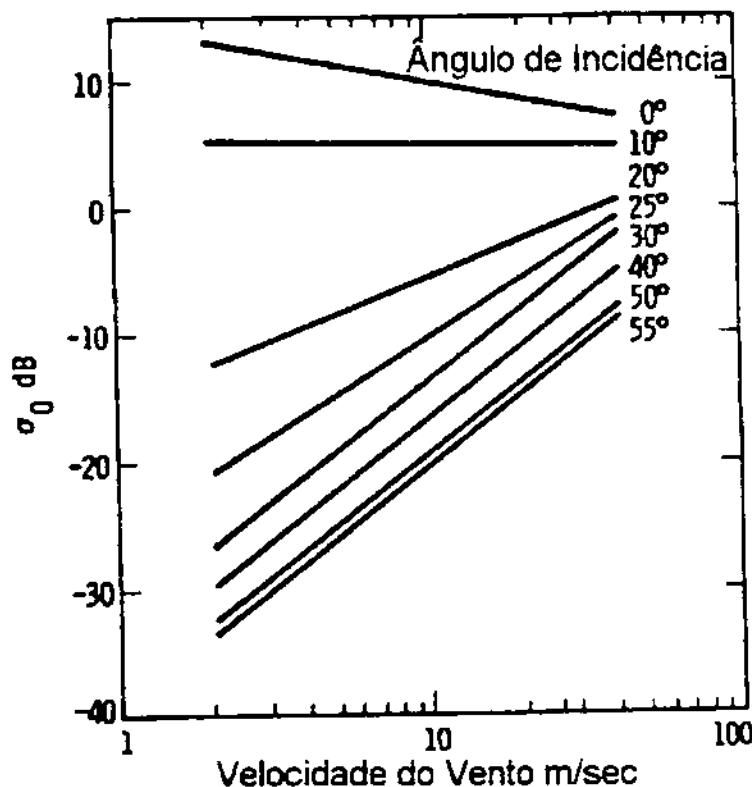


Figura 6.1 - Variação do coeficiente de retroespalhamento em função da velocidade do vento (Fonte: Elachi, 1987)

Embora tenha sido demonstrado que o coeficiente de retroespalhamento da superfície da água é altamente dependente da polarização, comprimento de onda, direção e velocidade do vento, o ângulo de incidência é o fator que mais afeta o valor do retroespalhamento. A Figura 6.2 permite observar o efeito do ângulo de incidência do pulso de radar sobre o coeficiente de retroespalhamento. De acordo com a Figura 6.2, pode-se identificar três regiões distintas no gráfico: 1) região quase-especular, região de espalhamento difuso, e região de interferência.

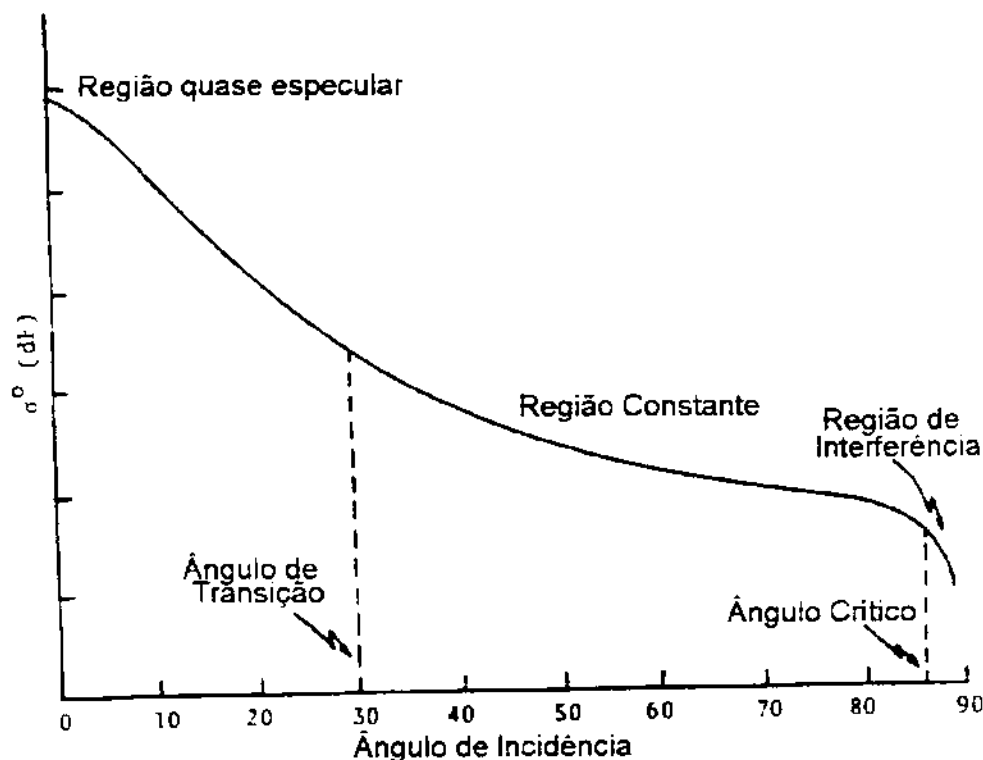


Figura 6.2 - Efeito do ângulo de incidência sobre o coeficiente de retroespalhamento da superfície da água (Fonte: Skolnik, 1969)

A região quase-especular inclui os ângulos próximos à incidência normal. Nesta região o retroespalhamento é elevado devido à reflexão especular de facetas de ondas normais à radiação incidente. O ângulo de transição acima do qual torna-se improvável a ocorrência de reflexão especular encontra-se em torno de 30° . Para ângulos maiores do que 35° o retroespalhamento se torna independente do ângulo de incidência. Nesta região, o retroespalhamento de radar medido na banda X apresenta uma alta correlação com a velocidade do vento visto que para pequenos comprimentos de onda o retorno de radar é altamente dependente das estruturas de pequena escala presentes na superfície da água. Nesta região, a curva obtida para o retroespalhamento na polarização horizontal tende a ser mais inclinada do que a da polarização vertical. Os ângulos de incidência compreendidos pela região quasi-especular e pela região de espalhamento difuso são os de maior aplicação em estudos oceanográficos.

A região de espalhamento difuso e a de interferência é separada pelo ângulo crítico abaixo do qual o retroespalhamento tende a zero. O valor do ângulo crítico, entretanto, é afetado pelo comprimento de onda, polarização e estado da superfície.

6.1.2.2 - SOLO ÚMIDO

O comportamento do retroespalhamento do solo úmido é governado pelas características geométricas da superfície e pelas propriedades dielétricas do solo, as quais, dependem do seu grau de umidade e de parâmetros do sistema de imageamento radar tais como: comprimento de onda incidente, ângulo de incidência e polarização.

Como pode ser observado na Figura 6.3, a constante dielétrica do solo aumenta com o aumento do conteúdo de umidade. Pela análise da Figura pode-se constatar que a taxa de variação da constante dielétrica com o aumento de umidade depende do comprimento de onda., e que quanto maior o comprimento de onda, maior é a sensibilidade da constante dielétrica à porcentagem de umidade presente no solo. Na banda L, a constante dielétrica pode variar de 3, para solos secos, a 20 para solos úmidos, o que resulta num aumento do coeficiente de retroespalhamento que atinge cerca de 10 dB.

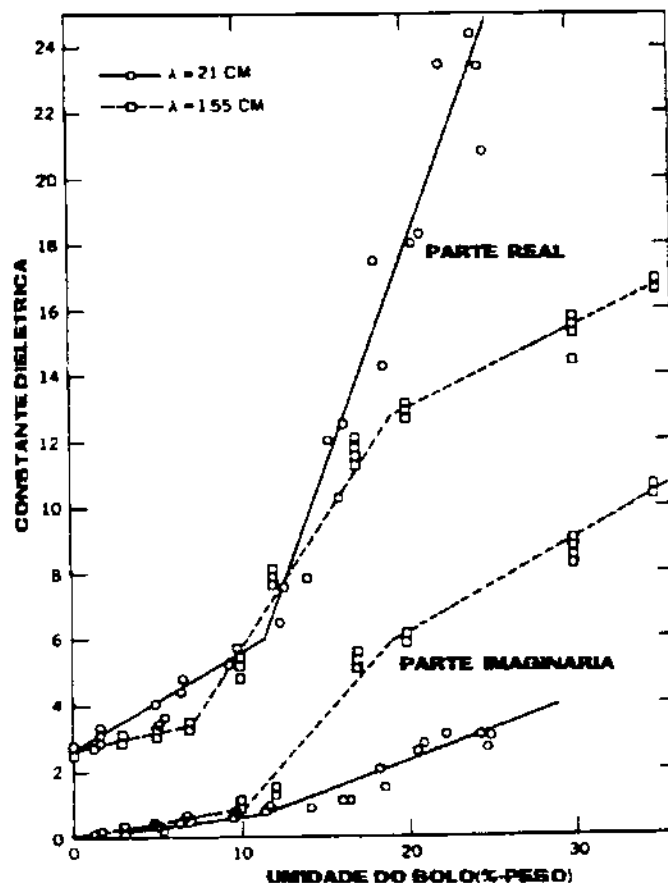


Figura 6.3 - Efeito da umidade e do comprimento de onda sobre a constante dielétrica dos solos
(Fonte: Salomonson, 1983)

Estudos realizados por diferentes grupos de pesquisa, indicam que as medidas de umidade de solo estimadas por sistemas operando na banda L se correlacionam com as medidas de umidade tomadas nos 5 cm superiores do solo. Apesar de estar bem documentada a relação entre umidade do solo e retro-espalhamento, os algoritmos para inverter medidas de radar de modo a estimar propriedades do solo precisam ainda ser validados. A Figura 6.4 permite observar o efeito da umidade do solo sobre o retro-espalhamento. Há uma tendência de aumento do retroespalhamento com o aumento da umidade do solo, mas qu a dispersão dos dados é bastante grande. Além disso, em função da data de aquisição dos dados, são gerados diferentes modelos que expressam o relacionamento entre retroespalhamento e umidade do solo. Isto ocorre porque outras características do solo, além da umidade, também afetam o seu retroespalhamento.

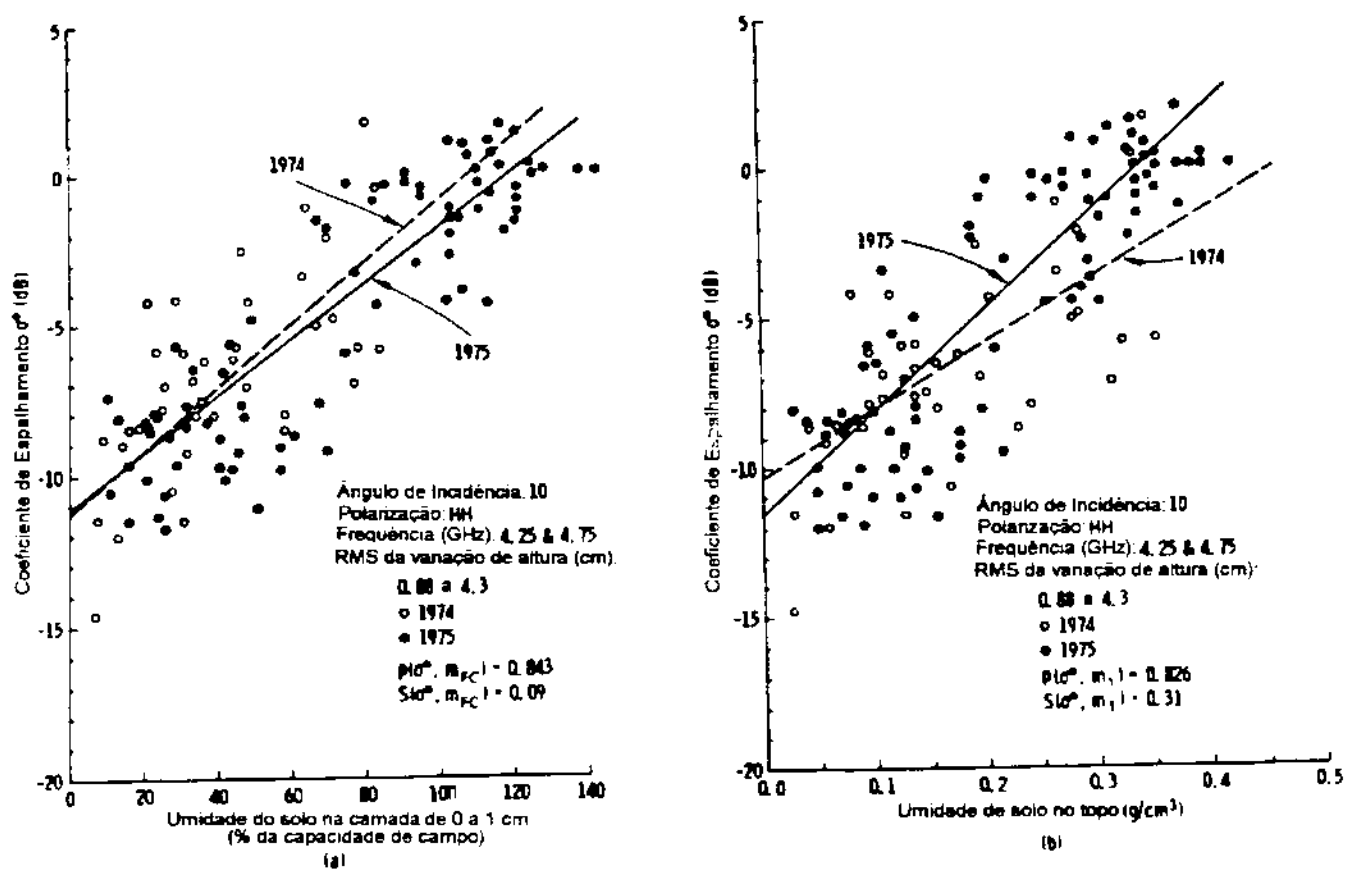


Figura 6.4 - Efeito da umidade superficial do solo sobre o seu coeficiente de retroespalhamento
(Fonte: Bativalva e Ulaby, 1977).

