



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-14786-PUD/185

## **INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE RADAR**

Sidnei João Siqueira Sant'Anna  
Luciano Vieira Dutra  
Corina da Costa Freitas  
Leonardo Sant'Anna Bins  
Alessandra Rodrigues Gomes  
José Cláudio Mura

INPE  
São José dos Campos  
2007

Publicado por:

**esta página é responsabilidade do SID**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

**Solicita-se intercâmbio  
We ask for exchange**

**Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.**



## **RESUMO**

O objetivo deste curso é apresentar conceitos básicos do processamento de imagens de radar de abertura sintética. O curso constará de parte teórica apresentada por meio de slides e contará com demonstrações práticas usando SPRING e/ou software livre. Os seguintes tópicos serão abordados: Sistemas de radares imageadores; Sistemas aerotransportados, incluindo SIVAM (RB99); Missões internacionais; Filtragem de imagens SAR; Extração de atributos específicos para imagens de radar; Classificação e segmentação de imagens SAR; Polarimetria de imagens SAR; Exemplos de aplicações das técnicas citadas; Interferometria de imagens SAR e construção de Modelos de Elevação.



## SUMÁRIO DO CURSO

### PARTE 1

- Estrutura do Curso
- Introdução ao Sensoriamento Remoto por SAR
- Algumas Aplicações

### PARTE 2

- Modelagem Estatística dos Dados de Radar

### PARTE 3

- Filtragem de Ruído *Speckle*

### PARTE 4

- Classificação dos Dados de Radar
- Segmentação dos Dados de Radar

### PARTE 5

- Uso do *Software Spring*

### PARTE 6

- Introdução à Polarimetria

### PARTE 7

- Classificador Estatístico

### PARTE 8

- Introdução à Interferometria





## CURSO 5

# Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

### Responsáveis:

Corina da Costa Freitas

José Claudio Mura

Leonardo Sant'Anna Bins

Luciano Vieira Dutra

Sidnei João Siqueira Sant'Anna

Alessandra Gomes (monitora)

Emails: {corina, leonardo, dutra, sidnei}@dpi.inpe.br



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar



## CURSO 5

### Programação / Sumário

#### 21 de abril (manhã)

Apresentação do Curso

Introdução ao Sensoriamento Remoto por Microondas

Modelagem estatística de imagens SAR

Filtragem de Imagens SAR

#### 21 de abril (tarde)

Classificação e segmentação de Imagens SAR

MultiSeg – Segmentador para Radar

*Exemplos usando o SPRING*

#### 22 de abril (manhã)

Polarimetria - Introdução

Classificação Polarimétrica

*Apresentação de Exemplos*

#### 22 de abril (tarde)

Interferometria e construção de Modelos de Elevação

Aplicação em Cartografia

Aplicação em Floresta - A missão Banda P

**Encerramento**



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

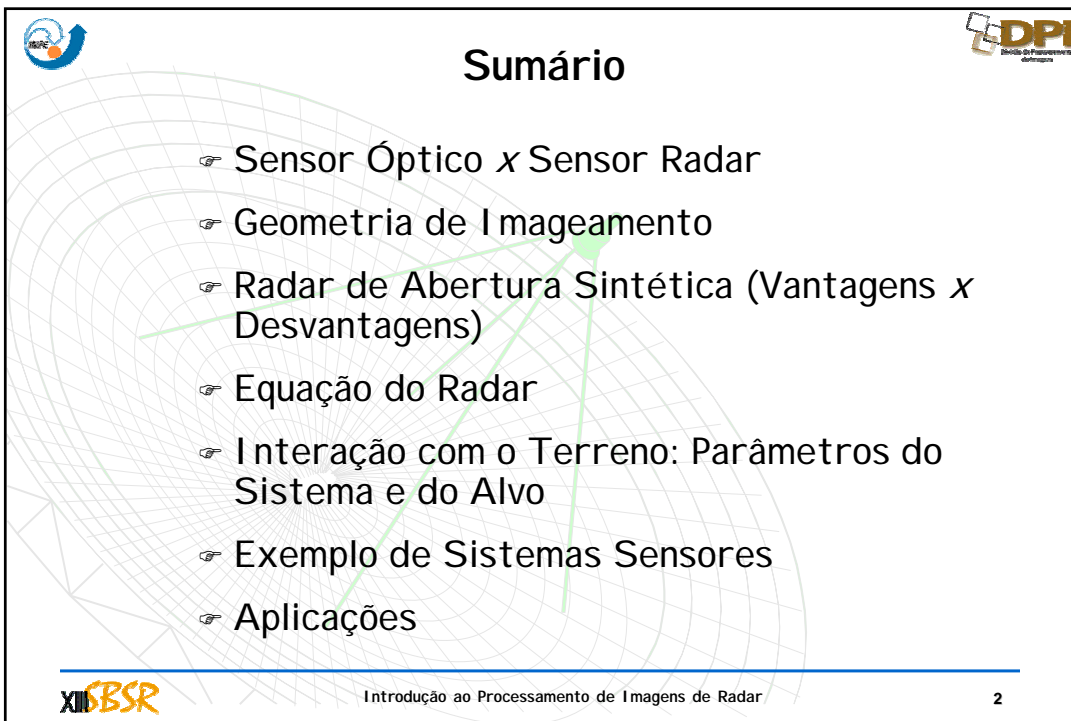




 

# Sensoriamento Remoto por Microondas

---

 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 1




## Sumário

- ☞ Sensor Óptico x Sensor Radar
- ☞ Geometria de Imageamento
- ☞ Radar de Abertura Sintética (Vantagens x Desvantagens)
- ☞ Equação do Radar
- ☞ Interação com o Terreno: Parâmetros do Sistema e do Alvo
- ☞ Exemplo de Sistemas Sensores
- ☞ Aplicações

---

 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 2



# Sensor Óptico



- Opera na faixa óptica
- Capta a radiância emitida
- Fonte externa de iluminação
- Operação diurna
- Dependência das condições climáticas
- Ruído Aditivo
- Longa experiência

$$Z = X + Y$$

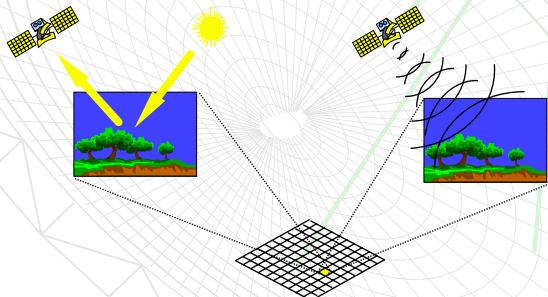
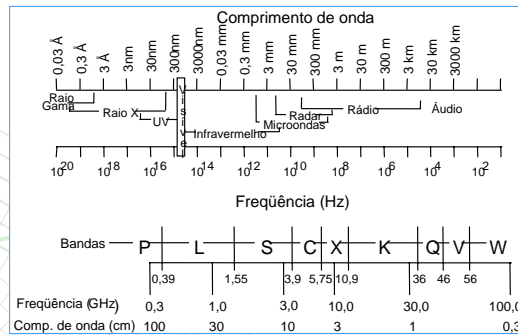
- Opera na faixa de microondas
- Emite e recebe pulso
- Sensor Ativo
- Operação diurna ou noturna
- Independência das condições climáticas
- Ruído Multiplicativo
- Inexperiência

$$Z = X.Y$$

# Sensor de Radar



# Sensor Óptico



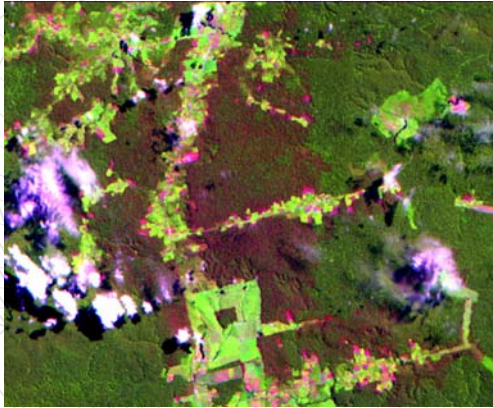
# Sensor de Radar





Imagem Óptica (TM/Landsat)  
Composição Colorida 5R-4G-3B

Imagem de Radar (JERS-1)  
Banda L - 1,275 GHz

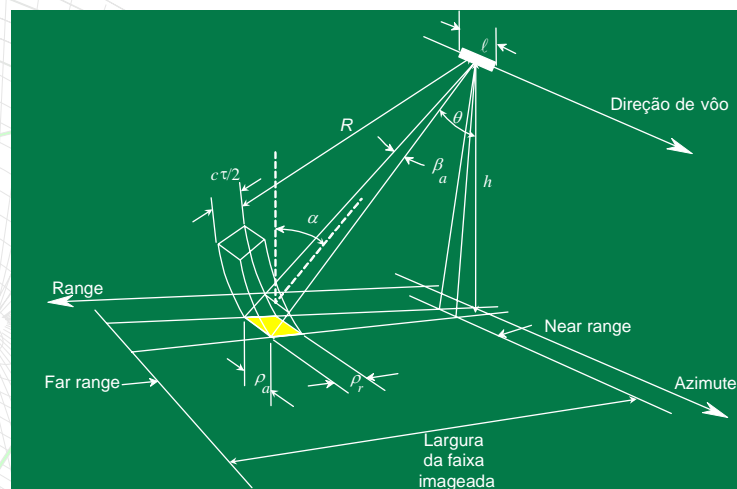


## Geometria de Imageamento

Radars de visada lateral:

- > RAR
- > SAR

Célula de Resolução





**Ângulo de Incidência**

O ângulo de incidência é definido como o ângulo entre a linha de visada do radar e a normal local

$\theta$  = Ângulo de Incidência  
 $\beta$  = Ângulo de Depressão

$\alpha$  = Inclinação do Terreno

Slant Range  
 Ground Range  
 Faixa Imageada (Swath Width)  
 Near Range  
 Far Range

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 7

**Ângulo de Incidência**

O ângulo de incidência aumenta com o aumento da distância

Em geral, a reflectividade dos alvos extensos diminuem com o aumento de  $\theta$

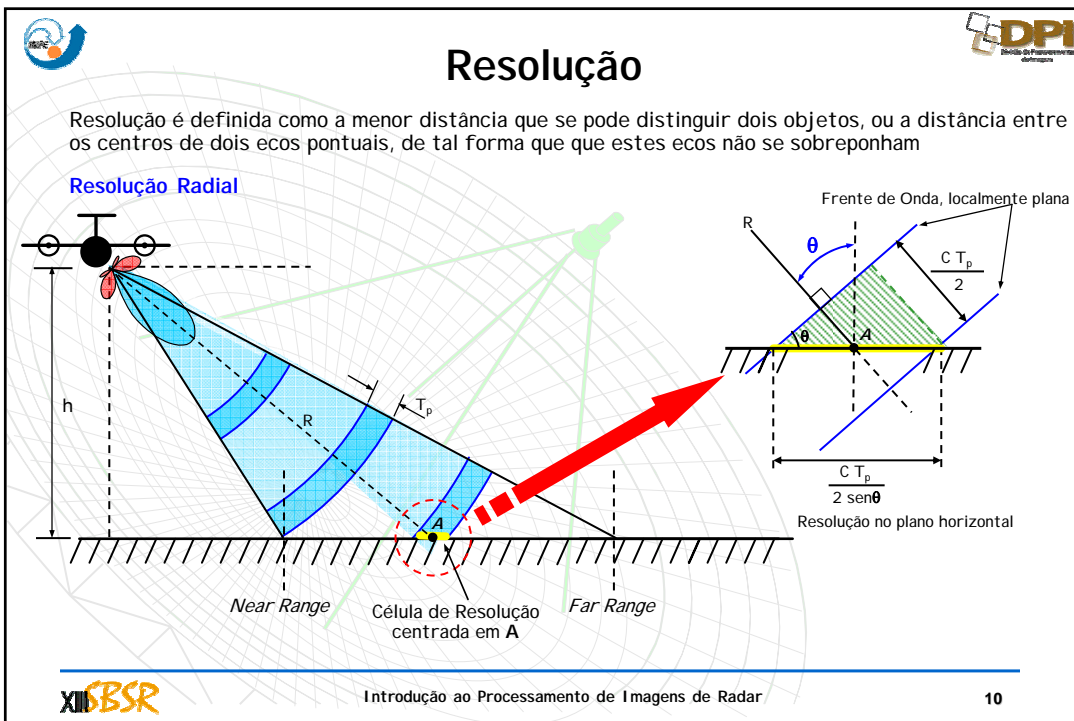
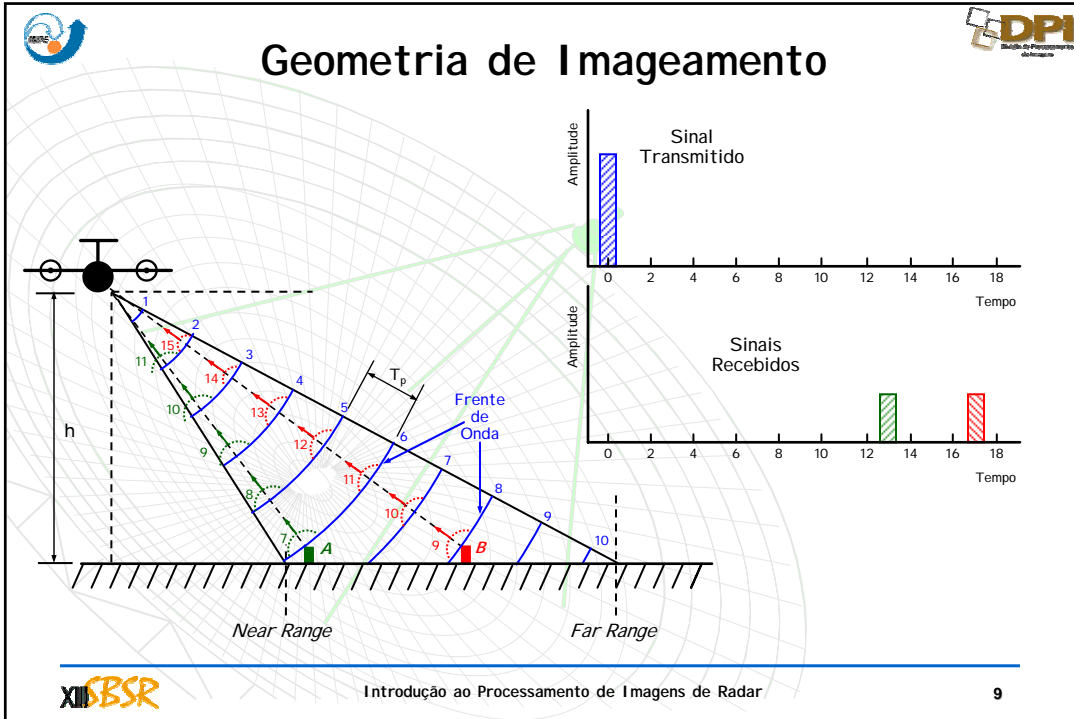
$\theta$  é um dos parâmetros de maior influência no *backscatter* ( $\sigma^0$ )