Fatores tais como porcentagem de cobertura vegetal, rugosidade da superfície e topografia podem afetar profundamente o relacionamento entre teor de umidade e retroespalhamento. Dentre estes fatores, a rugosidade da superfície pode muitas vezes encobrir o efeito da umidade (Evans, 1995).

6.1.2.3 - VEGETAÇÃO

A grande maioria dos trabalhos sobre interações entre vegetação e radiação de micro-ondas se limita ao estudo de vegetação terrestre e mais especificamente ao estudo de culturas agrícolas (Ulaby et al., 1986). A presença da água como substrato, no caso específico das plantas aquáticas, pode introduzir modificações no comportamento do retroespalhamento dos dosséis, principalmente se estes apresentarem baixa densidade e altura, permitindo que haja uma interação direta com a superfície da água.

Independentemente do seu substrato, entretanto, existem fatores que afetam o comportamento do retroespalhamento dos dosséis de vegetação. Estes fatores incluem: a constante dielétrica, as características geométricas do dossel tais como sua altura, densidade, biomassa, o tamanho, forma e orientação de seus componentes, etc.

A constante dielétrica da vegetação é fortemente afetada pela umidade, podendo-se, portanto, admitir que as plantas aquáticas apresentam maior constante dielétrica que as plantas terrestres, pois, via de regra, tendem a possuir um maior teor de umidade. Como o conteúdo de umidade das plantas aquáticas pode variar de espécie para espécie, e ao longo de seu ciclo de vida, o seu coeficiente de retroespalhamento tenderá a variar também, podendo ser utilizado para inferir aquelas propriedades das plantas.

Na Figura 6.5 pode ser observado o efeito do índice de área foliar sobre o coeficiente de retroespalhamento na banda X para a cultura de Sorgo. O índice de área foliar é um importante descritor das características estruturais do dossel e é também altamente correlacionado com a biomassa do dossel. Pela análise da Figura, pode-se observar um aumento do coeficiente de retroespalhamento com o aumento do índice de área foliar (IAF), e conseqüentemente com a biomassa. A taxa de variação do coeficiente de retroespalhamento é bastante elevada até que o IAF atinja cerca de 1.5. A partir deste valor, o retroespalhamento se torna praticamente constante. Isto significa que, para esta banda, o coeficiente de retroespalhamento é mais sensível às variações de biomassa de dosséis caracterizados por pequeno índice de área foliar.

A tabela 6.1 apresenta alguns valores de IAF encontrados na literatura e as respectivos tipos de dossel. Pela análise da tabela 6.1 pode-se verificar que o coeficiente de retroespalhamento na banda X parece mais adequado a monitorar os primeiros estádios fenológicos de dosséis semelhantes às culturas agrícolas de trigo, sorgo e feijão, visto que os valores de IAF encontrados para floresta e reflorestamento se encontram numa faixa à qual seu valor torna-se independente das características estruturais do dossel.

De fato, existem numerosos estudos na literatura (Evans, 1995) que demonstram que: 1) a sensibilidade do coeficiente de retroespalhamento satura após um certo valor de biomassa ou IAF; 2) que o nível de saturação varia com o comprimento de onda e a polarização da radiação incidente; 3) que o ponto de saturação aumenta com o aumento do comprimento de onda. Deste modo, a estimativa de biomassa de floresta inundada é teoricamente possível em comprimentos de onda mais longos (banda L ou P), enquanto que a estimativa de biomassa de plantas aquáticas, cujo dossel se assemelha ao de culturas como o trigo, feijão, sorgo, tendem a ser melhor caracterizadas em bandas com comprimentos de onda menores (X e C).

Tabela 6.1 - Variabilidade do Índice de Área Foliar

Tipo de Dossel	IAF	Fonte
<i>Pinus contorta</i> (950 a 24 000 árvores /ha)	2,49 - 3,05	Smith et al. , 1990
<i>Pinus ponderosa</i> (900 + ou - 418 árvores/ha)	2,4 +/- 0,2	Pierce e Running, 1988
Floresta Secundária (5 anos) (<i>Cecropia</i> spp; <i>Aparisthimium cordatum</i> , <i>Inga</i> , spp)	4,51	Batista e Pereira, 1995
Floresta Secundária (9 anos) (<i>Cecropia</i> spp; <i>Siparauna</i> <i>guianensis</i> , <i>Pourouma</i> spp.	4,81	Batista e Pereira, 1995
Feijão(<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) (ao longo do ciclo de crescimento)	~ 0,2 - 4,5	Formaggio et al. , 1992
Sorgo (0,76 de espaçamento)	0,4 - 1,0	Long et al. , 1985
Sorgo (1,52 de espaçamento)	0,2 - 0,6	Long et al. , 1985
Trigo Irrigado (17 cm de espaçamento entre fileiras) (ao longo do ciclo de crescimento)	1,8 - 12,0	Epiphany et al. , 1996
Trigo	1,32 + ou - 0,06	Long, 1987

O efeito da polarização e do comprimento de onda o relacionamento entre coeficiente de retroespalhamento e biomassa seca acima do solo pode ser observado na Figura 6.6a e 6.6b. A análise da Figura permite comprovar que a variação do retroespalhamento com a biomassa seca tende à saturação em torno de 5 kg m^{-2} na polarização cruzada (HV), e em torno de 4 kg m^{-2} nas demais polarizações (Figura 6.6a). Na banda L, o ponto de saturação para a polarização cruzada está próximo à 10 kg m^{-2} .

Apenas a título de comparação, podem ser citados os dados de biomassa de Batista e Pereira (1995) referentes à florestas secundárias de diferentes idades variaram entre 7 e 10 kg m^{-2} . Dados de biomassa aérea coletados em Lago Grande (Leite et al., 1995), encontram-se no range de $0,02$ a $0,12 \text{ kg m}^{-2}$. Disto, pode-se concluir que os dados da banda C são, teoricamente mais sensíveis às variações de biomassa e de estrutura do dossel de plantas aquáticas.

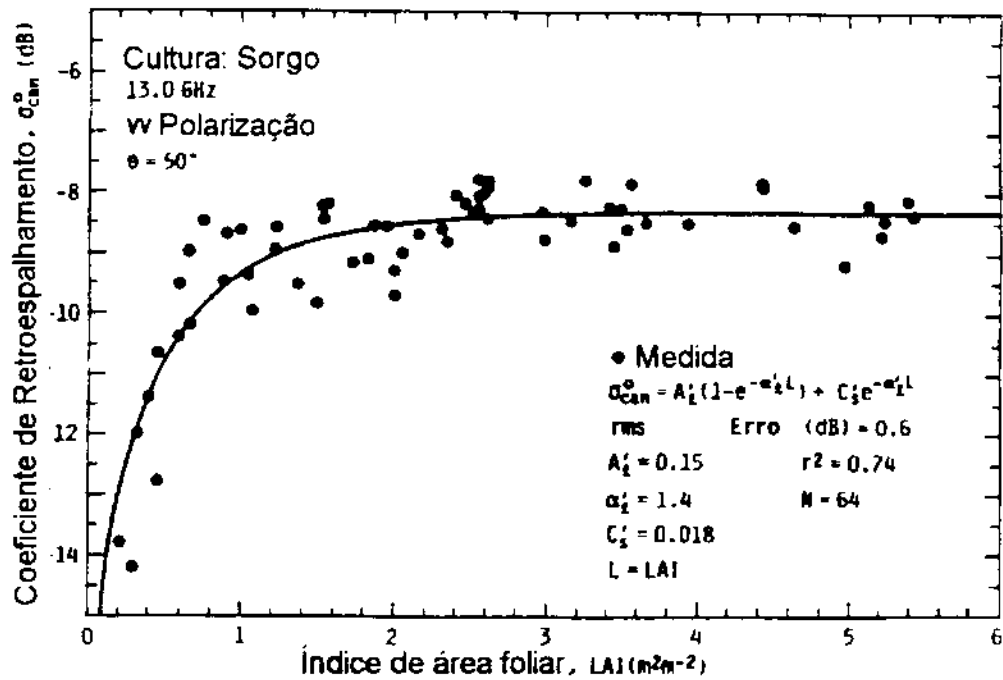


Figura 6.5 - Variação do Coeficiente de Retroespalhamento na banda X em função do Índice de Área Foliar do Sorgo.

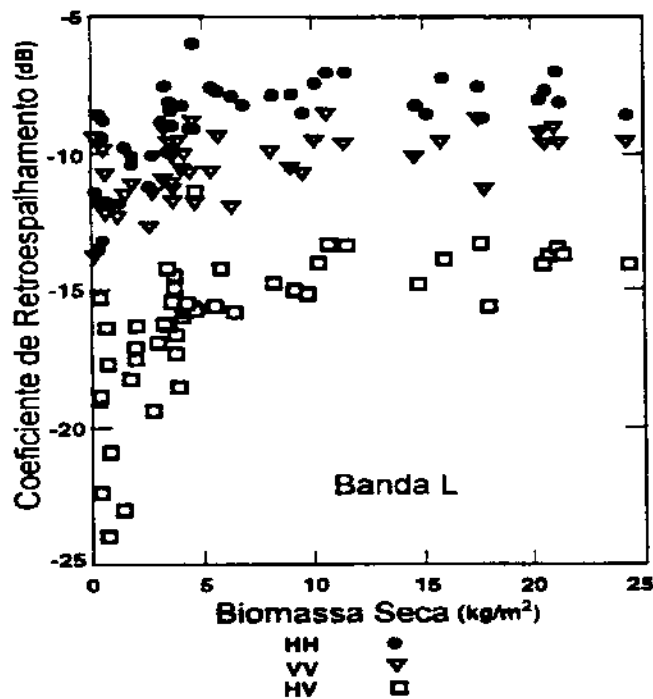


Figura 6.6a - Variação do coeficiente de retroespalhamento na banda L em função da biomassa seca acima do solo, em diferentes polarizações.

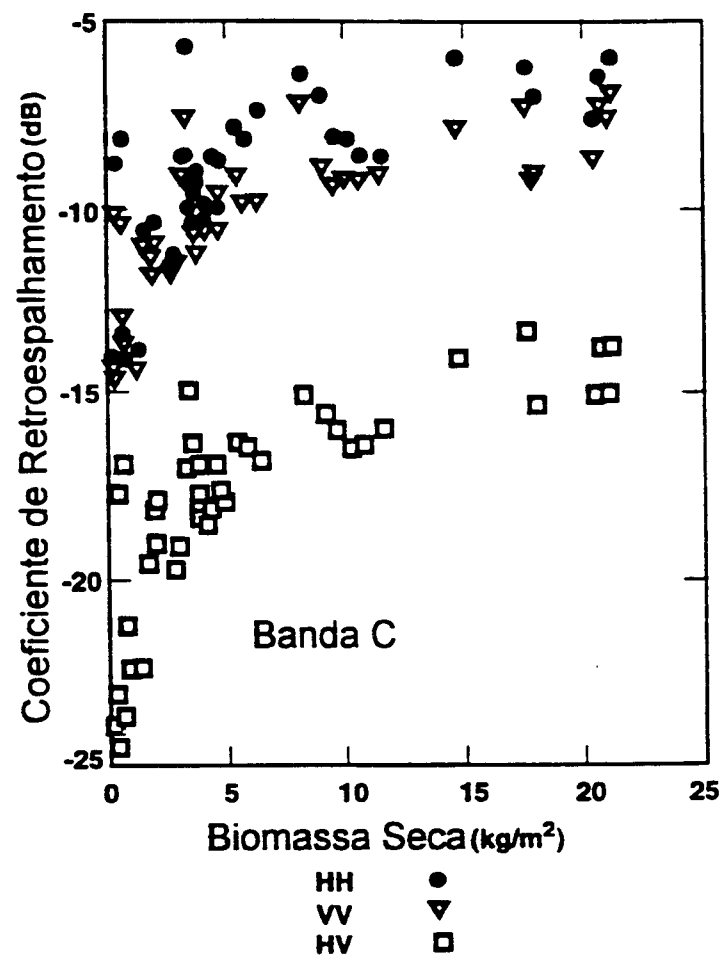


Figura 6.6b- Variação do coeficiente de retroespalhamento na banda C em função da biomassa seca acima do solo, em diferentes polarizações.

Figura 6 - Efeito do comprimento de onda e polarização sobre o relacionamento entre a biomassa do dossel e o coeficiente de retro-espalhamento (Fonte: Evans, 1995).

O efeito da altura do dossel varia com o comprimento de onda da radiação incidente. A profundidade de penetração da radiação de microondas é diretamente proporcional à $1/\tan\delta$, onde a $\tan\delta$ é a tangente de perda que também é afetada pelo comprimento de onda. Para a maior parte dos materiais, a profundidade de penetração varia linearmente com o comprimento de onda na região de microondas. A profundidade de penetração da banda L (comprimento de onda em torno de 20 cm) é cerca de 20 vezes maior que a profundidade de penetração banda Ku (comprimento de onda em torno de 2 cm). Portanto, pode-se admitir que na banda L, o comportamento da alfafa com altura de 55 cm seja semelhante ao comportamento da alfafa de 17 cm na banda C.

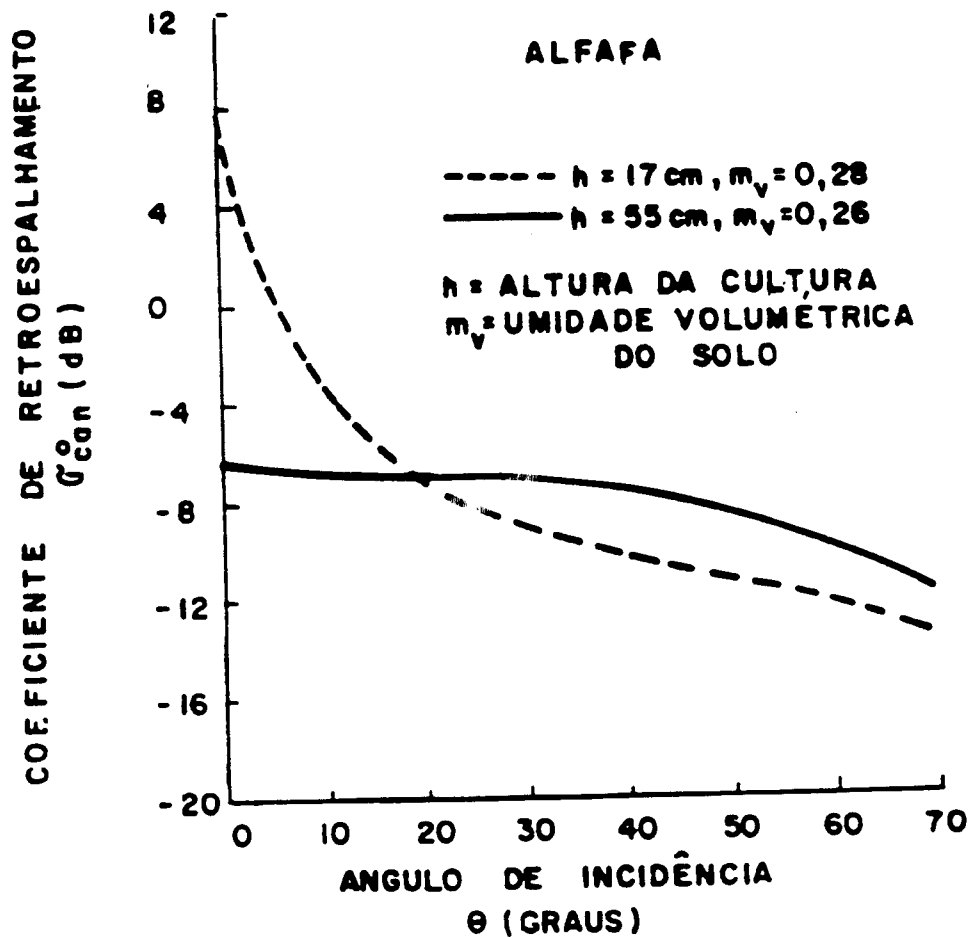


Figura 6.7 - Efeito da altura do dossel sobre o coeficiente de retroespalhamento da vegetação (Fonte: Ulaby et al., 1986)

Apesar das diferenças do substrato, as plantas aquáticas estão sujeitas aos mesmos princípios. Pesquisas realizadas por Costa (1995) e Noernberg (1995) utilizando dados de radar na banda C indicam que existem diferenças significativas entre o coeficiente de retroespalhamento do gênero *Eichhornia*, sp. e do gênero *Scirpus*, sp. e que tais diferenças podem ser parcialmente explicadas pela diferença de altura dos bancos; os *Scirpus* em geral atingem de 1m a 1,50 m, enquanto as *Eichhornias* atingem no máximo 50 cm.

Outra variável que afeta o espalhamento da vegetação aquática é a rugosidade da superfície relativa ao comprimento de onda incidente. A Figura 6.8 permite observar o efeito da rugosidade (expressa como o do dossel sobre o coeficiente de retroespalhamento na banda L. Pode-se observar que para ângulos de incidência

maiores que 15° há um aumento do espalhamento com o aumento da rugosidade expressa como o rms (erro médio quadrático) da altura da vegetação.

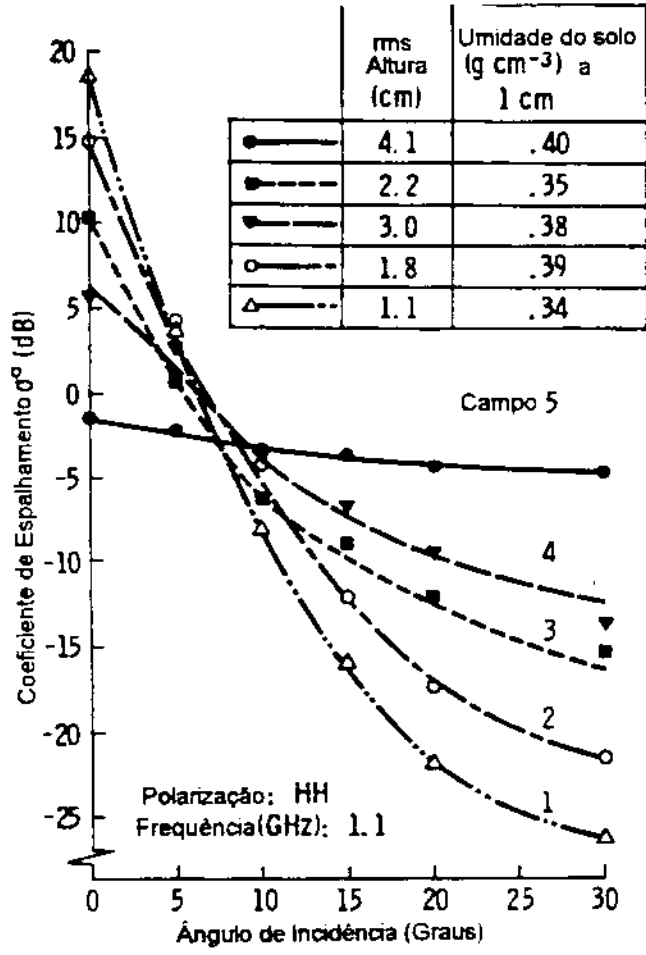


Figura 6.8 - Efeito da rugosidade do dossel sobre o espalhamento da vegetação.

6.2 - EXEMPLOS DE APLICAÇÕES.

Após termos avaliado teoricamente o potencial dos dados de radar para o estudos em questão vamos apresentar alguns exemplos de aplicações, o que permitirá um julgamento mais seguro sobre a utilidade dos dados de Radar.

6.2.1 - APLICAÇÕES EM OCEANOGRAFIA

A National Aeronautics and Space Administration publicou recentemente um relatório (Evans, 1995) em que são resumidas as principais aplicações de dados de Radar em Oceanografia. Segundo o relatório, os dados de radar tem sido utilizados para a determinação do espectro de ondas superficiais, permitindo a obtenção de informações sobre direção e altura de ondas. O monitoramento destes vetores ao longo do tempo permitirão compreender melhor as trocas de energia entre a atmosfera e a superfície oceânica.

Os dados de radar também têm sido utilizados para estudar fenômenos oceanicos de mesoescala, onde ocorrem importantes interações entre a camada limite do planeta, a camada de mistura oceânica e a dinâmica oceânica quasi-geostrófica. Estas interações controlam os fluxos meridionais de calor, a circulação global e as variações internas na interface oceano-atmosfera. A Figura 6.9 mostra imagens de radar nas bandas P, L e C, onde pode ser observado um exemplo típico de corrente de meso-escala na costa da Califórnia. Estas imagens foram adquiridas em Setembro de 1989, a partir de um avião a uma altitude de 8300 m. A direção de vôo era aproximadamente 128° com sentido da esquerda para a direita das imagens. Durante o verão a Corrente da Califórnia é caracterizada por intensos jatos que carregam água fria da costa para o interior. Estes jatos são delimitados por abruptas quebras de velocidade e temperatura. Estas frentes podem ser observadas nas imagens de radar como feições claras e escuras. O mapeamento destas frentes fornece informações sobre a dinâmica do jato.

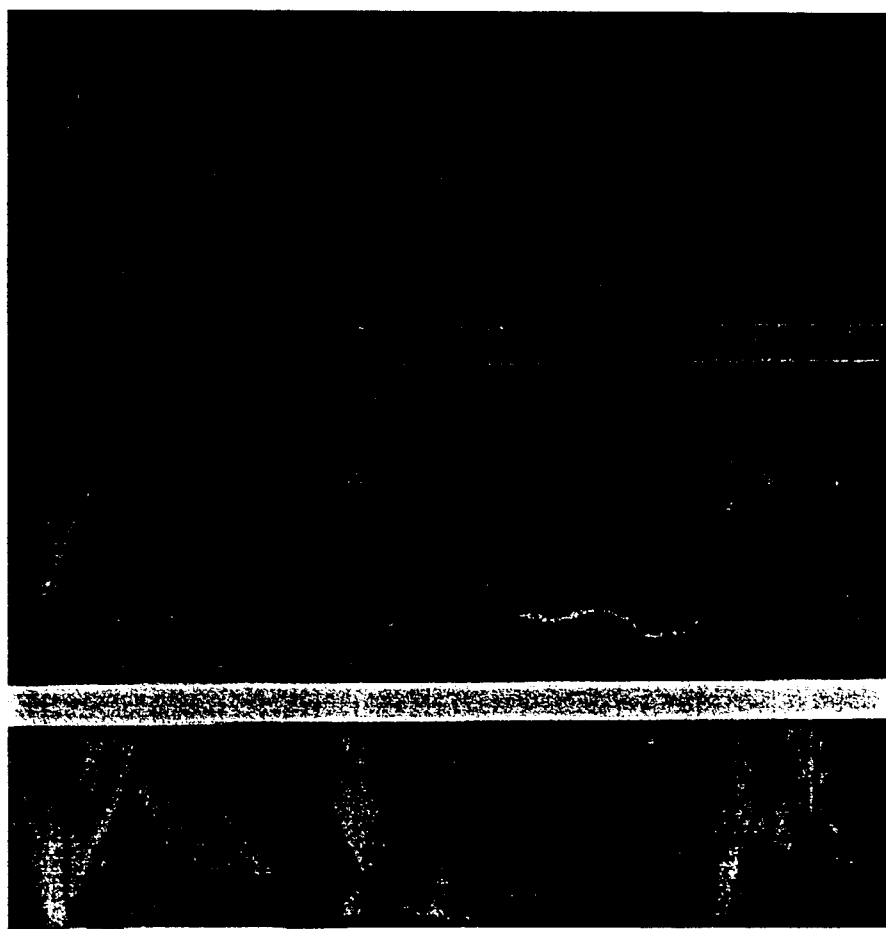


Figura 6.9 - Exemplo de imagens nas bandas P, L e C

Outra aplicação dos dados de radar em oceanografia é o do mapeamento da topografia do fundo dos oceanos. A batimetria de média e pequena escala de uma região pode ser refletida nas variações de rugosidade da superfície. A Figura 6.10 permite comparar uma imagem na região óptica do espectro eletromagnético em que as tonalidades mais claras representam a luz refletida do fundo pelas partes mais rasas do relevo submerso com as variações de rugosidade das imagens SAR. As variações de profundidade entre 5 e 50 metros são percebidas nas imagens SAR através de mudanças no coeficiente de retroespalhamento e da rugosidade da superfície.