$\theta$  influencia fortemente na aparência dos objetos nas imagens, causando a inversão, o encurtamento e o sombreamento

O aumento de  $\theta$  implica num aumento do sombreamento


A influência de  $\theta$  é mais fortemente notada nas imagens formadas por sensores aerotransportados do que naquelas formadas por sensores orbitais

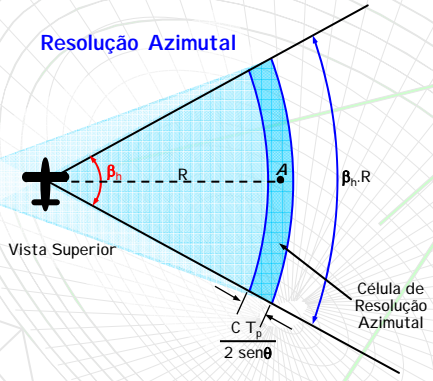
Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 8





# Resolução





**Resolução Azimutal**

Vista Superior

$\beta_n, R$

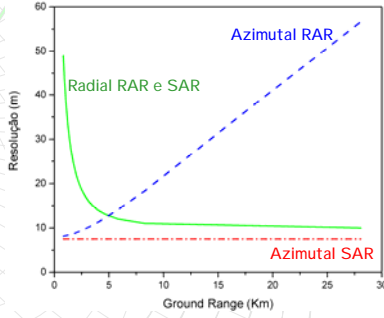
$\beta_n, R$

Célula de Resolução Azimutal

$\frac{C T_p}{2 \text{ sen}\theta}$

Tudo que estiver dentro da célula de resolução azimutal contribuirá para a formação do ponto A

Radar	RAR	SAR
Resolução		
Azimutal	$\beta_n R = \frac{\beta_n h}{\cos\theta} = \frac{\lambda h}{L \cos\theta}$	$\frac{L}{2}$
Radial	$\frac{C T_p}{2 \text{ sen}\theta}$	$\frac{C T_p}{2 \text{ sen}\theta}$



Resolução (m)

Ground Range (Km)


Radar na seguinte configuração:

$T_p = 0,066\mu\text{s}$

$\lambda = 3\text{cm}$


$h = 4\text{ Km}$

$L = 15\text{m}$




Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

11



# Radar de Abertura Sintética - SAR




## Vantagens

- Propriedades dielétricas
- Microtexturas
- Resolução espacial
- MNT
- Penetração
- Periodicidade

## Desvantagens

- Processamento sofisticado
- Interpretação visual
- Distorção geométrica
- Distorção radiométrica
- Dados e parâmetros biofísicos
- Ruído granular - *Speckle*



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

12

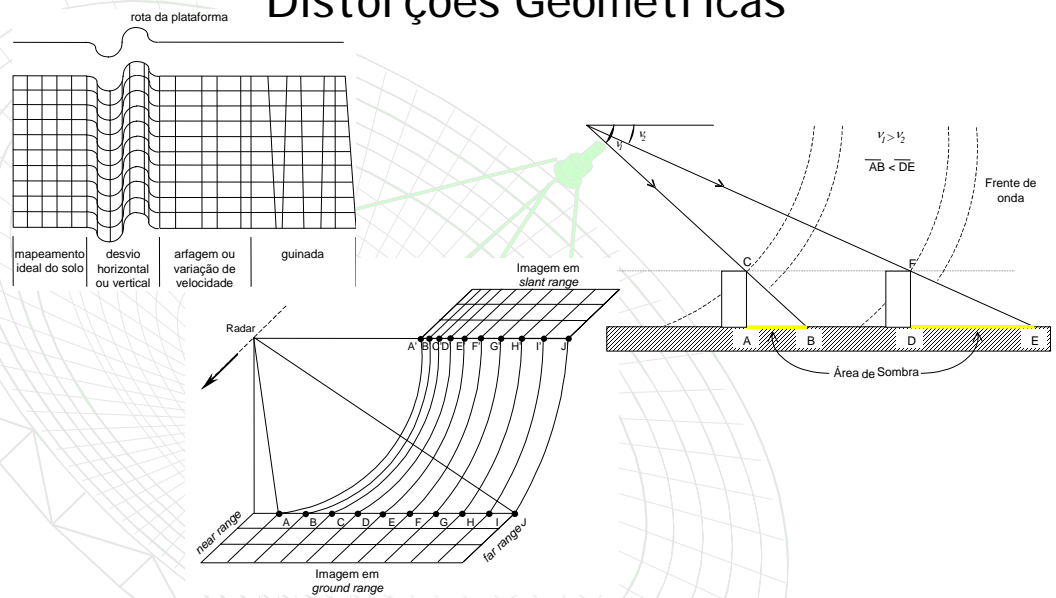


## Distorções Geométricas

- ↳ Variação de atitude da plataforma;
- ↳ Visada lateral x Visada no terreno;
  - ❖ Slant to ground range conversion
- ↳ Efeitos da visada lateral:
  - ❖ Sombra
  - ❖ Encurtamento



## Distorções Geométricas



**Distorções Geométricas**

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

**Distorções Geométricas**

**Encurtamento**

Qualquer alvo que possua uma rampa voltada para o radar apresentará o encurtamento (*Foreshortening*)

$\theta$ (°)	%
90	0,0
60	13,4
30	50,0
10	82,6
0	100,0

Percentagem de encurtamento em função do ângulo de incidência

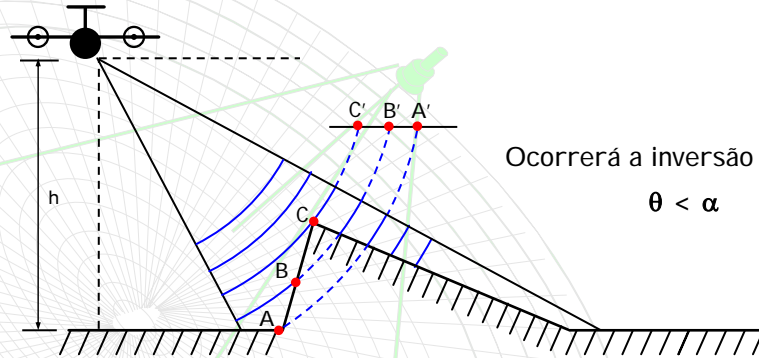
Introdução ao Processamento de Imagens de Radar





## Distorções Geométricas

### Inversão



Ocorrerá a inversão quando:

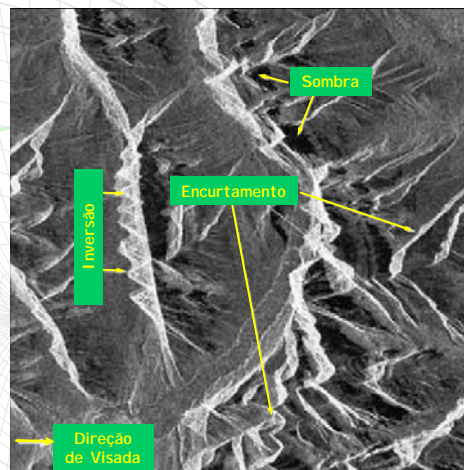
$$\theta < \alpha$$

A Inversão (*Layover*) é o caso extremo do encurtamento



## Distorções Geométricas

### Exemplos: Imagem do Radarsat



**Distorções radiométricas**

Near Range Far Range

(a) (b)

---



XII CBSR Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 19

**Correção da Radiometria**

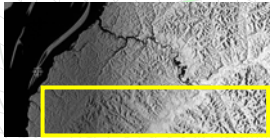
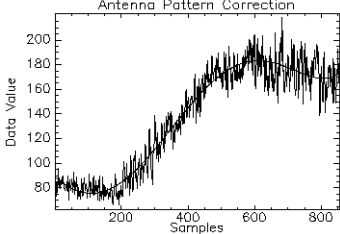
Imagem do SAR do SIVAM de Manaus Banda L

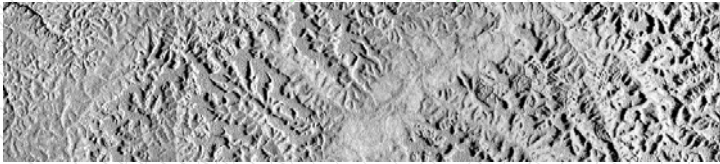
---

XII CBSR Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 20





## Correção da Radiometria





Realizado no  
ENVI

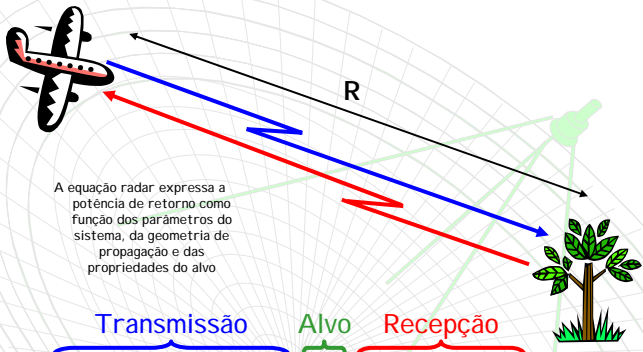


Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

21

## Equação do Radar



A equação radar expressa a potência de retorno como função dos parâmetros do sistema, da geometria de propagação e das propriedades do alvo

**Transmissão**

$$P_T \cdot G \cdot \frac{1}{4\pi R_t^2}$$

Potência Transmitida

**Alvo**


$$\cdot \sigma$$

Seção Transversal do Alvo

**Recepção**

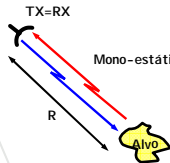
$$\cdot \frac{1}{4\pi R_r^2}$$

Área de Recepção da Antena




Bi-estático

No caso de radares mono-estáticos:  $G_R = G_T = G$   
 $R_R = R_t = R$



Mono-estático

$$P_R = \frac{P_T \cdot G \cdot \sigma \cdot A}{(4\pi)^2 \cdot R^4}$$



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

22





## Sumário

- ☞ Sensor Óptico x Sensor Radar
- ☞ Geometria de Imageamento
- ☞ Radar de Abertura Sintética (Vantagens x Desvantagens)
- ☞ Equação do Radar
- ☞ Interação com o Terreno: Parâmetros do Alvo e do Sistema.
  - ❖ Como as ondas se espalham ao atingir o terreno?
  - ❖ Qual é a influência dos parâmetros do sistema?
- ☞ Exemplo de Sistemas Sensores
- ☞ Aplicações



## Tipos de Interação com o Terreno

**Espalhamento = Componente Incoerente + Componente Coerente**

**Incoerente:** a fase do sinal de retorno é a soma das fase aleatórias dos difusores elementares que estão dispostos aleatoriamente na célula de resolução

- ☞ Retroespalhamento de superfícies eletricamente rugosas ou difusa
- ☞ Espalhamentos Superficial e Volumétrico
- ☞ Tanto pode reforçar o sinal quanto enfraquecê-lo
- ☞ Potência de Sinais =  $|amp_1|^2 + |amp_2|^2 + \dots + |amp_n|^2$

**Coerente:** a fase relativa de cada difusor elementar é altamente correlacionada

- ☞ Difusores regularmente espaçados em range → Espalhamento Bragg
- ☞ Difusores dispostos no mesmo range (alinhados em azimute) → Efeitos Cardinal
- ☞ Reforça o sinal de retorno
- ☞ Potência de Sinais =  $|amp_1 + amp_2 + \dots + amp_n|^2$

**Interação com o Terreno**

**Tipos de Espalhamento Superficial**

A interação energia matéria acontece na superfície do alvo

Reflexão Especular
Reflexão Mista (Especular + Difusa)
Reflexão Difusa

Reflexão de Canto (Corner Reflector)