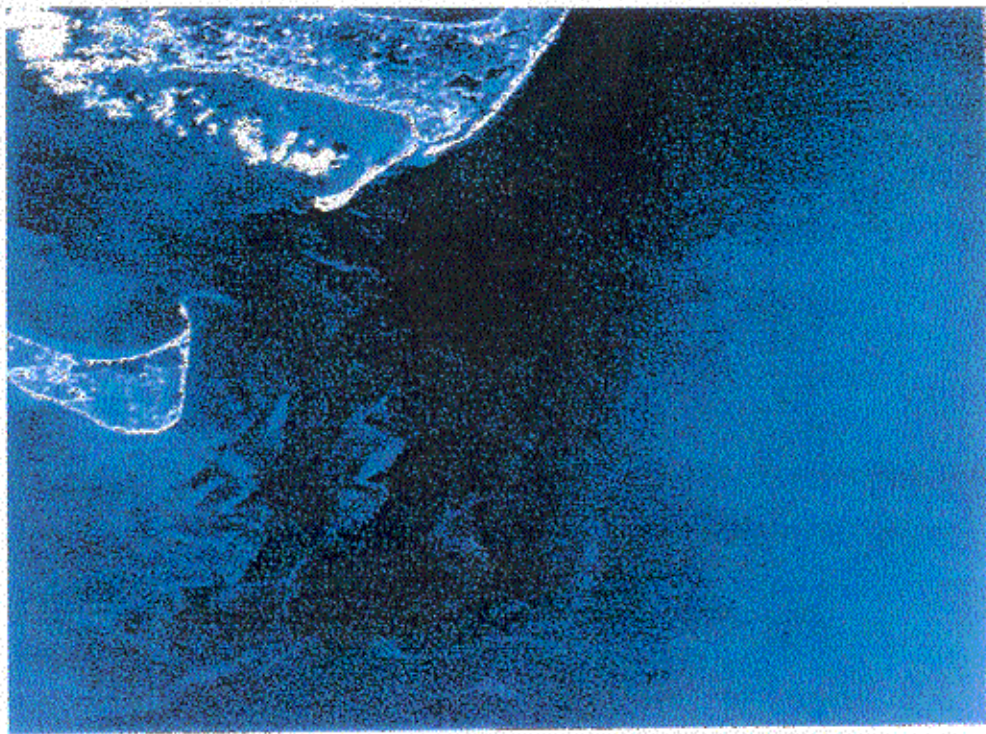


Figura 6.10 a -

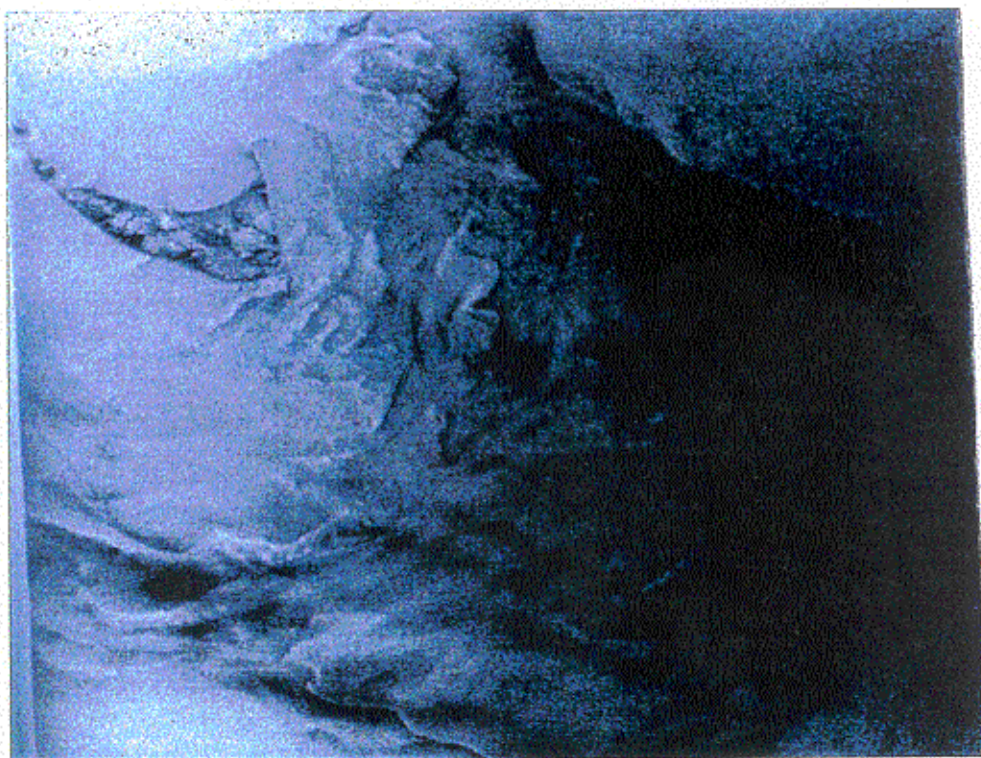


Fig 6.10b

Figura 6.10 a e b - Comparação entre imagem ótica (a) com imagem de radar (b)

Os dados de radar também tem sido utilizados para o acompanhamento de modificações da costa indicadoras de perdas de terra por processos de erosão costeira ou devido a alterações do nível do mar. Dados multitemporais de radar também têm sido utilizados para a detecção de vazamentos naturais ou provocados pelo homem como os vazamentos de petróleo, para o monitoramento de embarcações, suporte à pesca, etc. Maiores informações sobre o tema podem ser encontradas em Evans (1995) que fornece uma extensa e atualizada bibliografia sobre o assunto.

6.2.2 - APLICAÇÕES EM HIDROLOGIA

Os dados de radar tem se tornado importantes para os estudos hidrológicos porque eles fornecem informações sobre as distribuições espaciais e temporais de parâmetros de importância hidrológica tais como: umidade dos solos, extensão de áreas inundadas, área ocupada por superfícies líquidas, monitoramento de áreas irrigadas.

Como um exemplo de aplicação de dados de radar em hidrologia podemos mencionar o mapeamento de áreas inundadas em planícies de inundação. Hess et al. (1995) utilizaram dados de radar de abertura sintética nas bandas C e L, nas polarizações HH, VV e VH em duas datas com o objetivo, entre outros, de mapear a variação na área inundada na planície de inundação do rio Amazonas na região de Barroso. Esta região é recoberta por floresta, o que torna difícil o mapeamento da área alagada sob floresta. Os autores conseguiram mapear uma variação de 11,8 % na área inundada entre Abril de 1994 e Outubro de 1994. Este tipo de informação pode ser usada para o refinamento de modelos hidrológicos convencionais. Neste sentido, dados de radar obtidos pelo satélite japonês JERS-1 estão sendo adquiridos sobre a planície do rio Amazonas desde a nascente até a foz, na máxima vazão e na mínima vazão de modo a se obter para toda a planície a distribuição espacial das diferenças na área alagada entre os dois períodos. Estes dados serão utilizados como entrada no modelo hidrológico de larga escala que está sendo desenvolvido para a Amazônia através de cooperação técnica entre instituições brasileiras e a Universidade de Washington, Seattle.

A Figura 6.11 permite observar o mosaico de radar na banda L produzido pela NASDA (Agência Espacial Japonesa) para a região central da Amazônia. Os dados foram coletados entre 23 de Fevereiro de 1993 e 03 de Março de 1993, durante o período inicial de crescimento da vazão em toda a bacia. A análise da Figura permite observar a área alagada sob a floresta, a qual produz um valor de retroespalhamento muito mais elevado do que o da Floresta de Terra Firme, ou das Florestas de Várzea Inundável, porém momentaneamente não afetada pela água.

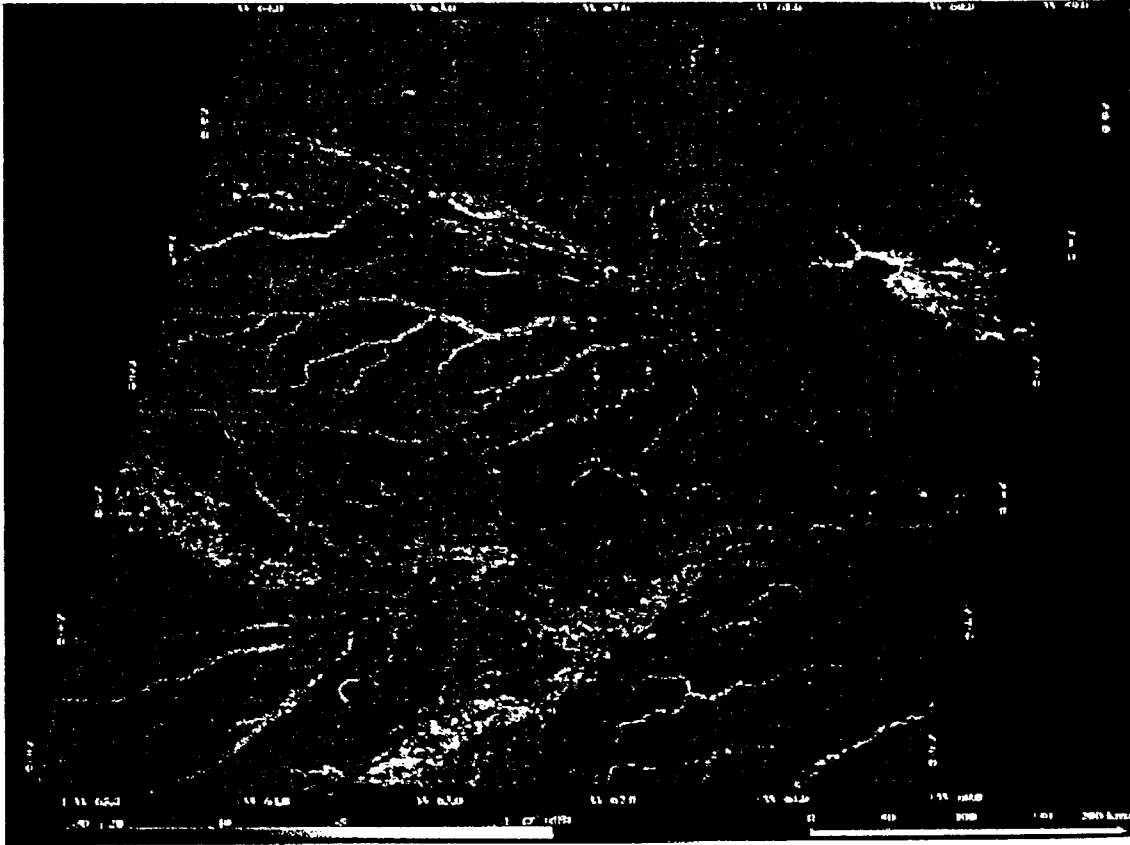


Figura 6.11 - Mosaico do JERS-1

6.2.3 - MONITORAMENTO DE PLANTAS AQUÁTICAS

As imagens de radar também têm sido utilizada para o mapeamento de plantas aquáticas. Trabalhos realizados por Costa (1995), Noernberg (1995) e Novo et al. (1995) no reservatório de Tucuruí demonstram a utilidade dos dados de radar para identificar diferentes gêneros de plantas aquáticas. Nestes trabalhos foram utilizados dados da missão SAREX 92 que operou com um radar de visada lateral na banda C que permitiu a aquisição de imagens em diferentes polarizações e ângulos de incidência. A Figura 6.12 permite observar as diferenças entre bancos de *Eichhornia*, sp. e *Scirpus*, sp. nas polarizações HH, HV e VH obtidas no modo nadir (ângulo médio de incidência em torno de 45°). Pela análise da Figura pode-se verificar que o banco de *Scirpus*, sp. apresenta um coeficiente de retroespalhamento mais elevado do que a *Eichhornia*, sp. a qual aparece com tonalidade bastante escura.

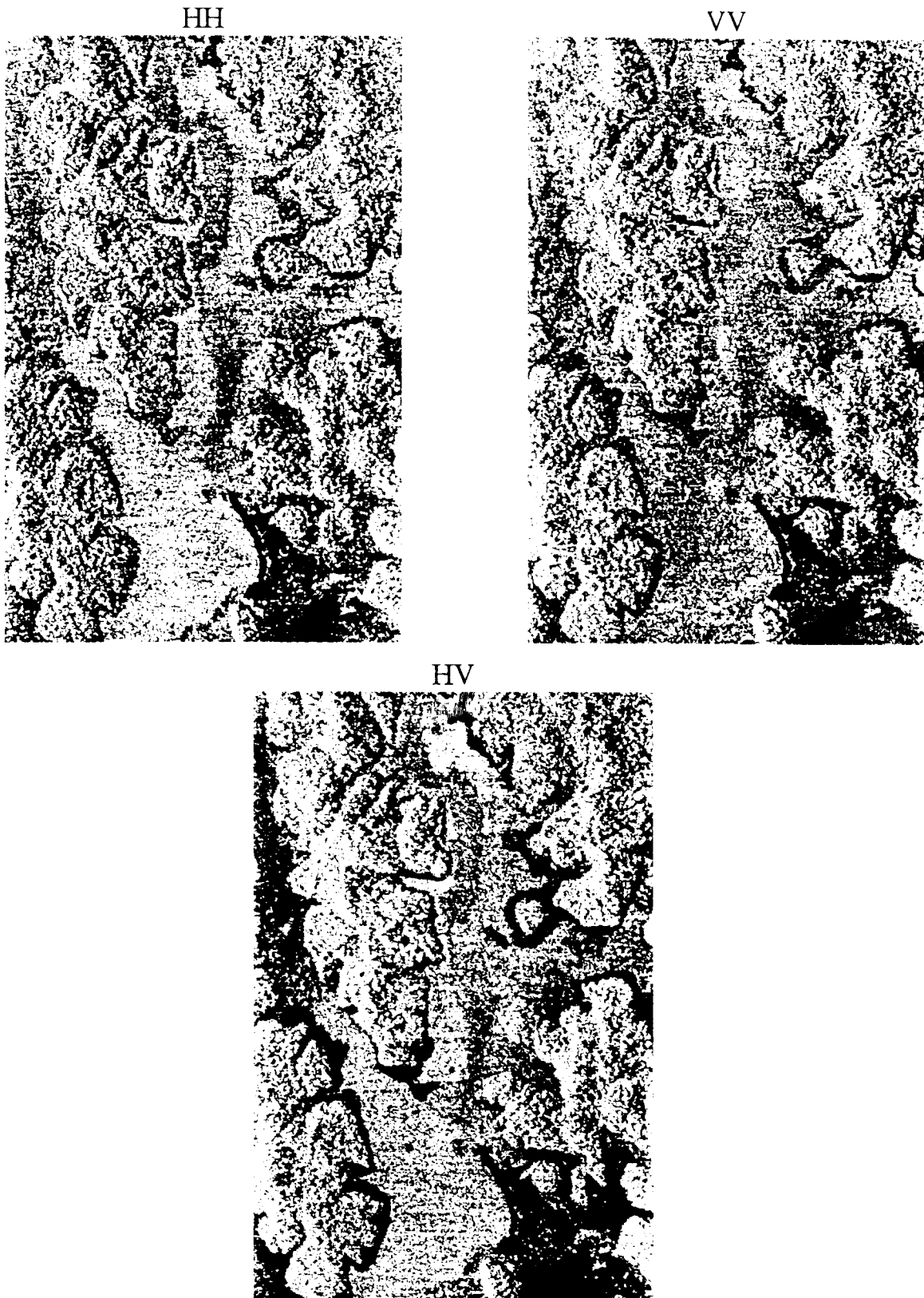


Figura 6.12 - Imagem de radar na banda C, polarização HH, VV e HV.

Estudos realizados por Costa (1995) indicam que a utilização de composições coloridas obtidas com as diferentes polarizações aumentam o conteúdo de informações passíveis de serem extraídas das imagens SAR na banda C. A Figura 6.13 permite observar as diferenças de resposta dos diferentes bancos de plantas aquáticas resultantes da combinação das bandas HH, VV e VH.

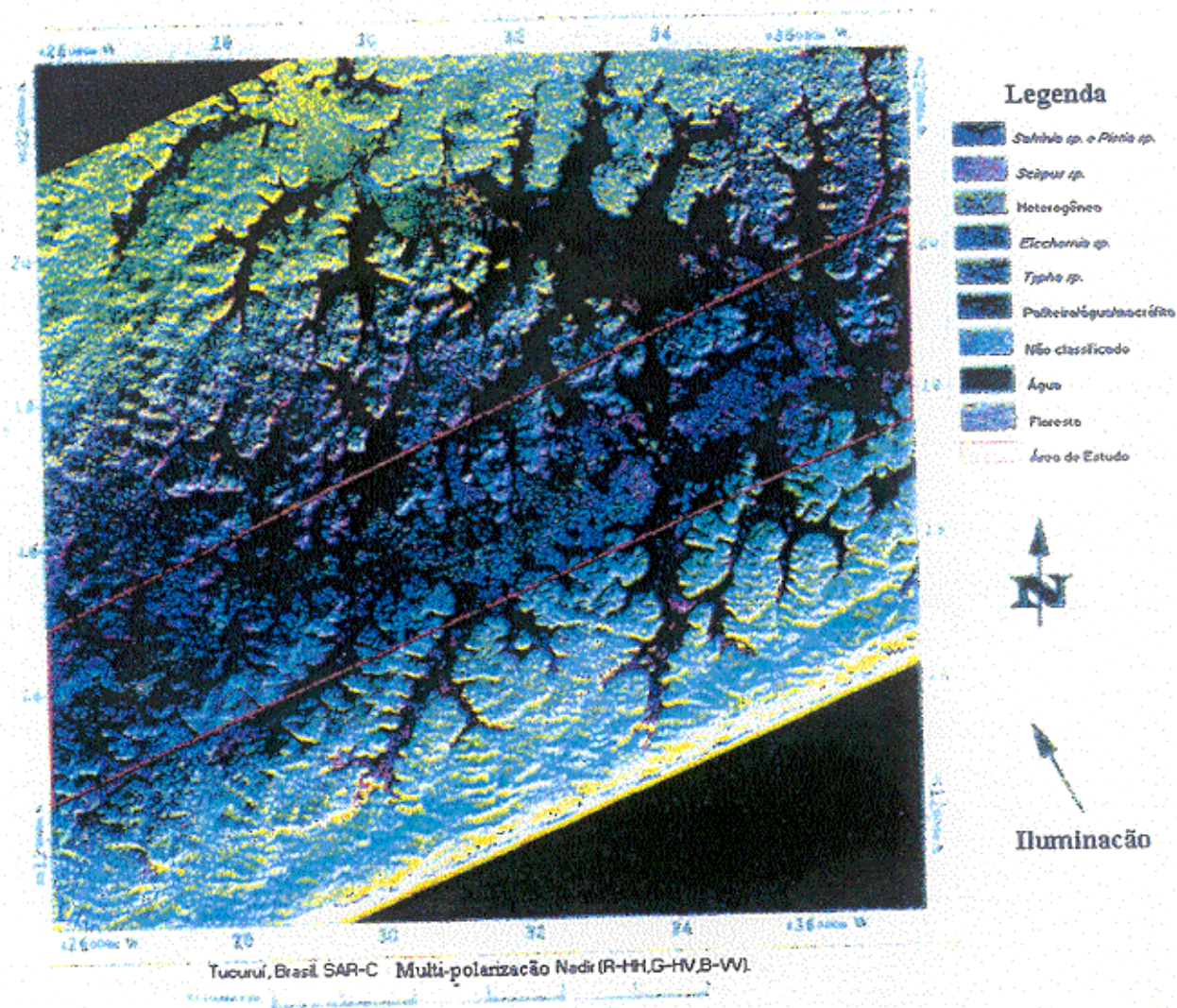


Figura 6.13 - Composição colorida de imagens SAR na banda C, polarização HH, VV e HV (Fonte: Costa, 1995).

A Figura 6.14 mostra o reservatório da UHE Tucuruí imageado na banda L pelo sensor JERS-1. Pode-se observar que os bancos de plantas aquáticas e os paliteiros podem ser detectados apesar da menor profundidade de penetração.

A Figura 6.14 mostra o reservatório da UHE Tucuruí imageado na banda L pelo sensor JERS-1. Pode-se observar que os bancos de plantas aquáticas e os paliteiros podem ser detectados apesar da menor profundidade de penetração.



Figura 6.14 - Imagem JERS-1 na banda L adquirida sobre o reservatório da UHE Tucuruí.

Através de processamento digital desta imagem pode-se criar uma composição colorida que permite realçar diferentes feições (Figura 6.15). A imagem original foi processada com três filtros diferentes: um filtro para remoção de ruídos, um filtro mediana, e um filtro de realce de bordas. Cada imagem resultante foi associada a uma cor, resultando numa composição em que são realçados os limites terra-água em vermelho.

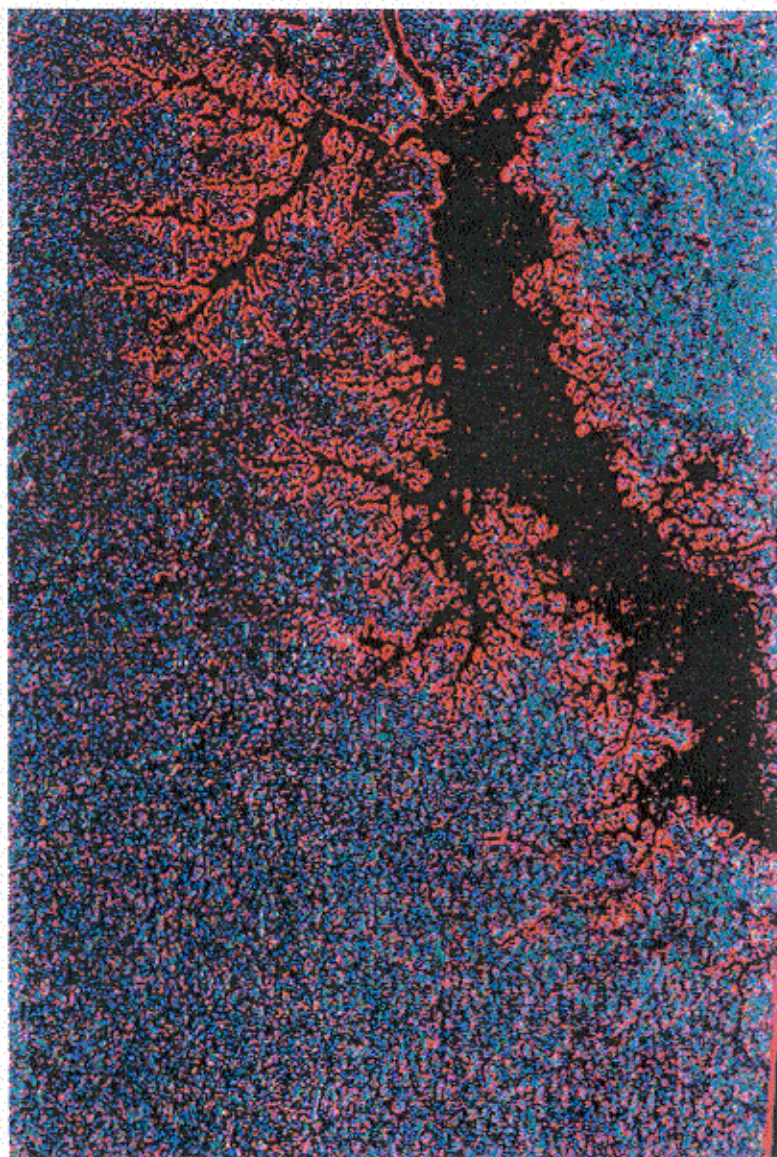


Figura 6.15 - Composição de imagens JERS-1 na banda L submetida a diferentes filtragens.

BIBLIOGRAFIA

Batlivala, P.; Ulaby, F.T. Estimation of soil moisture with radar remote sensing. *11th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, p. 1557-1566, 1977.

Batista, G.T. ; Pereira, J.L.G. Dynamics of land use and land cover change using Landsat TM in eastern Amazônia. *VII Simposio Latinoamericano de Percepção Remota*, Programa y Resúmenes, V II, p7. , Mexico, 1995.

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.

Epiphânio, J.C. N.; Formaggio, A.R. Sensoriamento Remoto de Três Parâmetros Agronômicos de Trigo e Feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 26(10):1615-1624, out, 1991.

Epiphânio, J.C.N.; Almeida Jr., A. C. de; Formaggio, A.R. Desenvolvimento do Trigo Avaliado com Dois Índices de Vegetação. no prelo, 1996.

Evans, D.L. ed. *Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Current Status and Future Directions*. NASA Technical Memorandum 4679. , 1995.

Formaggio, A.R.; Epiphânio, J.C.N.; França, G.V. Spectral indicators of vegetation vigour of bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.). *International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*, V. 29, p: 223-227, 1992.

Hess, L.L.; Melack, J.M.; Filoso, S.; Wang, Y. 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): 896-903, 1995.

Johnson, R.W.; Munday Jr., J.C. *The Marine Environment* . In (Estes, J.E.; Thorley, G.A., Ed.) *Manual of Remote Sensing*, V.II, cap. 28, p. 1371 - 1496, American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1983.

Long, A.R.G. ; Yuegin, S; Normam, J.M. Crop structure and the penetration of direct sun light. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35:83-101, 1985.

Long, A.R.G. Simplified estimate of Leaf Area Index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology*, 41:179-186, 1987.

Pierce, L.L.; Running, S.W. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecology*, 69(6): 1762-1767, 1988.

Salomonson, V.V. *Water Resources Assessment*. In (Estes, J.E.; Thorley, G.A., Ed.) **Manual of Remote Sensing, V.II**, cap. 29, p. 1497 - 1570, American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1983.

Skolnik, M.I. A review of radar sea echo. NRL 2025, Naval Research Lab. ,Washington, D.C. , 1969, p.12.

Smith, F.W.; Sampson, D.A; Long, J.N. Comparison of Leaf Area Index Estimates from tree allometrics and Measured Light Interception. *Forest Science*, 37(6):1682-1688, 1990.

7. APLICAÇÕES DE DADOS SAR PARA ESTUDOS DE USO E COBERTURA DO SOLO EM AMBIENTES TROPICAIS

7.1. INTRODUÇÃO

O objetivo desta seção é fornecer uma visão sucinta das possibilidades de aplicações de dados SAR aerotransportados e orbitais para análise e monitoramento de ambientes de florestas tropicais. São realizadas ainda considerações sobre as possibilidades de utilização de dados do sistema RADARSAT nestes ambientes, a partir de um estudo de caso no Estado do Acre.

A partir da introdução de sistemas SLAR e SAR aerotransportados nos anos 60, o sensoriamento remoto por radar desempenhou um importante papel num grande número de levantamentos de recursos naturais, realizados em diversos países e regiões tropicais (p.ex. Projeto Radam no Brasil). Diversas missões de radar aerotransportado na área de exploração de petróleo (p.ex. na Indonésia) demonstraram que o sensoriamento remoto por radar é igual, ou mesmo superior, à maioria das técnicas de Sensoriamento Remoto em função de (Trevett, 1986; Bullock, 1987):

- o seu relativo custo efetivo e a facilidade de aquisição de dados,
- o seu uso comprovado como ferramenta de reconhecimento para mapeamentos,
- a sua capacidade em fornecer novas informações, particularmente em áreas remotas,
- a sua utilidade para um programa de exploração e desenvolvimento,
- a sua capacidade de co-registro com outros dados,
- a análise visual com um mínimo de gastos em processamento e hardware.