XII CBSR
Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
25

**Interação com o Terreno**


**Espalhamento Incoerente: Espalhamento Superficial**

*Corner Reflectors Artificiais (Metais)*


Diedro
Triedro

Diedro = superfície formada por 2 planos ortogonais
Triedro = superfície formada por 3 planos mutuamente ortogonais

XII CBSR
Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
26

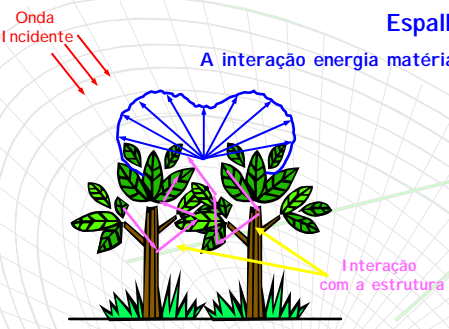


# Interação com o Terreno



## Espalhamento Volumétrico

A interação energia matéria acontece na superfície e no interior do alvo

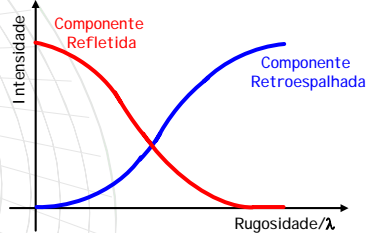



Espalhamento Volumétrico

Espalhamento Volumétrico {
 

- Intermediário: culturas e vegetação de pequeno porte
- Complexo: vegetação de grande porte


Espalhamento	Retorno ao radar (backscattering)
<b>Superficial</b>	
Reflexão Especular	Muito Baixo
Reflexão Mista	Baixo
Reflexão Difusa	Alto
Corner Reflection	Muito Alto
<b>Volumétrico</b>	Médio






Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

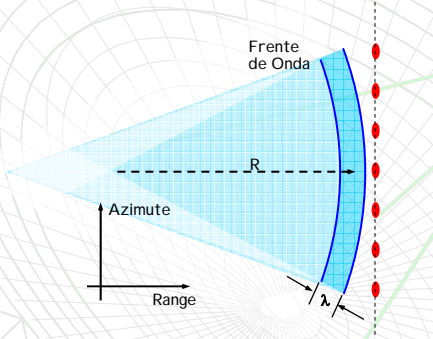
27




# Interação com o Terreno




## Espalhamento Coerente: Efeito Cardinal



Difusores elementares dispostos à mesma distância do radar (alinhados em azimute)





Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

28

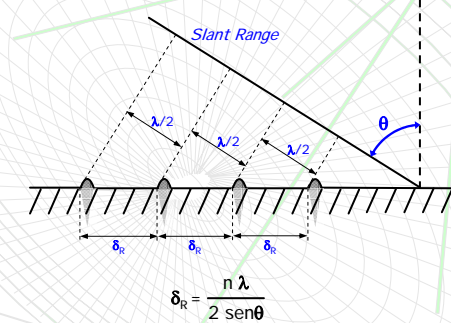


# Interação com o Terreno



## Espalhamento Coerente: Espalhamento Bragg

- Se os difusores elementares estiverem periodicamente espaçados ( $\delta_R$ ) na direção de range e alinhados com as frentes de onda, então a reflexão de cada difusor irá contribuir coerentemente com a reflexão dos outros espalhadores



- O Espalhamento Bragg é predominante no oceano



# Interação com o Terreno



- Para uma imagem adquirida na banda C, polarização HH e com ângulo de incidência de 45°

Alvo	Superfície	Espalhamento	Retroespalhamento
Pasto Limpo	Rugosa	Intermediário	Baixo
Pasto Sujo	Rugosa	Intermediário	Baixo → Médio
Floresta Primária	Rugosa	Complexo	Médio
Paliteiros Emergentes	Rugosa	Diedro	Alto
Cerrado	Rugosa	Interm. Complexo	Médio





## Os Alvos e Configuração do Sistema



Parâmetros que influenciam o retroespalhamento (*backscattering*)

- ☞ Freqüência
  - ☞ Polarização
  - ☞ Ângulo de Incidência
  - ☞ Resolução
  - ☞ Rugosidade
  - ☞ Constante Dielétrica
  - ☞ Geometria
- Parâmetros do sistema
- Parâmetros do alvo



## Parâmetros do Sistema



Parâmetros referentes ao sistema radar que influenciam o retroespalhamento (*backscattering*)

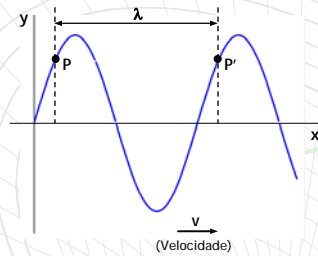
- ☞ Freqüência
- ☞ Polarização
- ☞ Ângulo de Incidência
- ☞ Resolução





# Frequência

Onda Harmônica = Perfil Senoidal



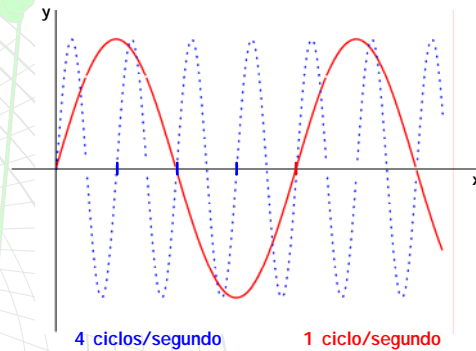
**Frequência** é o número de períodos ou ciclos completos por segundo (1 ciclo por segundo = 1 Hz)

**Comprimento de Onda** é a distância percorrida durante 1 ciclo da onda

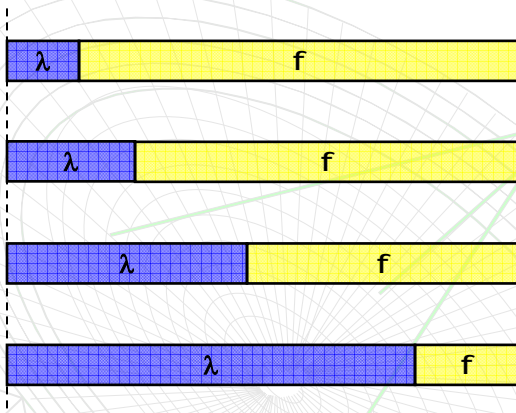
$$v = \frac{s}{t} \quad f = \frac{1}{T}$$

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$



# Frequência



X	$f_1 = 8,0 \text{ GHz}$	$\lambda_1 = 3,75 \text{ cm}$	$\lambda = 3,0 \text{ cm}$
	$f_2 = 12,5 \text{ GHz}$	$\lambda_2 = 2,4 \text{ cm}$	
C	$f_1 = 4,0 \text{ GHz}$	$\lambda_1 = 7,5 \text{ cm}$	$\lambda = 5,6 \text{ cm}$
	$f_2 = 8,0 \text{ GHz}$	$\lambda_2 = 3,75 \text{ cm}$	
L	$f_1 = 1,0 \text{ GHz}$	$\lambda_1 = 30 \text{ cm}$	$\lambda = 23 \text{ cm}$
	$f_2 = 2,0 \text{ GHz}$	$\lambda_2 = 15 \text{ cm}$	
P	$f_1 = 0,3 \text{ GHz}$	$\lambda_1 = 100 \text{ cm}$	$\lambda = 75 \text{ cm}$
	$f_2 = 1,0 \text{ GHz}$	$\lambda_2 = 30 \text{ cm}$	

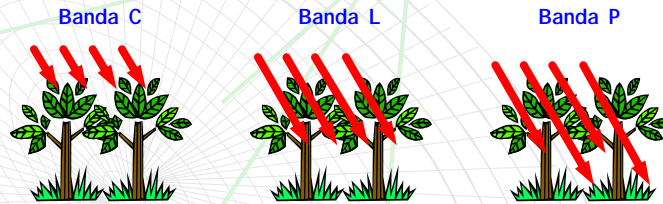
Quanto maior a frequência maior é o nível de potência requerida  
Velocidade da luz: 300.000 KM/s



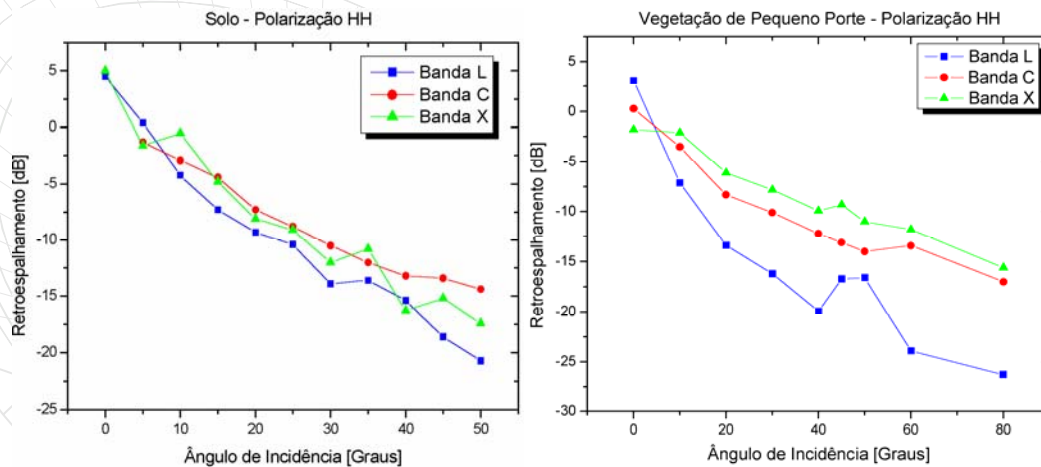
## Freqüência e Capacidade de Penetração



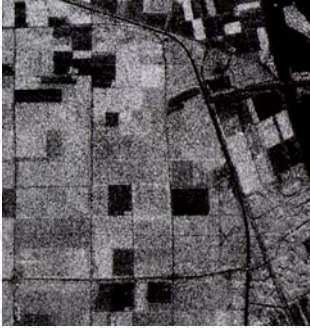
- O comprimento de onda ( $\lambda$ ) deve ser comparável com tamanho das feições do alvo que se deseja discriminar
- Quanto maior o comprimento de onda ( $\lambda$ ) maior será a penetração no material (alvo)




## Freqüência, Incidência e Retorno




**Freqüência**



C-HH



L-HH




P-HH

Campo Agrícola na Holanda  
AirSAR - NASA/JPL


---

XII CBSR
Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
37


**Exemplo de Dados Óptico e de Radar (em diferentes freqüências)**



JERS-1  
Banda L



TM-543  
1996





RADARSAT  
Banda C

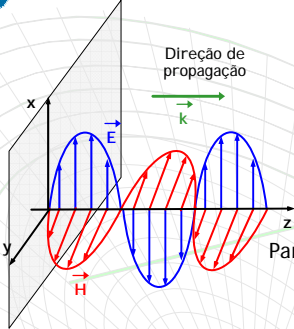
---

XII CBSR
Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
38



## Polarização



Direção de propagação  
 $\vec{k}$

A radiação eletromagnética que se propaga possui 3 campos vectoriais a ela associados

- Campo Elétrico (E)
- Campo Magnético (H)
- Vetor de Propagação ( $k$ )


Para ondas planas e uniformes estes 3 vetores são mutuamente ortogonais

- Plana: superfícies equifásicas constituem uma família de plano paralelos
- Uniforme: amplitude do campo elétrico é constante

A **polarização** de uma onda eletromagnética, em geral, é definida pela figura geométrica que o vetor campo elétrico descreve no espaço



Figura Geométrica =

- Elipse → Polarização Elíptica
- Círculo → Polarização Circular
- Linha → Polarização Linear



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

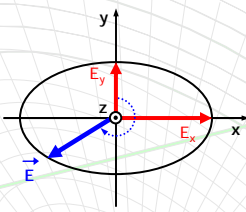
39

## Polarização

As polarizações **elíptica** e **circular** podem ser para a **direita** ou para a **esquerda**

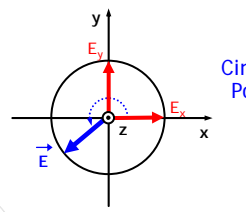
Elípticamente Polarizada à Esquerda



Observador olhando a onda se afastando

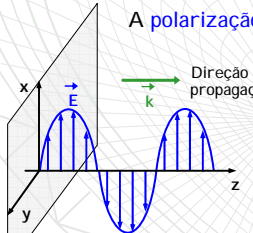
Onda se propagando na direção do eixo z (para fora)

Circularmente Polarizada à Direita

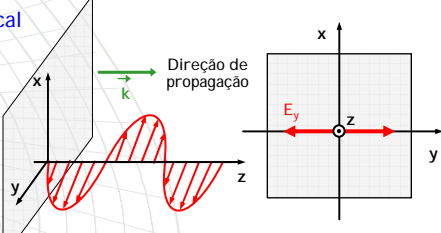



A polarização linear pode ser **horizontal** ou **vertical**

Polarização Vertical



Polarização Horizontal





Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

40



## Polarização

Em geral, os radares imageadores, em operação, operam em polarização linear

Os sistemas que utilizam polarização linear podem ser:

- ⇒ Co-Polarizados (*Like-Polarized*): HH e VV  transmitem e recebem na mesma polarização
- ⇒ Polarização Cruzada (*Cross-Polarized*): HV e VH  transmitem e recebem em diferente polarização

Normalmente, o sinal de retorno de alvos que possuam estruturas predominantemente verticais será mais forte (maior  $\sigma^0$ ) na polarização VV que na polarização HH e vice versa (ângulo de Brewster)

A quantidade de informação existente na diferença de fase entre as polarizações HH e VV é considerável

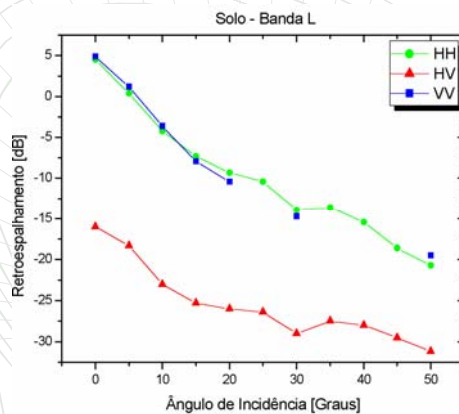
As polarizações cruzadas (HV e VH) são mais ruidosas que as co-polarizações (HH e VV)

As polarizações HH e VV estão mais relacionadas com a rugosidade da superfície (espalhamento superficial)

As polarizações cruzadas (HV e VH) estão mais relacionadas com o espalhamento volumétrico

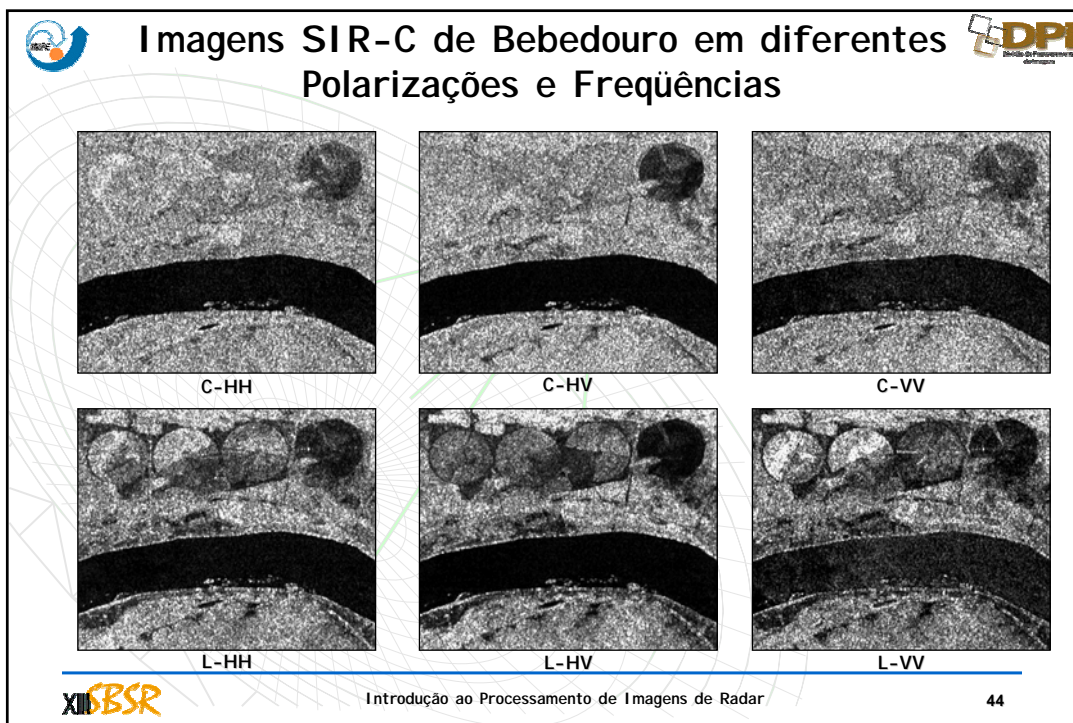
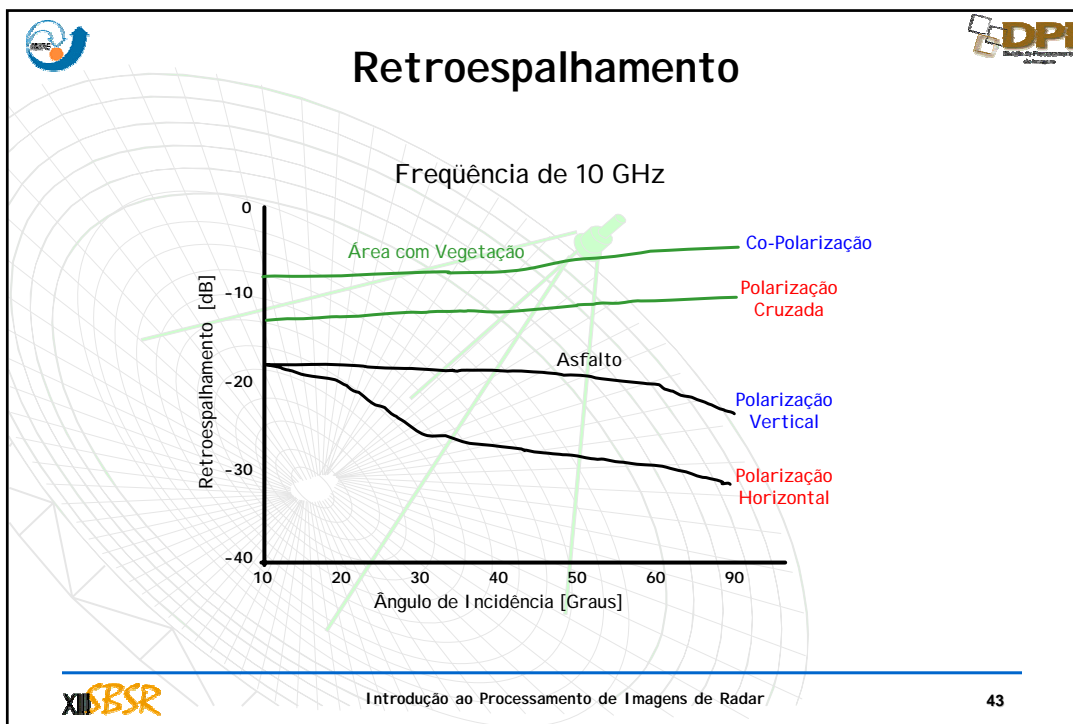


## Polarização



Geralmente, as co-polarizações (HH e VV) possuem maior retorno que as polarizações cruzadas (HV e VH)

Áreas sem vegetação aparecerão mais escura (menor  $\sigma^0$ ) nas polarizações cruzadas (HV e VH), indicando um domínio do espalhamento superficial





The slide displays radar image processing results. On the left, four polarimetric channels are shown in a 2x2 grid: XV (top-left), CH (top-right), LH (bottom-left), and a combination of XV, CH, and LH (bottom-right). On the right, a larger color-coded backscatter image shows a rural landscape with fields and roads. The slide includes logos for INPE and DPI (Divisão de Processamento de Imagens) at the top, and the XII FBSR logo at the bottom left. The text 'Introdução ao Processamento de Imagens de Radar' is centered at the bottom, and the number '45' is at the bottom right.



## Parâmetros do Alvo

Parâmetros referentes ao alvo imageado que influenciam o retroespalhamento (*backscattering*)

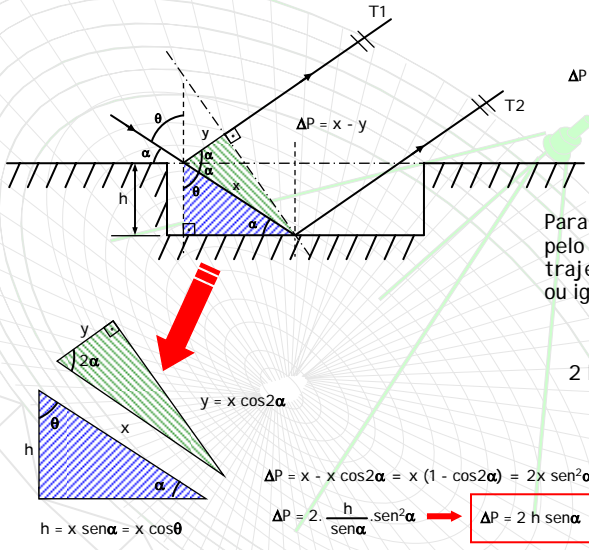
- ☞ Rugosidade
- ☞ Constante Dielétrica\*
- ☞ Geometria\*

\* Também é conjuntamente dependente dos parâmetros do sistema

The slide features a background radar grid pattern. It includes logos for INPE and DPI at the top, and the XII FBSR logo at the bottom left. The text 'Introdução ao Processamento de Imagens de Radar' is centered at the bottom, and the number '46' is at the bottom right.

## Rugosidade



$\Delta P = x - y$

$y = x \cos 2\alpha$

$\Delta P = x - x \cos 2\alpha = x(1 - \cos 2\alpha) = 2x \sin^2 \alpha$

$\Delta P = 2 \cdot \frac{h}{\sin \alpha} \cdot \sin^2 \alpha \rightarrow \Delta P = 2 h \sin \alpha$


$h = x \sin \alpha = x \cos \theta$

**Critério de Rayleigh**

$\Delta P =$  Diferença entre 2 trajetos de raios refletidos



Para uma superfície ser considerada **Rugosa** pelo **Critério de Rayleigh** a diferença entre 2 trajetos de raios refletidos deve ser maior ou igual a  $\lambda/4$ , portanto

$2 h \sin \alpha \geq \lambda/4 \rightarrow h \geq \frac{\lambda}{8 \sin \alpha}$



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

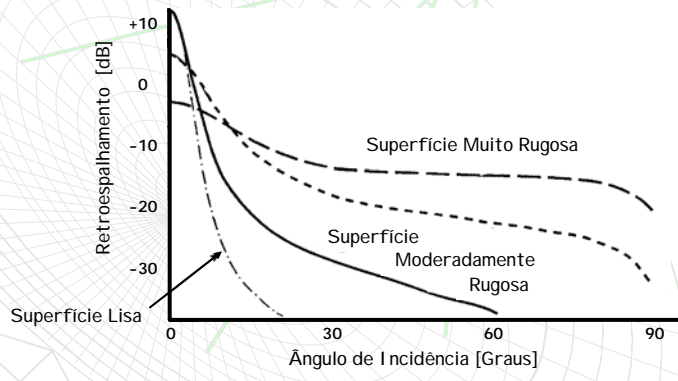
47





## Rugosidade

Uma superfície pode ser considerada **lisa** (Reflexão Especular) para grandes  $\lambda$  e **rugosa** (Reflexão Difusa) para pequenos  $\lambda$

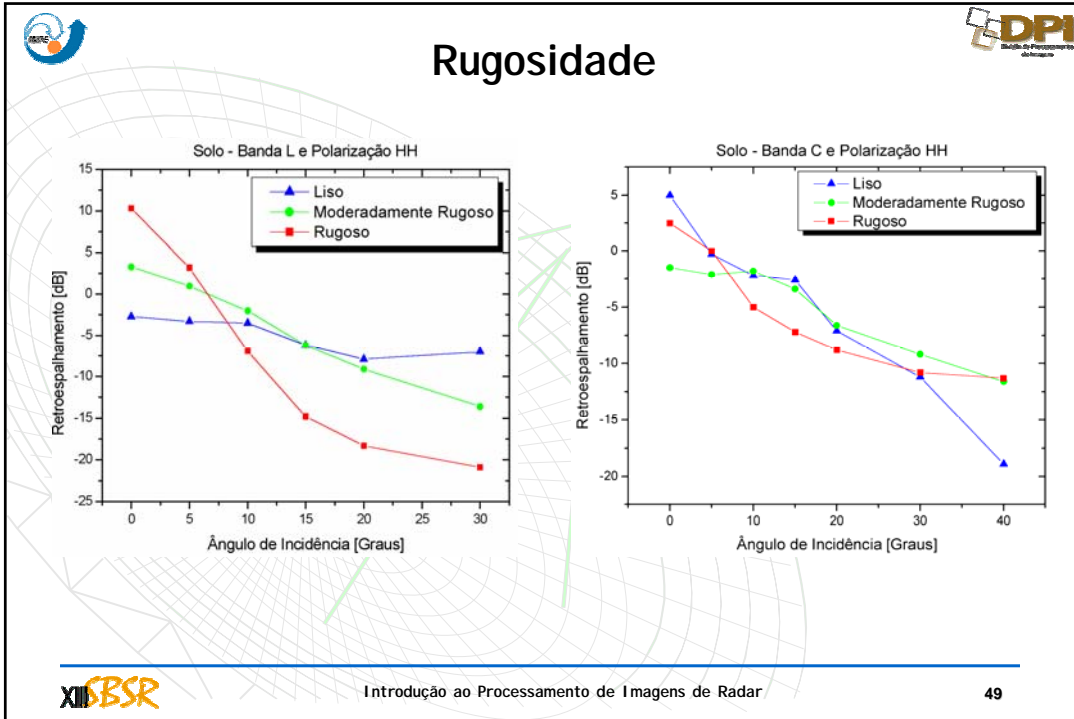
Para grandes ângulos de incidência uma superfície que normalmente é considerada **rugosa** pode se tornar **lisa**





Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

48



**Constante Dielétrica**

**Constante Dielétrica:** é o parâmetro que descreve as propriedades elétricas de um meio e juntamente com o ângulo de incidência determinará a quantidade de energia refletida, transmitida e/ou absorvida por um meio material

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad \text{Constante Dielétrica Relativa (Complexa)}$$

$\epsilon_c$  = constante dielétrica do meio  
 $\epsilon_0$  = constante dielétrica do espaço livre  
 $\epsilon'$  = parte real  
 $\epsilon''$  = parte imaginária

Normalizada com relação a  $\epsilon_0$

$\epsilon'$ , na prática, governa a relação entre as energia transmitida e refletida  
 $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  governam a energia absorvida  
 $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  dependerão das características do meio

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 50



## Constante Dielétrica

O espaço livre é considerado um meio sem perdas, ou seja, um meio com 100% de transmissão e nenhuma reflexão ou absorção

Para meios diferentes do espaço livre  $\epsilon' > 1$  e  $\epsilon'' > 0$

O  $\epsilon_r$  de meios naturais (solo, vegetação) é fortemente influenciado pelo conteúdo hídrico

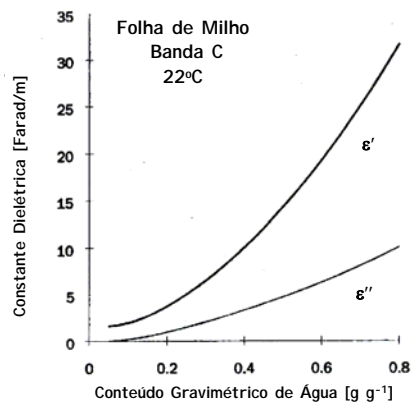
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} = \epsilon' - j\epsilon''$$

O conteúdo hídrico de um meio é **inversamente proporcional** a penetração da onda eletromagnética

Quanto **maior** for conteúdo hídrico **maior** será a constante dielétrica do meio e **maior** será a sua refletividade (potencialmente alto retorno)

Quanto **menor** for conteúdo hídrico **menor** será a constante dielétrica do meio e **menor** será a sua refletividade (potencialmente baixo retorno)

A constante dielétrica da água está em torno de 80 e uma das mais elevadas



## Constante Dielétrica

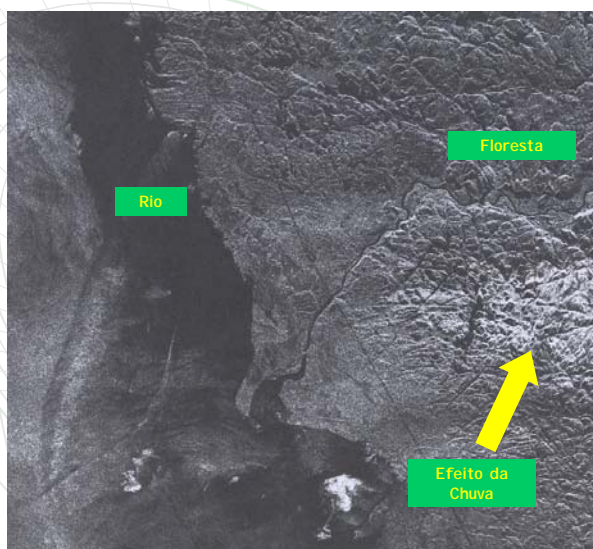


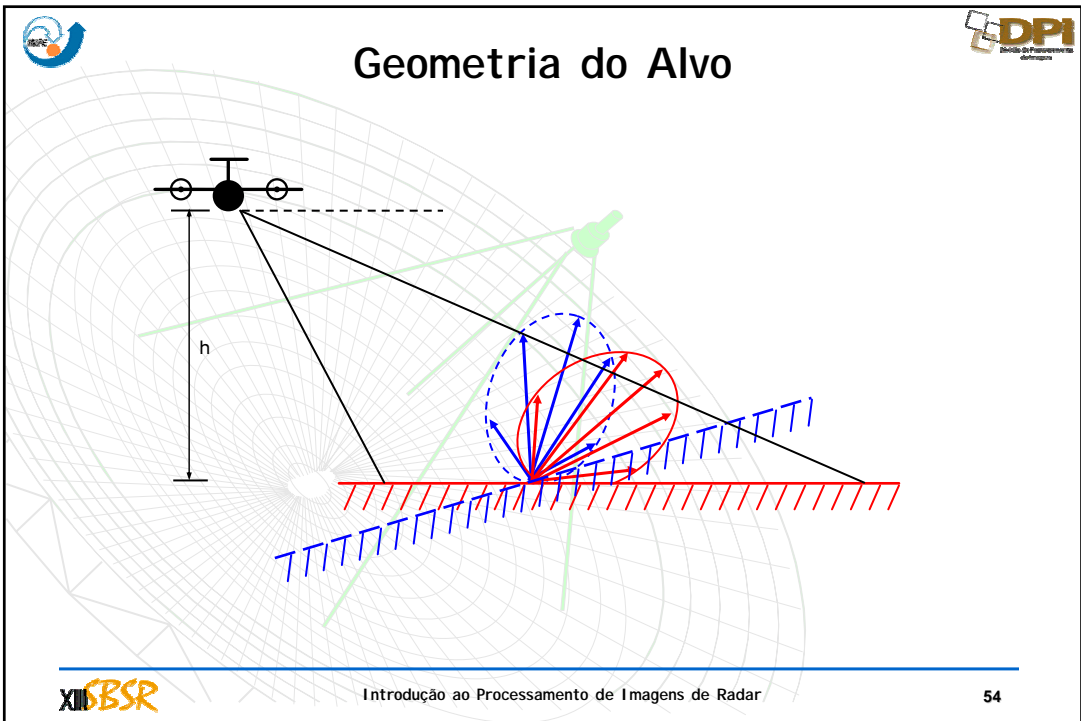
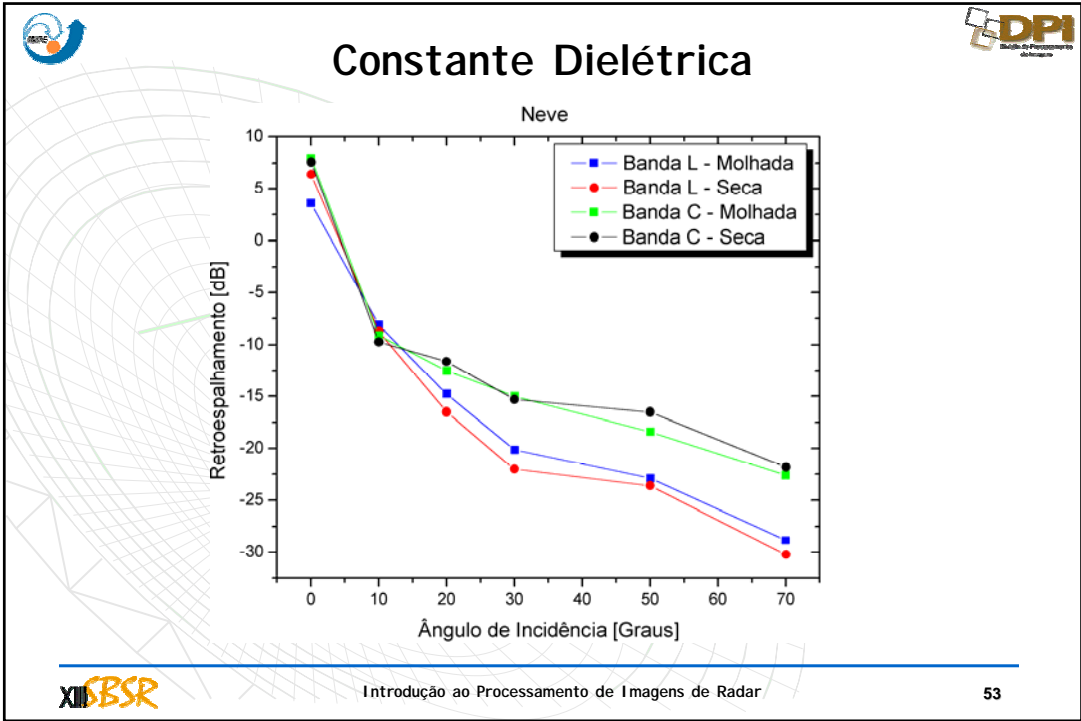
Imagem do ERS-1  
SIVAM

Rio St. Lawrence  
(Canadá)

Banda C

Efeito da Umidade na  
Reflectividade da Floresta









# Sistemas Sensores



## Orbitais Antigos

	ERS	JERS-1	Radarsat
Pais	Europa	Japão	Canadá
Frequência (GHz)	5,25 (C)	1,275 (L)	5,3 (C)
Polarização	VV	HH	HH
Ângulo de Incidência (°)	23	39	10-60
Altura de Voo (Km)	785	568	798
Largura de Faixa (Km)	100	75	Variável
Antena (m)	10	12	15
Resolução RG (m)	26	18	9-100
AZ	28	18	10-100

## Aertransportados Venerandos

	AirSAR	C/X SAR	E-SAR
Pais	EUA	Canadá	Alemanha
Frequência (GHz)	5,3 1,25 0,44	9,3 5,3	9,6 5,3 1,3
	C L P	X C	X C L
Polarização	Full	Full	HH e VV
Ângulo de Incidência (°)	20-60	0-85	15-60
Altura de Voo (Km)	8	6	3,5
Largura de Faixa (Km)	7-13	18-63	3
Antena (m)	1,3 1,6 1,8	-1,2	0,15 0,24 0,85
Resolução RG (m)	7,5	6-20	2
AZ	2	1-10	2



# Sistemas Sensores Recentes



## ASAR - Advanced Synthetic Aperture Radar

- ❖ ENVI SAT (lançado em 2002) - ESA
- ❖ Continuação do ERS-1/2
- ❖ Banda C (5,331 GHz)
- ❖ Dual Polarization
- ❖ Ângulo de Incidência: 15°-45°
- ❖ Cinco Modos de Operação:
  - ❖ Alternating Polarization - 30m, HH/VV ou HH/HV ou VV/VH, 100km
  - ❖ Wave - 30m, HH ou VV, 100-200km
  - ❖ Global Monitoring - 1000m, HH ou VV, 405km
  - ❖ Image Wide Swath - 150m, HH ou VV, 405km
  - ❖ Image Narrow Swath - 30m, HH ou VV, 100km

## RADARSAT-2

[www.radarsat2.info](http://www.radarsat2.info)

- ❖ Continuação do RADARSAT-1
- ❖ Banda C
- ❖ Modos de Operação:
  - ❖ Radarsat-1
  - ❖ Multi-look Fine - 10m, HH ou VV ou HV ou VH, 50km, 30°-50°
  - ❖ Ultra Fine - 3m, HH ou VV ou HV ou VH, 20km, 30°-40°
  - ❖ Standard Quad Pol. - 25m, Full Pol., 25km, 20°-41°
  - ❖ Fine Quad Pol. - 10m, Full Pol., 25km, 30°-41°





## Sistemas Sensores Novos e Previstos

### PALSAR – Phased Array L-Band Synthetic Aperture Radar

- ❖ SAR Orbital (ALOS – lançamento 2006)
- ❖ Sol-Síncrono a 700km
- ❖ Cooperação JAXA (NASDA)-JAROS (*Japan Resources Observation System Organization*)
- ❖ Requisitos Preliminares:
  - ❖ Banda – L
  - ❖ Modos – *Fine Resolution (FR)* ou *ScanSAR (SS)*
    - ❖ Ou *POLarimétrico*
  - ❖ Polarização – HH ou VV (*FR* e *SS*), HH/HV ou VV/VH (*FR*)
  - ❖ Resolução – 10m ou 20m e 100m (*SS*)
    - ❖ 24 a 89m (*POL*)
  - ❖ Faixa Imageada – 70km (*FR*) e 250-360km (*SS*)
  - ❖ Ângulo de Incidência – 18° a 48°

### MAPSAR – Multi-Application Purpose SAR

- ❖ SAR Orbital
- ❖ Aplicações Geoambientais
- ❖ Cooperação INPE-DLR
- ❖ Requisitos Preliminares:
  - ❖ Bandas – L
  - ❖ Polarimétrico
  - ❖ Resolução – 3m, 10m ou 30m
  - ❖ Faixa Imageada – 30Km e 300Km
  - ❖ Ângulo de Incidência – 8° a 60°