As imagens de radar, particularmente quando em forma digital, comprovaram sua eficiência especialmente quando usadas em conjunto com dados de sensores óticos (LANDSAT, SPOT, fotos aéreas) e dados *in situ*. A integração de dados a partir de várias fontes e a análise de um conjunto inteiro de dados pode ser efetuada, usando-se planos de informação associados a um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Outra opção de manipulação digital inclui as transformações de imagens, o que significa combinar diferentes fontes de dados numa só imagem, usando uma transformação de intensidade, matiz e saturação de cor (IHS-Intensity, Hue, Saturation) no vídeo (Harris et al., 1989), como será apresentado neste paper.

O desenvolvimento de técnicas de processamento digital de dados SAR, como aquelas usadas pelo sistema aerotransportado Intera STAR-1, em uso atualmente para missões comerciais SAR em regiões tropicais, foi uma verdadeira revolução no final da década de 80, em função de sua alta qualidade de dados e da flexibilidade de análise de imagens digitalizadas. Dados SAR digitalizados, com uma resolução de 6 metros e alta fidelidade geométrica e radiométrica, foram usados para procedimentos de análise digital, na construção de mosaicos de imagens e em exercícios de mapeamento topográfico em escalas de 1:50.000 a 1:250.000. Em comparação com estas performances, os levantamentos anteriores foram efetuados em escala de reconhecimento, ou seja a 1:250.000 até 1:1.000.000.

Em regiões tropicais foram adquiridas imagens SAR durante várias missões SAR orbitais, incluindo as missões SEASAT (1978), SIR-A (*Shuttle Imaging Radar*), SIR-B (1984) e SIR-C (1994). Os primeiros três sistemas operavam em bandas L, com polarização horizontal de transmissão e recepção (L-HH). A resolução espacial variava de 20 a 60 m. O radar SIR-B incorporou uma antena regulável, o que permitiu o imageamento de áreas e alvos específicos, imageados em diferentes ângulos de incidência e durante órbitas consecutivas. A disponibilidade de dados SAR aerotransportados ou orbitais multitemporais nas décadas de 70-80 é extremamente limitada para regiões tropicais. Inclui algumas coberturas repetitivas de SEASAT SAR e algumas faixas de sobreposição ocasional de cenas do SIR-A e -B. Isto praticamente inviabilizou o uso de dados SAR orbitais para estudos de detecção de mudanças em ambientes de floresta tropical. Assim sendo, os poucos estudos concluídos para avaliar as condições bem como fenômenos dinâmicos de uso do solo, basearam-se essencialmente num único conjunto de dados SAR (Elachi, 1988).

7.2. SISTEMAS SAR ORBITAIS E AEROTRANSPORTADOS: EXEMPLOS DE APLICAÇÕES NA AMAZÔNIA

A partir do lançamento dos satélites ESA/ERS-1 (1991), ERS-2 (1995), JERS (1992) e RADARSAT (Nov. de 1995), a obtenção de conjuntos de dados SAR operacionalmente nas bandas C e L, tornou-se uma realidade para regiões de florestas tropicais, a nível mundial. Visando o desenvolvimento de aplicações operacionais com dados destes sistemas SAR orbitais, foram realizados diversos projetos pilotos em áreas de florestas tropicais, sendo que, a título de exemplo, serão sucintamente discutidos abaixo, os trabalhos referentes a dois projetos recentes na Amazonia, bem como as suas conclusões.

7.2.1. Projeto TREES (Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites)

O *TREES ERS-1 STUDY'94* foi proposto pelo JRC (*Joint Research Centre, Ispra/Itália*) e ESA (*European Space Agency*), com o objetivo de avaliar a viabilidade de utilização de dados do ERS-1 SAR para estudar florestas tropicais sob várias condições ecológicas e ambientais e numa escala global, com particular interesse para o monitoramento operacional do desmatamento. Pelo lado técnico, são analisados vários procedimentos de análise de dados SAR como: filtragem de *speckle*, análise de textura, segmentação, classificação, geocodificação do terreno, interferometria e modelagem do retroespalhamento. Foram selecionadas totalmente 21 áreas testes em regiões tropicais e que representam diferentes condições em termos de *ecologia florestal, densidade florestal, estados de desmatamento e características do terreno*. (Malingreau, 1994).

Uma das áreas testes do Projeto TREES no Brasil, encontra-se no Estado do Acre, próxima a Rio Branco, objeto de um projeto de estudo em cooperação DLR (Agencia Espacial da Alemanha) e o INPE. O objetivo principal deste projeto no Acre é o desenvolvimento e teste de metodologias para o mapeamento diferencial de áreas de florestas e não-florestas, bem como o monitoramento da floresta original, procurando definir ainda os diferentes usos do solo (Keil et al, 1995). Foram realizados vários testes com diferentes classificadores, sendo que o classificador EBIS (*Evidence-based interpretation of satellite imagery*), desenvolvido por Lohmann (1991), apresentou a melhor performance para os temas acima mencionados, especialmente quando são considerados os algoritmos de classificação textural.

Neste estudo foi utilizado, no período de Abril 1991 a Agosto 1993, um conjunto de 10 cenas geocodificadas do ERS-1 SAR, as quais foram calibradas e georeferenciadas, para permitir análises comparativas com resultados obtidos do processamento de dados do TM-Landsat. Usando-se o classificador EBIS desenvolvido por Lohmann (1991), obteve-se os histogramas das classes de interesse, numa determinada janela, assumindo-se uma distribuição multinomial. O ruído *speckle*, característico de imagens de SAR, bem como a informação textural são preservados. A classificação textural baseia-se em vetores de co-ocorrência, os quais são modelados como funções de densidade multinomial. A discriminação entre floresta/não-floresta foi bem sucedida em quase todas as áreas (Figuras 7.1 e 7.2). Em terrenos com relevo acidentado ocorreram erros de classificação. Estes erros podem ser reduzidos aplicando-se filtros de pós-classificação. Os erros são devidos especialmente a duas causas: 1. mudanças no relevo e portanto na iluminação do radar; 2. grandes volumes de vegetação do tipo capoeira, ou de espécies isoladas, como palmeiras, atuando como *corner reflectors*, que resultam em valores de retroespalhamento maiores e também em variações texturais.

A principal vantagem da interpretação visual de dados do ERS-1/SAR é a discriminação de unidades geomorfológicas como principal fonte de informação. A informação de relevo precisam ser adicionadas informações texturais e estruturais, especialmente em áreas com relevo mais energético. Os problemas referentes à discriminação de áreas de rebrota podem ser minimizados quando se usam vários conjuntos de dados do SAR.

7.2.2. PROJETO SAREX (South America Radar Experiment)

O Projeto SAREX, realizado em 1992-95 em cooperação Canadá/Brasil e com participação da ESA (*European Space Agency*) continha dois objetivos principais, a saber:

1. a obtenção de um conjunto de dados SAR, em banda C, com o sistema SAR-580 aerotransportado canadense, para avaliar as capacidades deste sistema visando a detecção e mapeamento de feições terrestres tais como, tipos de florestas, desmatamentos, áreas queimadas, áreas de rebrota e áreas inundadas e para mapear áreas de reservatórios de hidroelétricas. A partir destes dados foram efetuadas simulações de imagens do RADARSAT, sistema SAR orbital Canadense lançado em Novembro de 1995.

2. a realização da difusão de tecnologia SAR entre profissionais na área de planejamento e gerenciamento de recursos naturais do Brasil e em outros países Latino-Americanos. Neste contexto foram realizados diversos Cursos intensivos de Treinamento SAR em todos os Estados da Amazônia, bem como seminários, workshops e publicados diversos papers em simpósios nacionais e internacionais.

Neste item serão descritos, em termos gerais, os resultados obtidos na áreas-teste Acre.

Em todas as áreas-testes da Amazonia foram adquiridas imagens do sensor C-SAR, (SAR-580, aerotransportado) nos três modos característicos de aquisição de dados do SAR-580, a saber:

- *modo nadir*: faixa de varredura de 20 km, angulos de incidencia de nominalmente 0 a 74° com resolução de 6x6 m;
- *modo faixa estreita*: faixa de varredura de 18 km, angulos de incidencia de 45 a 76° com resolução de 6x6 m e
- *modo faixa larga*: faixa de varredura de 60 km, angulos de incidencia de 45 a 85° com resolução de 10x20 m.

Os dados foram adquiridos nas polarizações HH e VV. Foi usada ainda uma imagem TM-Landsat nos canais TM3 = azul, TM4 = verde e TM5 = vermelho. O processamento das imagens SAR foi realizado em três passos:

1. As variações radiométricas no plano perpendicular à direção de vôo (*across track*) foram minimizadas, usando-se uma função de correção polinomial originada da própria cena. Escolheu-se uma área de treinamento (com o mínimo possível de água e sombras) perfazendo uma seção que cobre toda a largura da imagem. Utilizou-se a média ao longo da linha de vôo (*along track*) para produzir uma função que contenha a intensidade média da imagem como função da direção perpendicular da linha de vôo (*range*). Esta função foi ajustada a um polinômio de oitava ordem ou inferior. A imagem foi então corrigida, usando este polinômio como função multiplicativa. A correção foi multiplicativa porque as fontes dominantes de variação (padrão de antena, distancia variável ao alvo e variações do retroespalhamento como função do angulo de incidencia) possuem todas elas efeitos multiplicativos.

2. A imagem foi corrigida visando um espaçamento de pixel igual na distancia do solo (*ground range*), usando uma projeção trigonométrica e um modelo considerando a Terra plana. Esta aproximação é adequada para a área de estudo onde o relevo é pouco pronunciado.

3. Um realce linear de contraste foi aplicado seguindo uma determinação interativa dos limiares superior e inferior para produzir uma imagem mais apropriada para a interpretação visual. Finalmente a imagem TM foi registrada à imagem de radar, usando os tradicionais pontos de controle no terreno e uma transformação quadrática.

Foram obtidas imagens compostas SAR/TM para produzir um produto no qual a contribuição de ambos os sistemas sensores foi otimizada. Assim o Mapeador Temático fornece boas informações sobre vegetação, enquanto o SAR fornece distintas informações sobre relevo, porém não permitindo discriminação de vegetação. A informação de vegetação em composições coloridas TM é essencialmente cromática (matiz e saturação) enquanto que a informação topográfica numa imagem SAR é visível como variações de brilho, o que dá uma aparência de relevo sombreado. Considerando que neste estudo se pretende visualizar cromaticamente as informações do TM, foi aplicada a transformação IHS (Intensidade-Matiz-Saturação) para RGB (vermelho-verde-azul), considerando a imagem SAR como o *input* de I, a componente I do TM como *input* H e a componente S do TM como *input* S. A qualidade das imagens resultantes foi extremamente satisfatória, na medida em que a topografia e as cores foram bem visualizadas, aparentando muitas semelhanças às cores da imagem TM composta original. Além disso, a textura da imagem, aparente na imagem SAR é também claramente visível nas composições coloridas. Exemplos destas imagens compostas são apresentados nas Figuras 7.3, 7.4, 7.5, 7.6 e 7.7.

A simulação de imagens do RADARSAT, o segundo objetivo do Projeto SAREX no Brasil, visou avaliar as informações que estarão disponíveis a partir do satélite RADARSAT. As simulações foram realizadas usando o pacote SARPAC da Firma INTERA, descrito detalhadamente por Banner & Ahern, 1995. As imagens obtidas podem ser consideradas realísticas (Figuras 7.8, 7.9 e 7.10), tendo porém duas limitações, a saber (Kux et al, 1995):

- O ângulo de incidência das imagens de SAR aerotransportado, usado para as simulações, é maior do que o ângulo de incidência máximo para o RADARSAT, na maior parte da imagem. Isto certamente afetará o conteúdo de informações das imagens. Não obstante, áreas florestais exibem uma variação menos pronunciada de retroespalhamento em função do ângulo de incidência do que outros tipos de cobertura do solo, de modo que se espera que as simulações sejam bastante realísticas para áreas florestais.
- O ruído *speckle* nas simulações é provavelmente maior do que aquele que aparecerá nas imagens RADARSAT reais por causa do "mapa de refletividade" usado como *input* para a simulação que por sua vez foi derivado de dados de SAR aerotransportados e que possui algum *speckle* residual. A Figura 8 apresenta uma simulação do modo padrão do RADARSAT, da mesma área apresentada nas cenas da Figura 3. Praticamente as mesmas feições geomorfológicas discerníveis nesta imagem são perceptíveis nos dados SAR aerotransportados originais.

Foi efetuada uma simulação do RADARSAT ao longo de toda a seção da rodovia BR-364 entre Rio Branco e Sena Madureira (Acre), para avaliar a capacidade do RADARSAT na identificação de áreas desmatadas e para mapear o uso do solo, usando-se uma cena TM como referencia (Ahern et al, 1993). Uma parte desta simulação é apresentada na Figura 9. A simulação do RADARSAT mencionada foi analisada a partir de uma cópia em papel em escala 1:100.000. Os limites de todas as áreas desmatadas foram demarcados e comparados com os mesmos limites obtidos de uma imagem TM em escala 1:100.000. Para obter-se uma amostragem com diversas observações independentes, a área-teste foi dividida em 12 seções com aproximadamente o mesmo tamanho. A área desmatada para cada uma das 12 seções foi medida com um planímetro digital, sendo posteriormente efetuada uma análise de regressão linear, relacionando a estimativa da área desmatada às medidas obtidas da imagem TM para as 12 seções da área-teste da BR-364. Os coeficientes de regressão e valores de r^2 obtidos desta análise constam na Tabela 1.