## Aplicações com Imagens de Radar

### Geologia

- ❖ Exploração mineral

### Floresta

- ❖ Estimação de biomassa área
- ❖ Mapeamento dos diferentes tipos de floresta

### Hidrologia

- ❖ Estudo/Mapeamento de áreas alagadas

### Oceanografia

- ❖ Monitoramento de embarcações
- ❖ Identificação de culturas aquáticas

### Mapeamento Urbano

### Agricultura

- ❖ Identificação e delineamento de culturas
- ❖ Estimação da umidade do solo



### Cartografia

- ❖ Mapeamento topográfico
- ❖ Interferometria

### Desastres


- ❖ Identificação de manchas de óleo








# Modelagem Estatística de Imagens SAR

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

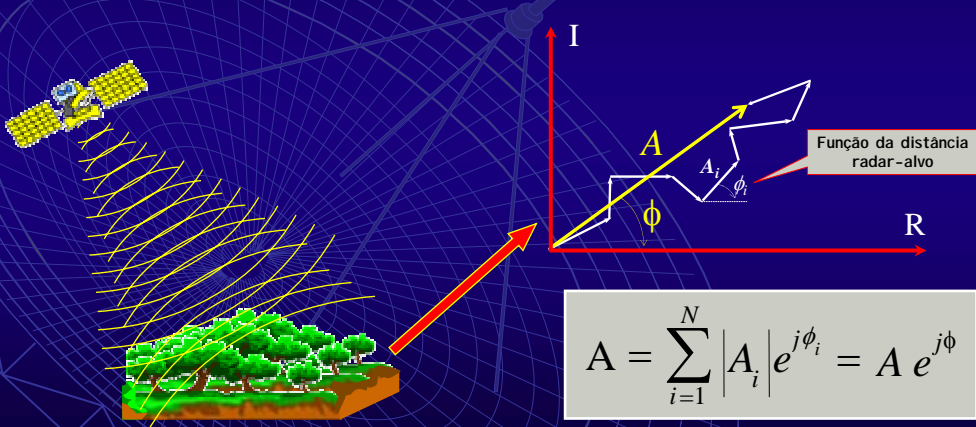


1

## Speckle em imagens de radar

- ▣ A área imageada possui muitos espalhadores
- ▣ O retorno é uma soma vetorial dos espalhadores



$$A = \sum_{i=1}^N |A_i| e^{j\phi_i} = A e^{j\phi}$$

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

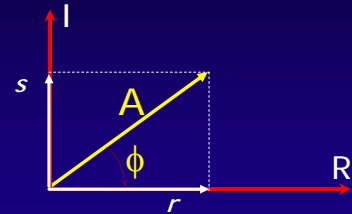
2



## Propriedades do *Speckle*

Decompondo-se o *speckle* complexo em:

$$\begin{aligned} r &= A \cos \phi \\ s &= A \sin \phi \end{aligned}$$



Supondo-se que:

- ♦  $A_i$  e  $\phi_i$  são independentes entre si e das amplitudes e fases de outros espalhadores;
- ♦  $\phi_i$  é uniformemente distribuída em  $[0, 2\pi]$ ;
- ♦ o número de espalhadores é grande;
- ♦ nenhum espalhador domina os demais.

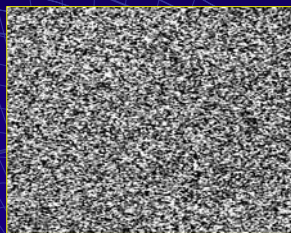
Pelo Teorema Central do Limite,  $r$  e  $s$  são normalmente distribuídos, com médias zero e mesma variância.

- ♦ A Amplitude  $A = (r^2 + s^2)^{1/2} \Rightarrow$  distribuição Rayleigh
- ♦ A Intensidade  $I = A^2 = r^2 + s^2 \Rightarrow$  distribuição Exponencial

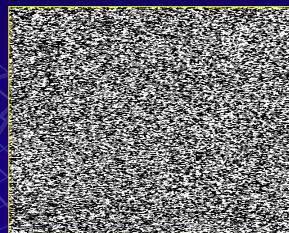


## Propriedades do *Speckle*

Parte real ( $r$ )



Parte imaginária ( $s$ )



Intensidade ( $I$ )



Amplitude ( $A$ )







## Propriedades do *Speckle*

### Observações:

- ◆ Se  $r$  e  $s$  são normalmente distribuídos com média zero e variância  $\sigma^2$  -  $N(0, \sigma^2)$  - então, a intensidade  $I$  possuirá uma distribuição Exponencial com média e variância:

$$E(I) = \text{Var}^{1/2}(I) = 2 \sigma^2$$

- ◆ Em geral, supõe-se que o *speckle* em intensidade possui média igual a 1.
- ◆ Dentro de uma área, o ruído *speckle* de pontos vizinhos possuirão uma autocorrelação, causada unicamente pelo sistema e pelo processamento do sinal.



## Propriedades do *Speckle*

### Distribuição Exponencial:

- ◆ A V.A.  $X$  possui uma distribuição exponencial com média  $\mu$  ( $\mu > 0$ ) se possuir uma distribuição contínua para a qual a fdp é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp\left\{-\frac{x}{\beta}\right\}, \quad x \geq 0 \Rightarrow \text{Speckle : } \beta = 1$$

$$E(X) = \beta \quad \Downarrow$$

$$\text{Var}(X) = \beta^2 \quad f(x) = \exp\{-x\}$$

### Distribuição Rayleigh:

- ◆ Se  $X$  possui uma distribuição exponencial, então a V.A.  $Y=X^{1/2}$  possui uma distribuição de Rayleigh, cuja fdp é dada por:

$$f(y) = \frac{2y}{\beta} \exp\left\{-\frac{y^2}{\beta}\right\}, \quad y \geq 0 \Rightarrow \text{Speckle } \beta = 1$$

$$E(Y) = \sqrt{\beta\pi} / 2 \quad \Downarrow$$

$$\text{Var}(Y) = (4 - \pi)\beta / 4 \quad f(y) = 2y \exp\{-y^2\}$$

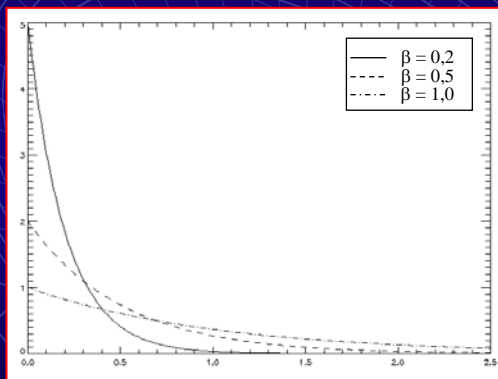




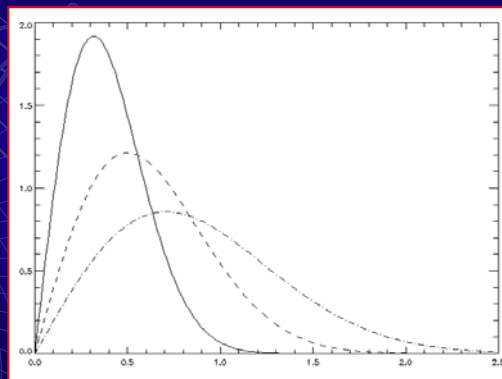


## Propriedades do *Speckle*

### DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL



### DISTRIBUIÇÃO RAYLEIGH



## *Speckle* Multi-look



- Sejam  $I_1, I_2, \dots, I_m$  variáveis aleatórias independentes, com distribuição Exponencial com média 1. Então,

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m I_i}{m}$$

possuirá uma distribuição Gama com parâmetro  $m$  ( $I \sim \Gamma(m, m)$ ), denominado *número de looks*.

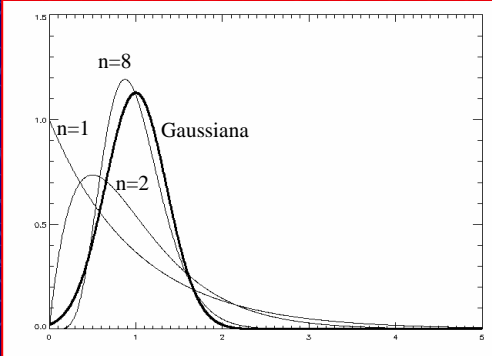
- $I_1, I_2, \dots, I_m$  não são independentes, mas sim correlacionados, e portanto contém informação redundante.
- Define-se o *número equivalente de looks* ( $n$ ) que corresponde ao número de v.a. independentes (pixels) que "contém a mesma quantidade de informação" que as variáveis correlacionadas (pixels da imagem original).
- O *speckle* multi-look é sempre obtido de dados em Intensidade. Na amplitude, o *speckle* multi-look possui uma distribuição Raiz Quadrada da Gama ( $A \sim \Gamma^{1/2}(n, n)$ ).



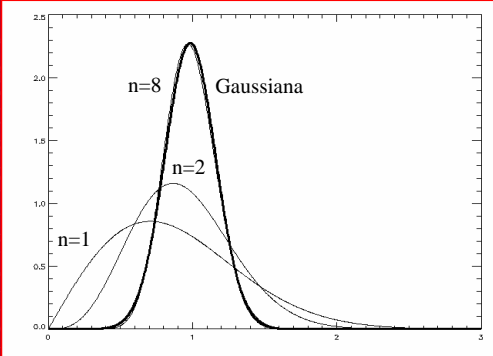
## Speckle Multi-look

**INTENSIDADE**      $\Gamma(n,n)$




$f_{Y_I^{(n)}}(y) = \frac{n^n}{\Gamma(n)} y^{n-1} \exp(-ny) \quad n, y > 0$

**AMPLITUDE**      $\Gamma^{1/2}(n,n)$





$f_{Y_A^{(n)}}(y) = \frac{2n^n}{\Gamma(n)} y^{2n-1} \exp(-ny^2) \quad n, y > 0$



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar


9

## Modelagem estatística dos dados

- ▣ O Modelo Multiplicativo:
  - ◆ O sinal observado é o produto das variáveis aleatórias (independentes) que modelam o *backscatter* ( $X$ ) e o *speckle* ( $Y$ )

$Z = X \cdot Y$



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

10



## Modelagem estatística dos dados

INTENSIDADE	REGIÕES	BACKSCATTER	SPECKLE	RETORNO
	HOMOGÊNEAS	$C(\beta)$	$\Gamma(n, n)$	$Z_I = X_I Y_I$
HETEROGÊNEAS	$\Gamma(\alpha, \lambda)$	$\Gamma(n, n/\beta)$		
EXTREMAMENTE HETEROGÊNEAS	$\Gamma^{-1}(\alpha, \gamma)$	$K_I(\alpha, \lambda, n)$		
CASO GERAL	$N^{-1}(\alpha, \gamma, \lambda)$		$G_I^0(\alpha, \gamma, n)$	

AMPLITUDE	REGIÕES	BACKSCATTER	SPECKLE	RETORNO
	HOMOGÊNEAS	$C(\beta)$	$\Gamma^{1/2}(n, n)$	$Z_A = X_A Y_A$
HETEROGÊNEAS	$\Gamma^{1/2}(\alpha, \lambda)$	$\Gamma^{1/2}(n, n/\beta)$		
EXTREMAMENTE HETEROGÊNEAS	$\Gamma^{-1/2}(\alpha, \gamma)$	$K_A(\alpha, \lambda, n)$		
CASO GERAL	$N^{-1/2}(\alpha, \gamma, \lambda)$		$G_A^0(\alpha, \gamma, n)$	

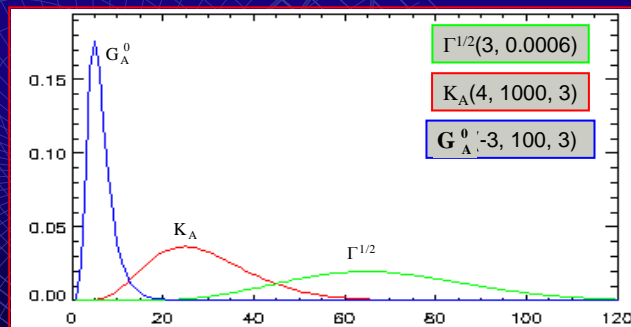


## Dados em Amplitude

$$\Gamma^{1/2}(n, n/\beta) \Rightarrow f_{Z_A^{(n)}}(z) = \frac{2n^n}{\beta^n \Gamma(n)} z^{2n-1} \exp(-nz^2/\beta) \quad n, \beta, z > 0$$

$$K_A(\alpha, \lambda, n) \Rightarrow f_{Z_A^{(n)}}(z) = \frac{4\lambda n z}{\Gamma(\alpha)\Gamma(n)} (\lambda n z^2)^{(\alpha+n-2)/2} K_{\alpha-n}(2z\sqrt{\lambda n}) \quad \alpha, \lambda, n, z > 0$$

$$G_A^0(\alpha, \gamma, n) \Rightarrow f_{Z_A^{(n)}}(z) = \frac{2n^n \Gamma(n-\alpha) z^{2n-1}}{\gamma^\alpha \Gamma(n)\Gamma(-\alpha)(\gamma+nz^2)^{n-\alpha}} \quad -\alpha, \gamma, n, z > 0$$



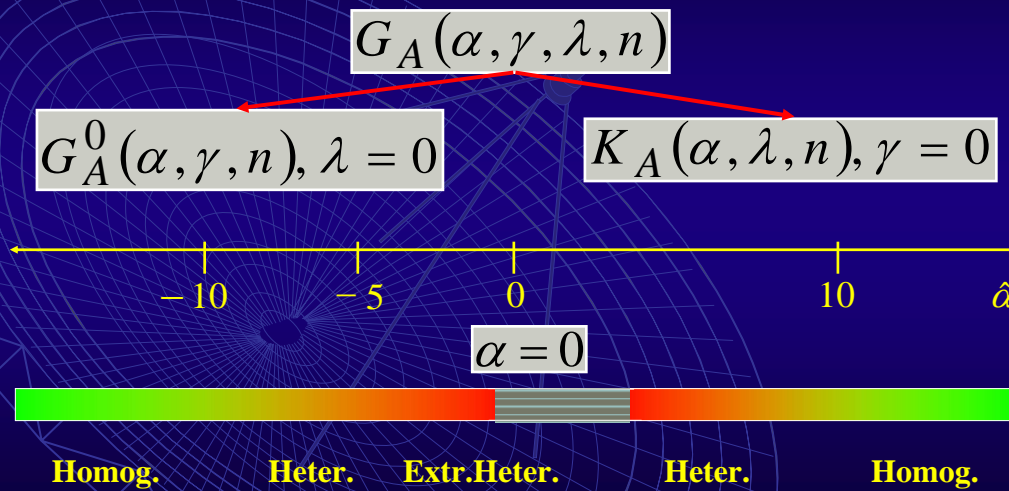


## Modelagem estatística dos dados

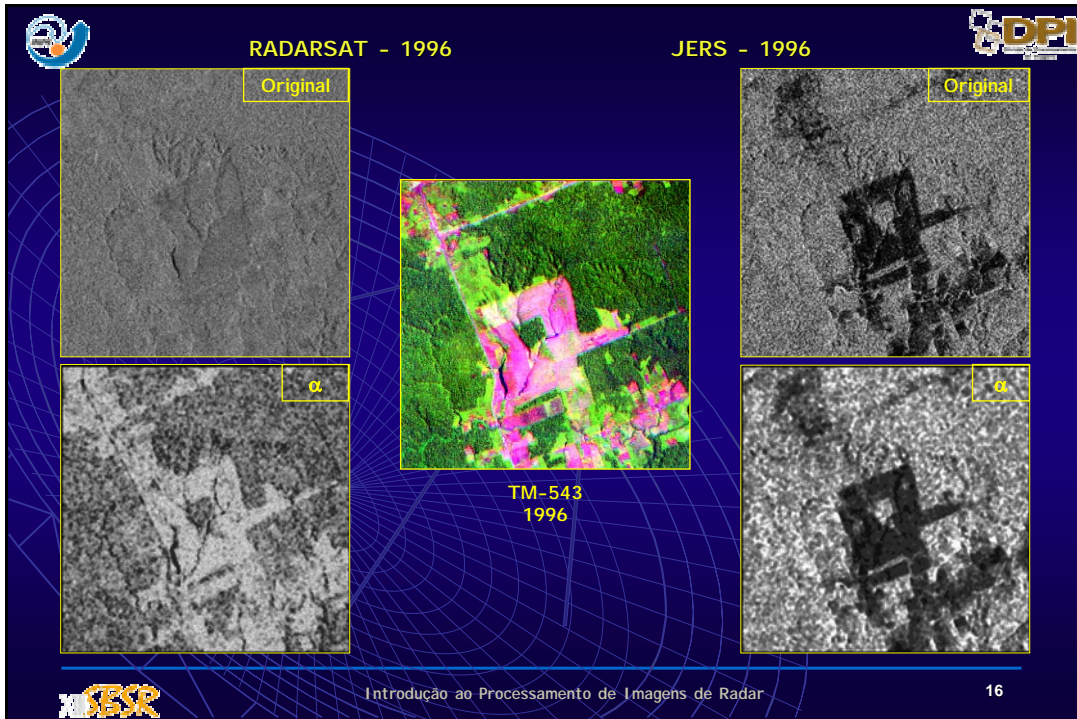
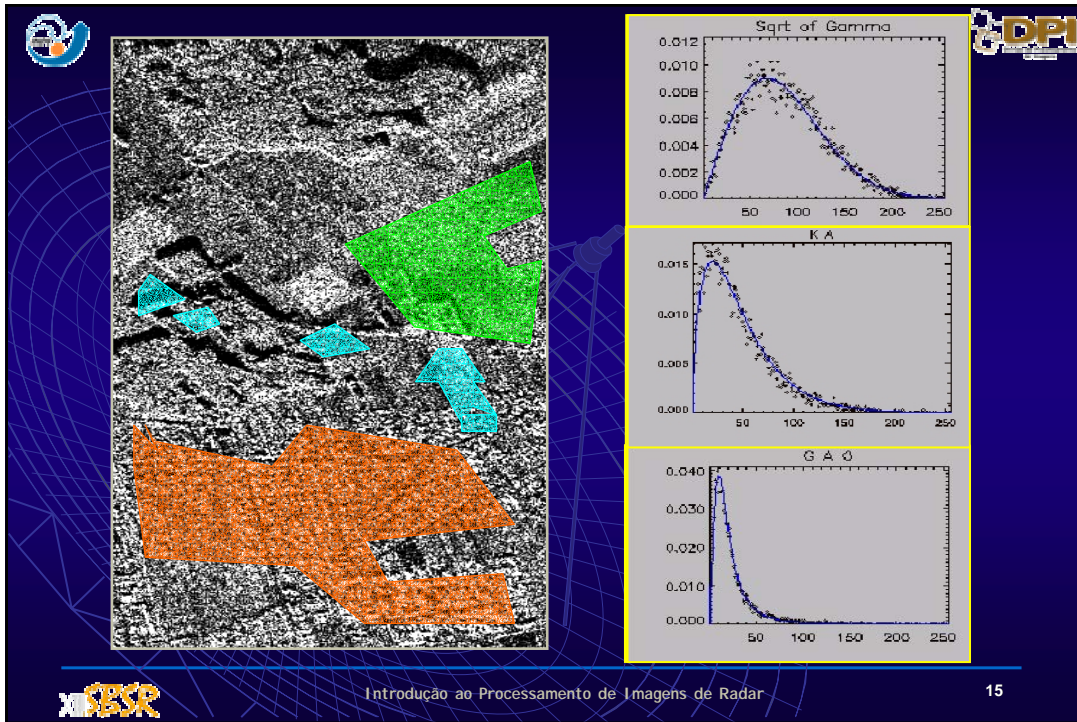
AMPLITUDE	}	$G_A(\alpha, \gamma, \lambda, n)$	$\xrightarrow{D} K_A(\alpha, \lambda, n)$	$\xrightarrow{D} \Gamma^{1/2}(n, n/\beta_1)$
			$\gamma \rightarrow 0$	$\alpha, \lambda \rightarrow \infty$
			$\alpha, \lambda > 0$	$\alpha/\lambda \rightarrow \beta_1$
			$\lambda \rightarrow 0$	$-\alpha, \gamma \rightarrow \infty$
			$-\alpha, \gamma > 0$	$-\alpha/\gamma \rightarrow \beta_2$
			$\xrightarrow{D} G_A^0(\alpha, \gamma, n)$	$\xrightarrow{D} \Gamma^{1/2}(n, n\beta_2)$



## Valores de $\alpha$











## Medida de *Speckle* em Imagens SAR (áreas homogêneas)

### Relação Sinal-Ruído (S/N)

$$(S/N) \cong \frac{(\text{Valor Médio})^2}{\text{Variância}}$$

Uma Visada ( $n = 1$ )

Intensidade

$$(S/N)_1 = \frac{E^2(Z)}{\text{Var}(Z)} = 1$$

Amplitude

$$(S/N)_1 = \frac{\pi}{4 - \pi} = 3,66$$

Múltiplas Visadas Independentes ( $n > 1$ )

Intensidade

$$(S/N)_n = n \cdot (S/N)_1 = n$$

Amplitude

$$(S/N)_n \approx n \cdot (S/N)_1 \approx 3,66 \cdot n$$



## Relação Sinal/Ruído - Intensidade

Distribuição Exponencial ( $n=1$ ):

$$f(z) = \frac{1}{\beta} \exp\left\{-\frac{z}{\beta}\right\}$$

$$E(Z) = \beta$$

$$\text{Var}(Z) = \beta^2$$

Relação Sinal/Ruído:

$$(S/N)_1 = \frac{\beta^2}{\beta^2} = 1$$

Distribuição Gama ( $n>1$ ):

$$f(z) = \frac{n^n}{\beta^n \Gamma(n)} z^{n-1} \exp\left\{-\frac{nz}{\beta}\right\}$$

$$E(Z) = \beta$$

$$\text{Var}(Z) = \frac{\beta^2}{n}$$

Relação Sinal/Ruído:

$$(S/N)_n = \frac{\beta^2}{\beta^2/n} = 1 \cdot n$$



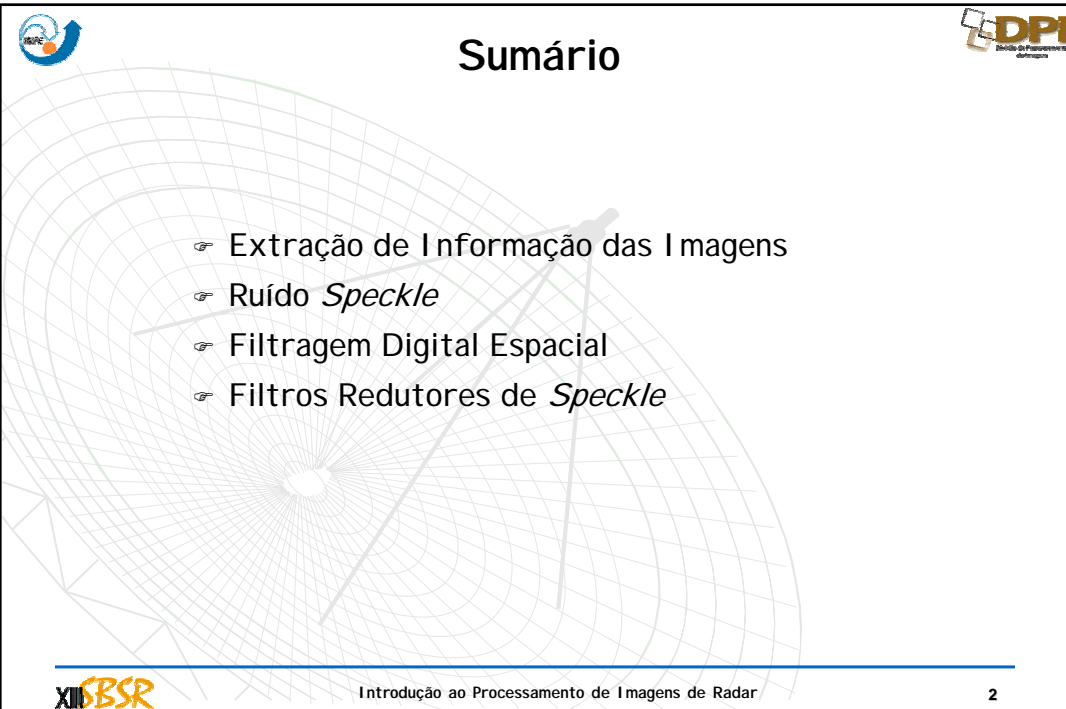




 

# Filtros Redutores de *Speckle*

---

 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 1




# Sumário

- ☞ Extração de Informação das Imagens
- ☞ Ruído *Speckle*
- ☞ Filtragem Digital Espacial
- ☞ Filtros Redutores de *Speckle*