<u>Parâmetro avaliado</u>	<u>Valor</u>
Inclinação do ajuste linear	1.04 +/-0.06
Interseção do ajuste linear (km ²)	0.94 +/-5.09
r^2 do ajuste linear	0.97

Tabela 1 - Avaliação de parâmetros para a estimativa de erros de áreas desmatadas

A alta correlação ($r^2 = 0.97$) significa que uma pequena amostra de dados óticos pode ser usada para corrigir o erro sistemático numa estimativa com uma cena do RADARSAT do desmatamento de uma área maior, usando o estimador de regressão de Hanuschak et al. (1980). A partir destes resultados espera-se que o RADARSAT seja um sistema promissor para o monitoramento de desmatamento de floresta tropical, a nível regional, nacional e global. Este sistema imageador deverá contribuir igualmente para a análise da dinâmica de uso do solo.

O desmatamento devido às fazendas de criação de gado no Acre é claramente visível na simulação do RADARSAT. Suas feições retilíneas, geralmente alinhadas com a rodovia, ajudaram na detecção e interpretação das bordas. Estas extensas áreas desmatadas possuem alto contraste radiométrico com a floresta em volta, em todas as 6 bandas refletidas do TM e conseqüentemente nas composições coloridas usadas para a sua avaliação. Pastos "limpos" (Figuras 6 e 7) possuem um alto contraste de brilho em relação à floresta em volta, na simulação do RADARSAT (Figuras 9 e 10). Pastagens recentes bem como pastagens antigas (capoeiras) possuem contraste inferior, porém são geralmente visíveis. Quando há uma abrupta transição entre floresta primária e uma área desmatada, há um sinal de retorno muito brilhante da borda do desmatamento, provavelmente causado por uma reflexão de canto (*Corner reflector*) entre os troncos de árvores e o solo e uma sombra escura na seção mais próxima de cada área desmatada. Apresentando ângulos de incidência de até 85° nos dados SAR do *modo faixa larga* usados para a simulação, estas sombras são maiores do que nos dados RADARSAT propriamente ditos.

Na simulação também aparecem seções onde a borda entre a floresta primária e áreas desmatadas não são bem distinguíveis. Florestas tropicais, parcialmente degradadas por interferência humana, são facilmente reconhecíveis em imagens TM, porém de muito difícil discriminação na simulação do RADARSAT, por causa de seu baixo contraste e falta de efeitos distintos das bordas (bordas brilhantes e sombras). O contraste entre as pastagens e a floresta em volta é maior durante o estágio de "pasto limpo", indicando que o monitoramento, usando uma imagem nova a cada 1-2 anos, forneceria a estimativa mais confiável das áreas de pastagens. A Figura 10 é um exemplo de imagem simulada do RADARSAT no *modo fino*. Comparando esta imagem com aquela da Figura 9, observa-se que a definição de textura e diferenças de textura entre floresta primária e pastagem é muito maior no modo fino. Também se observa uma definição melhor das bordas, especialmente em áreas de sombras e de retorno com alto brilho. Canais de drenagem, pequenos reservatórios de água, bem como matas galerias dentro da área de pastagem podem ser discriminadas nesta cena. As diferenças de brilho relacionadas a diferentes estágios de regeneração são semelhantes tanto nas simulações do *modo fino* como do *modo padrão*.

As melhorias na qualidade de imagem demonstram que imagens do RADARSAT no *modo fino* provavelmente fornecerão limites mais precisos e estimativas de áreas desmatadas mais exatas do que o *modo padrão*. Por outro lado, as vantagens destas melhorias precisam ser relativizadas, considerando a cobertura areal bem menor das imagens do RADARSAT no *modo fino*.

Concluindo pode-se afirmar que dados SAR podem fornecer informações geomorfológicas mais detalhadas para o mapeamento em escalas maiores. A textura de imagem e a capacidade para mapear pequenas áreas desmatadas, torna dados de SAR aerotransportado os mais indicados para mapear estas feições em relação às florestas. A frequência e a confiabilidade na sua obtenção, torna imagens SAR orbitais mais indicadas para a estimativa de grandes (1.000 a 10.000 ha) e médios (100 a 1.000 ha) desmatamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahern, F.J., H.J.H. Kux, R. Salcedo, & R.W. Pietsch, 1993, "An Evaluation of C-band Radar to detect Openings in Moist Tropical Forests", *Proceedings, SAREX'92 Final Results Symposium*, Paris/France December 6-8, European Space Agency, pp. 235-246.

Banner, A.V. & F.J. Ahern, 1995, "Forest Cutover Mapping Using Two-Date Airborne C-band SAR and simulated RADARSAT Imagery", *Canadian Journal of Remote Sensing* 21, pp. 124-137.

Bullock, B.L. , 1987, "Radar applications in remote sensing: an airborne remote sensing case history, Proceedings *21st International Symposium on Remote Sensing of Environment*, ERIM, Ann Arbor/MI.

Elachi, C. ,1988, "Spaceborne radar remote sensing: applications and techniques", IEEE Press, New York, NY, 255 p.

Hanuschack, G., R. Sigman, M. Craig, M. Ozga, R. Luebbe, P. Cook, D. Kleweno and C. Miller, 1980, "Crop Area Estimates from Landsat: Transition from Research and Development to Timely Results", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-18 , 160-166.

Harris, J, T.K.Hirose, R. Murray, 1989, "The IHS transform for the integration of radar data with other remotely sensed data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 56, (12), 1631-1641.

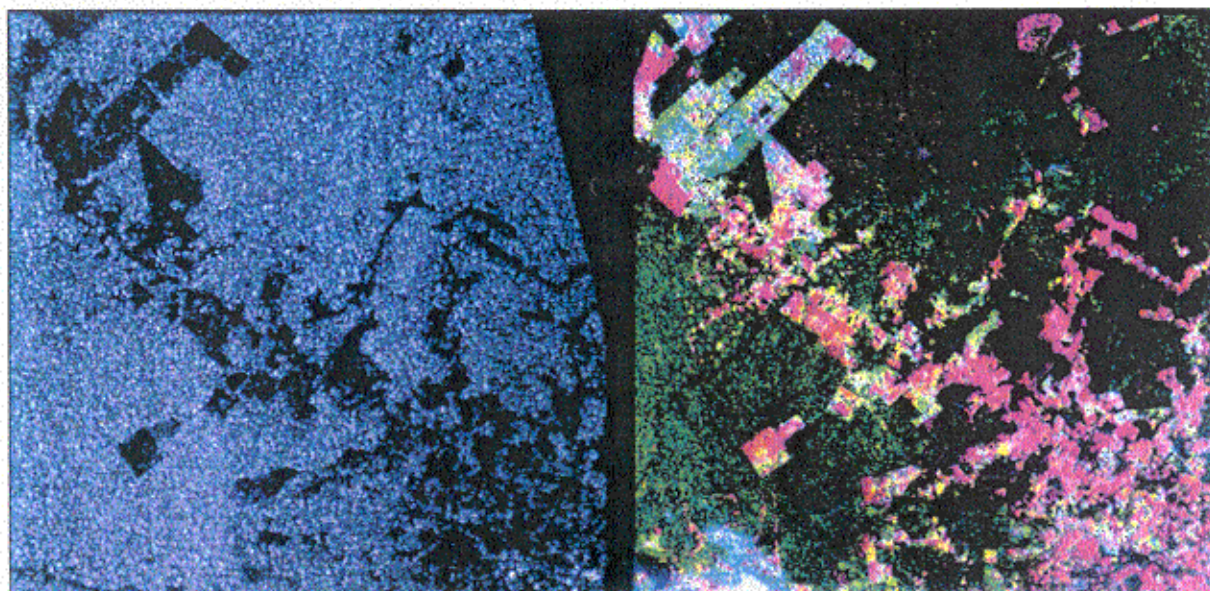
Keil, M., D. Scales, R. Winter, H.J.H. Kux & J.R. Santos, 1995, "Tropical rainforest investigation in Brazil using multitemporal ERS-1 SAR data", *Proceedings 2nd ERS-1 Application Workshop*, London 6-8 December 1995.

Kux, H.J.H., F.J. Ahern & R.W. Pietsch, 1995, "Evaluation of radar remote sensing for natural resource management in the tropical rainforests of Acre State, Brazil", *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 21 (4): 430-440.

Lohmann, G., 1991, "An Evidential Reasoning Approach to the Classification of Satellite Images", *Doctoral Thesis*, Technische Universität München, DLR-FB 91-29, Oberpfaffenhofen.

Malingreau, J-P, J. Aschbacher, F. Achard, J. Conway, F. De Grandi, M. Leysen, 1994, "TREES ERS-1 Study '94: Assessment of the Usefulness and Relevance of ERS-1 for TREES", *Proceedings of the First ERS-1 Pilot Project Workshop*, Toledo/Spain, 22-24 June 1994 (ESA SP-365), October 1994: 219-223.

Trevett, J.W. , 1986, "Imaging radar for resource surveys", Chapman & Hall, London, 313 p.



ERS-1/SAR, subcena de Junho de 1992

TM Landsat, subcena de Agosto 1992,
bandas 5,4,3 (RGB).

Fig.7.1: Área de estudo no Acre

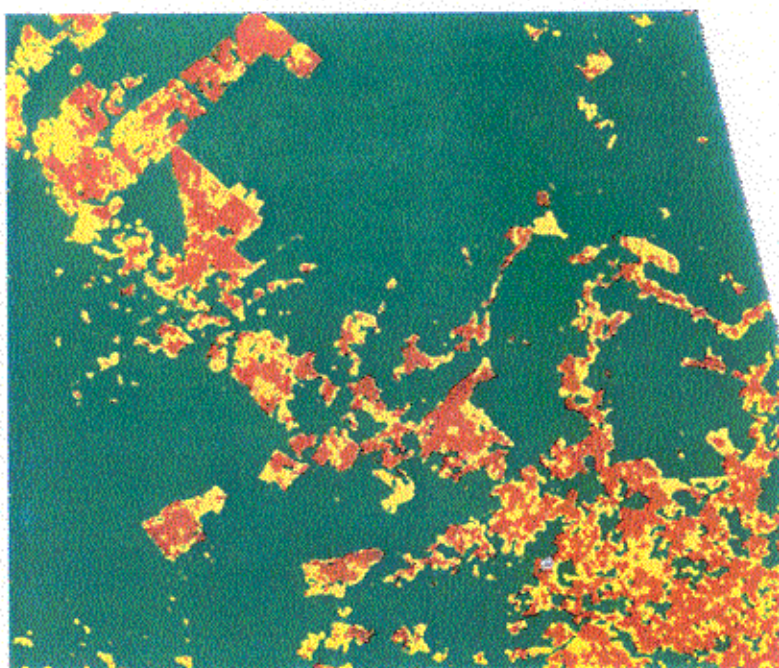
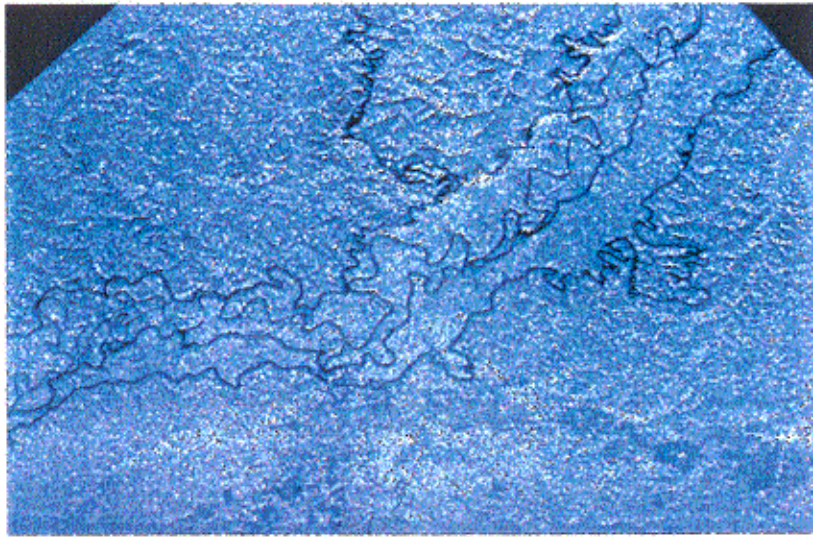
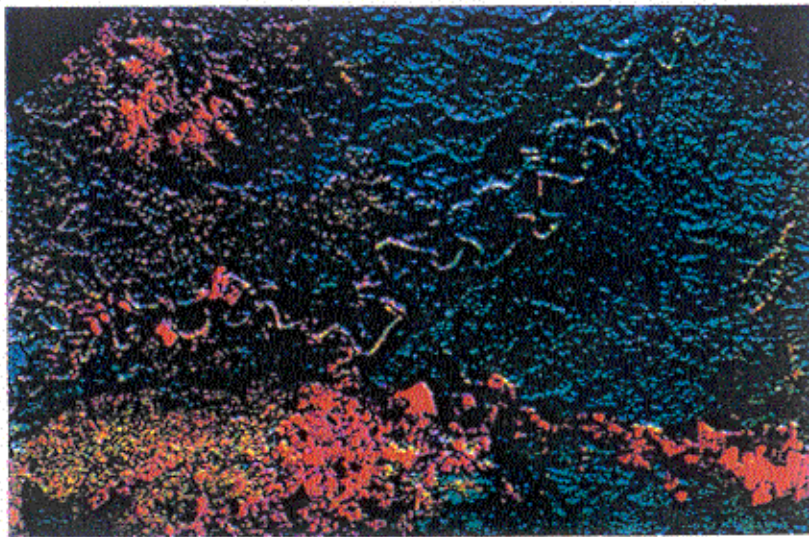


Fig.7.2: Classificação supervisionada, textura EBIS, usando cenas do ERS-1 SAR
GEC de 15.06.92 e 15.01.93

Legenda: verde: floresta primária, marron claro: rebrota e pastagens antigas
amarelo: desmatamento recente (pastagens novas)



a



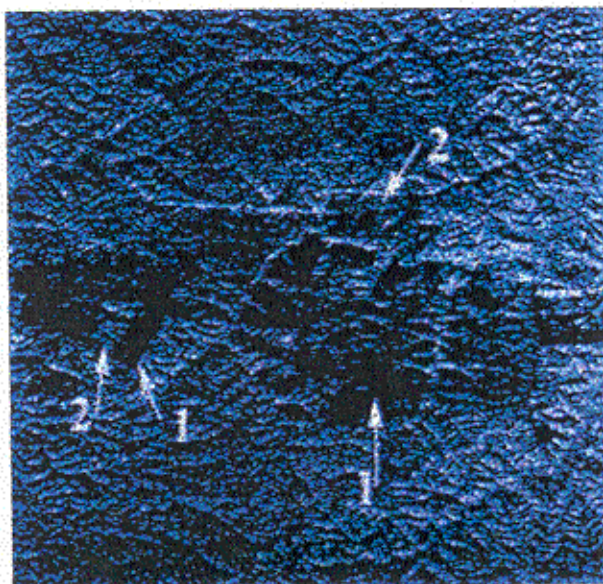
b

Fig.7.3 - Cena do SAR-580, modo faixa larga mostrando as principais feições do relevo na seção entre Rio Branco e Sena Madureira (Acre).

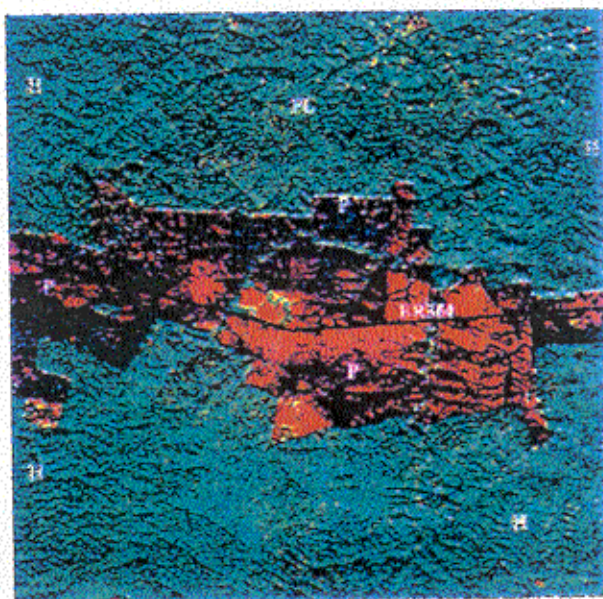
a - banda C-HH

b - composição colorida: banda C-HH/TM Landsat, canais 3,4,5; uso e cobertura do solo

classes: magenta - pastagens e rebrotas
 amarelo ocre - bambuzais
 verde escuro - floresta primária



a



b

Fig.7.5: Cenas do SAR 580

a - Cena SAR, banda C-HH, mostrando 1 = pasto "limpo", 2 = pasto "sujo", ao longo de seção da BR-364 (RioBranco-Sena Madureira).

b Composição colorida SAR/TM, mostrando pastagens (P) em diferentes estágios fenológicos e de rebrota da floresta. Tons amarelados indicam predomínio de bambuzais, colinas (H).



a

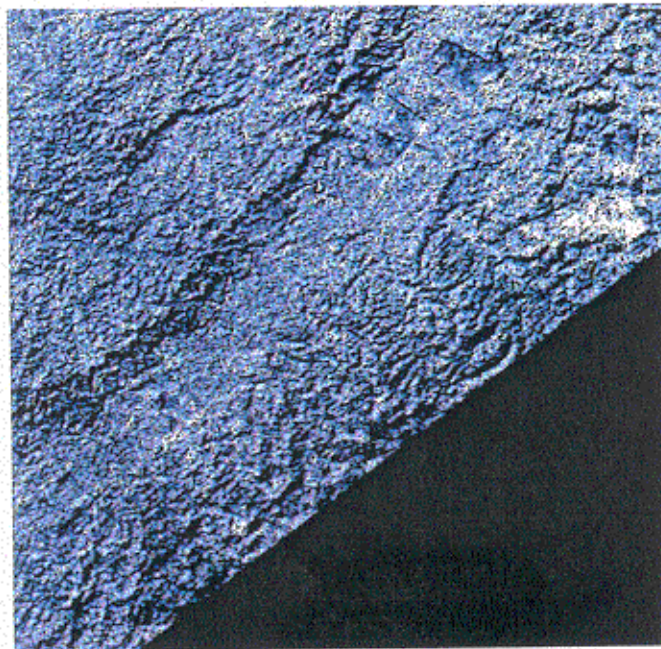


b

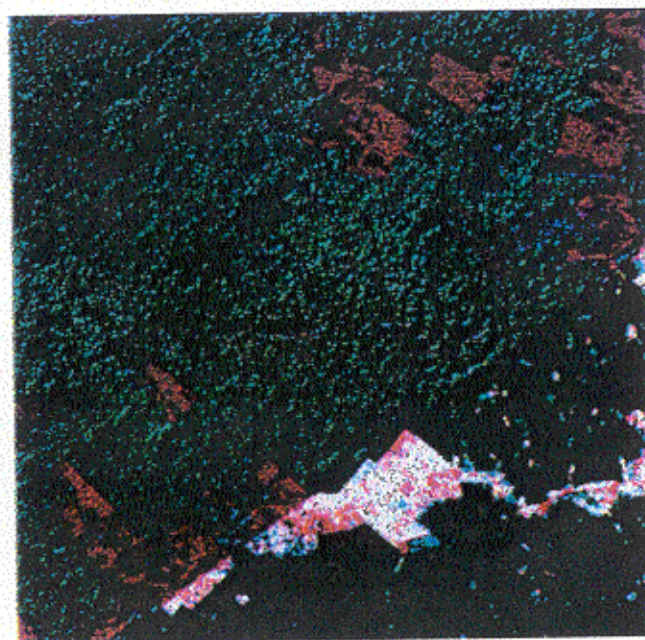
Fig. 7.4: Cenas do SAR 580

a - detalhe da Figura 7.3 a; detalhes das feições geomorfológicas da várzea do Rio Purús (meandros abandonados, lagos de várzea, etc).

b - detalhe da Figura 7.3 b; composição colorida SAR, banda C/TM-Landsat mostrando claramente que o Rio Purús apresenta intensa carga sólida.



a



b

Fig. 7.6 - Cenas do SAR 580

a - SAR faixa larga, seção entre Rio Branco e Xapurí; visão de conjunto das feições de relevo e de áreas desmatadas maiores.

b - composição colorida SAR/TM (em diagonal) da mesma seção mostrando detalhes de uso/cobertura do solo; formas geométricas em magenta: pastagens; pequenos pontos em magenta: culturas anuais; seção azul-escura próximo ao canto NE: plantação de cana de açúcar abandonada com intensa rebrota.

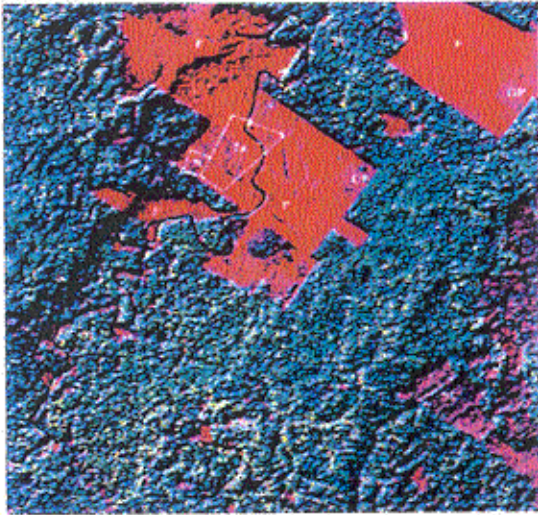
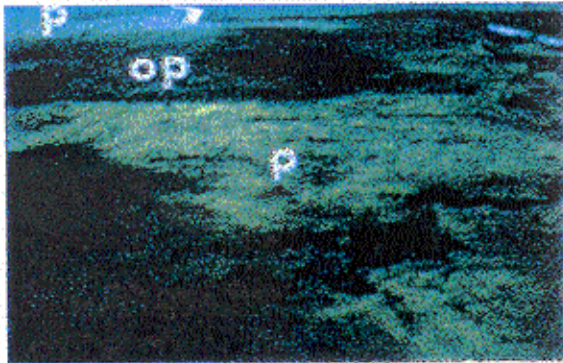


Figura 7.7 - Cenas do SAR 580

Detalhe da figura anterior, composição colorida SAR banda C /TM, bandas 3, 4 e 5.

Diferentes feições de pastagens (P) e de pastagens com rebrota (OP), tornando-se capoeiras.

Os encartes na figura à esquerda referem-se às duas fotos (35 mm) abaixo, sendo (P) pastagens do genero *brachiaria* e (OP) áreas de rebrota.



Em áreas de rebrota dominam freqüentemente *Cecropia* e palmeiras.

Foto inferior: típicos "colocação" de um seringueiro. Área desmatada (b) e em rebrota (R) usada para agricultura de subsistência. Estas pequenas seções desmatadas da floresta primária (PF) aparecem muito bem (pequenas manchas em magenta) na composição colorida acima.



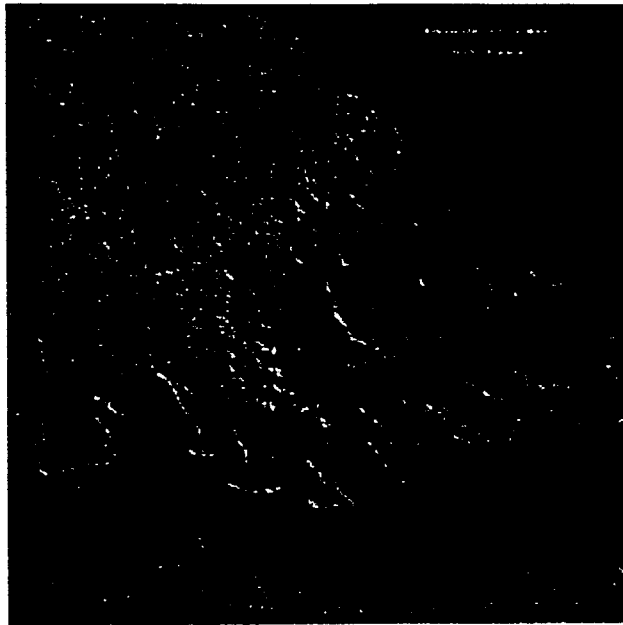


Fig. 7.8: Imagem simulada do RADARSAT, modo padrão; mesma área coberta pelas Figuras 7.2 e 7.3.

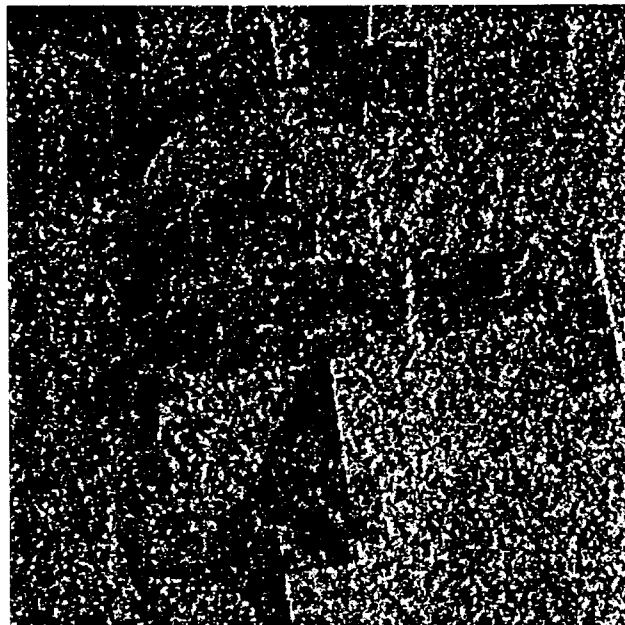


Fig. 7.9: Imagem simulada do RADARSAT, modo padrão, de seção ao longo da BR-364, mostrando áreas desmatadas para criação de gado.