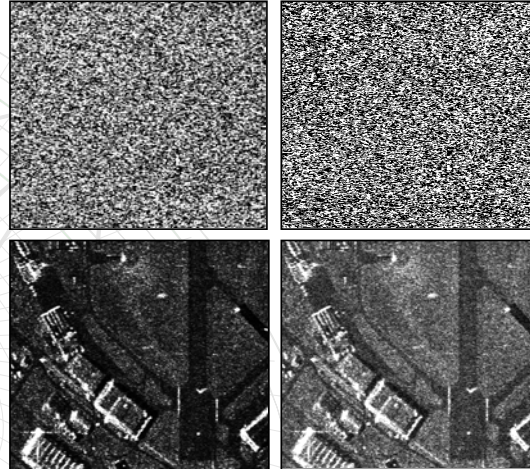
---

 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 2



# Formatos da Imagem de Radar

- Diferentes formatos
- Ruído *Speckle*
  - ✓ *Multilook*
  - ✓ Filtragem



$$Z_i = I^2 + Q^2$$

$$Z_a = Z_i^{1/2}$$

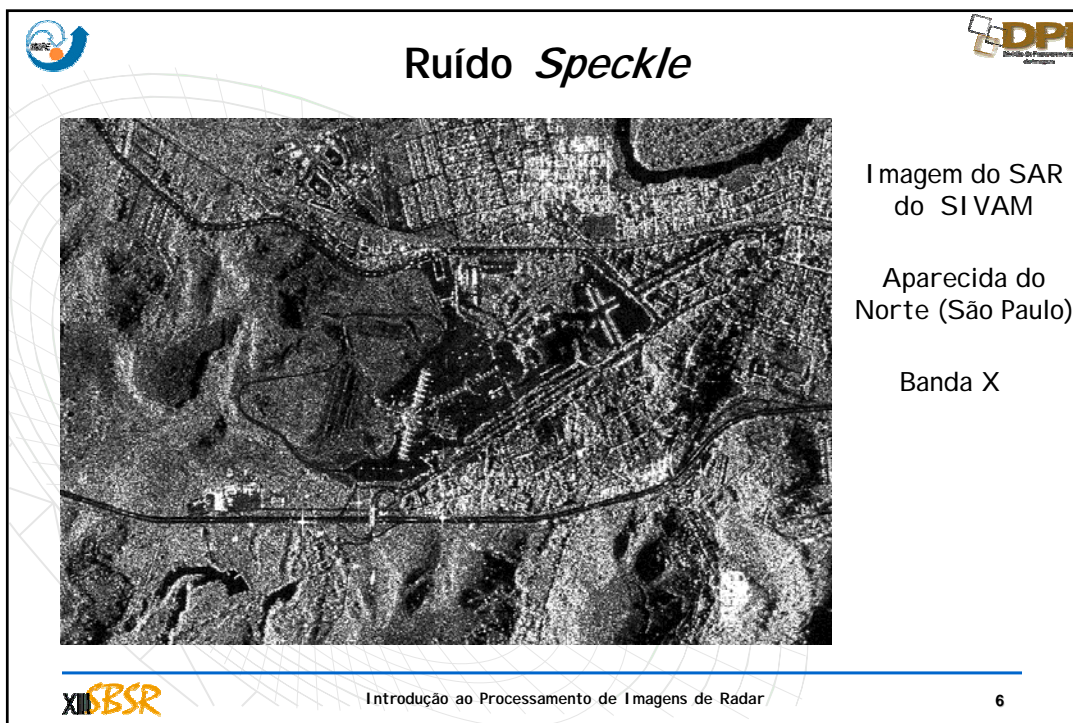
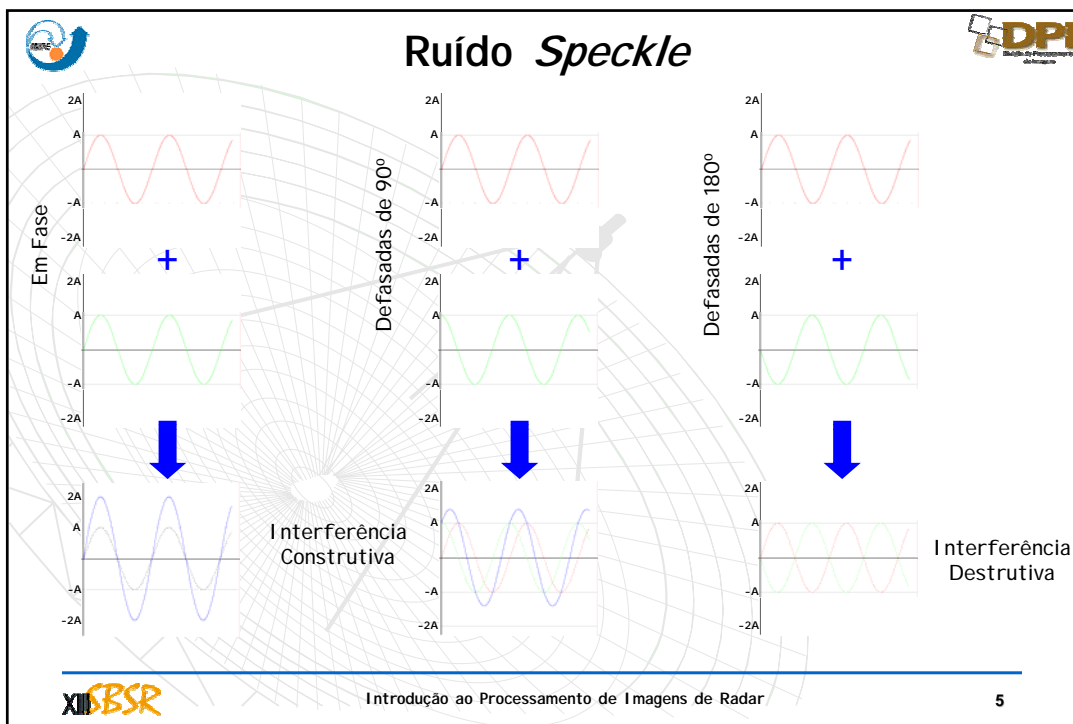


# Ruído *Speckle*

- ☞ O ruído *speckle* é decorrente da natureza coerente do imageamento SAR
- ☞ Cada célula de resolução é composta por inúmeros difusores elementares aleatoriamente dispostos e cada qual contribuirá com um sinal retroespalhado com uma fase aleatória, gerando assim um processo de interferência
- ☞ O *speckle* é modelado como um ruído multiplicativo, isto é, ele é mais intenso onde o sinal é mais forte e menos intenso onde o sinal é mais fraco
- ☞ O *speckle* dificulta a interpretação visual das imagens SAR (espacial e radiométrica)
- ☞ O *speckle* confere um aspecto granuloso das imagens SAR
- ☞ Os pixels adjacentes em uma imagem SAR são correlacionados devido ao *speckle*
- ☞ A relação sinal-ruído nas imagens é maior para aquelas com menor número de *looks*

A textura das imagens em sistemas: {

- Incoerentes está diretamente relacionada com a textura da cena imageada e é modelada como estatística de 2ª ordem
- Coerentes está relacionada com as texturas da cena imageada e do *speckle* (modelada como estatística de 1ª ordem)







# Filtragem Digital Espacial

**Filtragem Digital Espacial** = transformação de uma imagem em outra

- Objetivo: realçar a imagem e/ou reduzir o nível de ruído na imagem
- Operação *pixel a pixel*
- Utiliza uma vizinhança (janela de filtragem)

30	40	32
28	30	29
31	37	40

Média

$$(30+40+32+28+30+29+31+37+40)/9 = 33$$

•Tipos de Filtros

**Lineares:** utilizam operadores lineares, satisfazendo os princípios da superposição e da proporcionalidade

**Não-Lineares:** utilizam operadores que não satisfazem a pelo menos um destes princípios

$$\alpha(x+y) = \alpha(x) + \alpha(y)$$

$$\alpha(\alpha x) = \alpha \alpha(x)$$

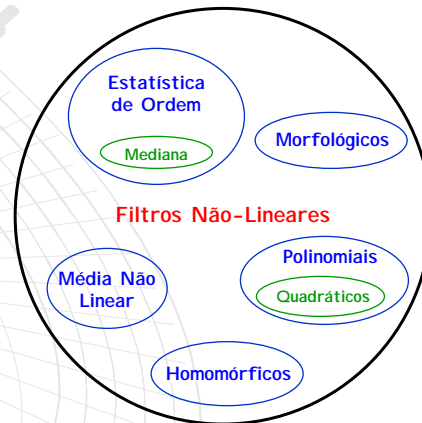


# Filtragem Digital Espacial


•Família de Filtros Não-Lineares

•Filtros Lineares


- Passa Baixa
- Passa Faixa ou Passa Banda
- Passa Alta







## Filtros Redutores de *Speckle*



✓ Dado o processo de degradação do sinal, os filtros }

 Adotar modelo  
 Não adotar modelo

✓ Filtros sem Modelo

- Média
  - Mais simples
  - Filtro linear
  - Fácil implementação
  - Perda de resolução
  - Passa Baixa
- Filtros de Ordem
  - Simples
  - Filtro não-linear
  - Princípio da ordenação
  - Fácil implementação

78	80	89	72	31
50	77	68	79	13
84	66	81	68	20
34	75	86	68	38
29	14	21	76	98


$(77+68+79+66+81+68+75+86+68)/9 = 74,2222$

↑ erosão     mediana ↓

66, 68, 68, 68, 75, 77, 79, 81, 86


↑ dilatação

moda




Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

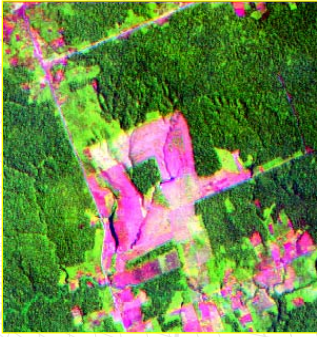
9



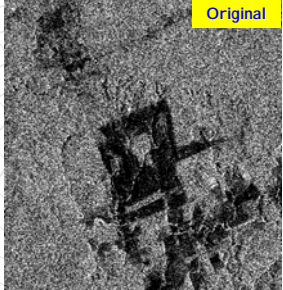
## Filtros Redutores de *Speckle*



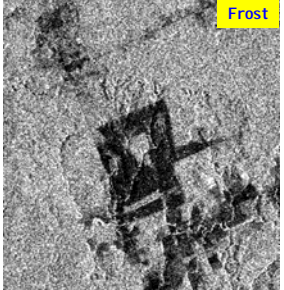
JERS-1 1996



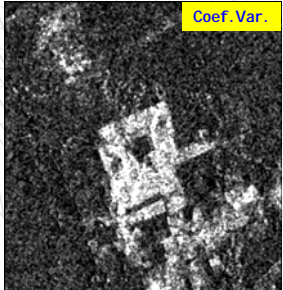
TM-543  
1996



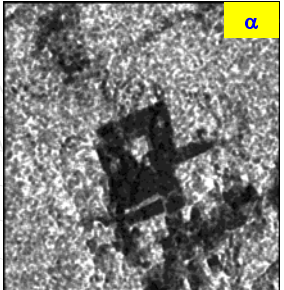
Original




Frost



Coef. Var.




$\alpha$




Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

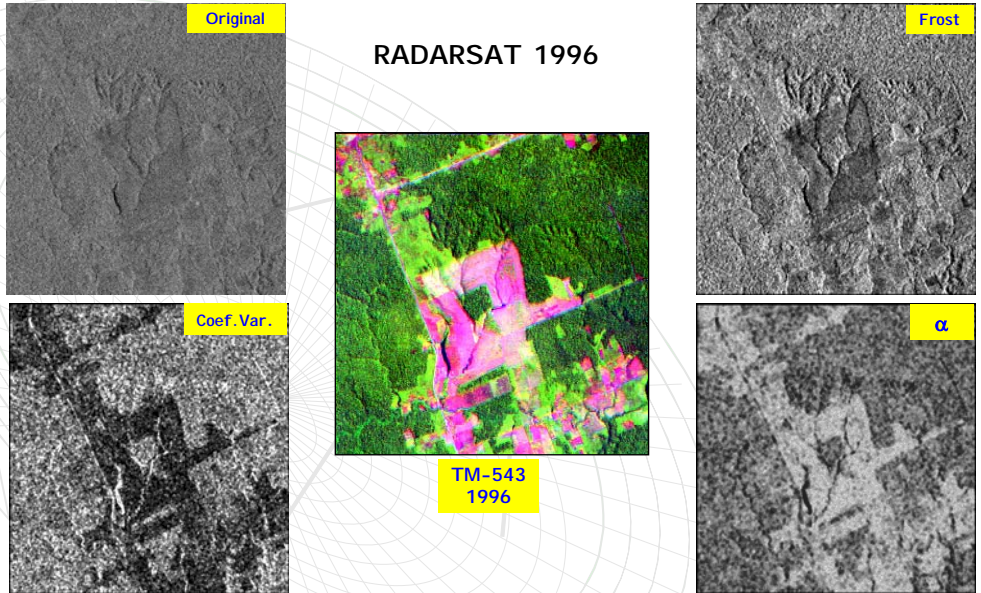
10




## Filtros Redutores de *Speckle*




RADARSAT 1996






Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

11



## Filtros Redutores de *Speckle*



- ✓ O modelo de degradação do sinal é o multiplicativo

$$Z = X \cdot Y \quad \begin{cases} Z = \text{sinal observado} \\ X = \text{sinal da cena (backscatter)} \\ Y = \text{ruído speckle} \end{cases}$$

- ✓ X e Y v.a. independentes
- ✓ Ruído com média unitária ( $\mathbb{E}(Y) = 1$ )

$$\mathbb{E}(Z) = \mathbb{E}(X \cdot Y) = \mathbb{E}(X) \cdot \mathbb{E}(Y) = \mathbb{E}(X) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\mathbb{E}(X) = \mathbb{E}(Z)}$$


$$\mathcal{V}_{ar}(Z) = \mathbb{E}([Z - \mathbb{E}(Z)]^2) = \mathbb{E}(Z^2) - \mathbb{E}^2(Z) = \mathbb{E}(X^2) \mathbb{E}(Y^2) - \mathbb{E}^2(X) \mathbb{E}^2(Y)$$

Como  $\mathbb{E}(W^2) = \mathcal{V}_{ar}(W) + \mathbb{E}^2(W)$

$$\mathcal{V}_{ar}(Z) = [\mathcal{V}_{ar}(X) + \mathbb{E}^2(X)] [\mathcal{V}_{ar}(Y) + \mathbb{E}^2(Y)] - \mathbb{E}^2(X) \mathbb{E}^2(Y) = \mathcal{V}_{ar}(X) \{ \mathcal{V}_{ar}(Y) + 1 \} + \mathcal{V}_{ar}(Y) \mathbb{E}^2(X)$$

$$\mathcal{V}_{ar}(X) = \frac{\mathcal{V}_{ar}(Z) - \mathcal{V}_{ar}(Y) \mathbb{E}^2(X)}{\mathcal{V}_{ar}(Y) + 1}$$

A  $\mathcal{V}_{ar}(Y)$  é conhecida dado o modelo clutter



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

12



# Filtros Redutores de *Speckle*



## ✓Filtro de Wiener

- Seja  $W$  um processo corrompido por um ruído aditivo:  $V = W + N$
- $N \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$
- $W$  e  $N$  não correlacionados  $\rightarrow \mathcal{E}(W \cdot N) = \mathcal{E}(W) \cdot \mathcal{E}(N) = 0$
- Estimador de Wiener

$$\mathcal{E}(V) = \mathcal{E}(W)$$

- Linear Ótimo de  $W$  dado  $V$
- Minimiza o Erro Quadrático Médio:  $E[(W - \hat{W})^2]$

$$\hat{W} = \mathcal{E}(W) + H(V - \mathcal{E}(V)) \quad \text{H é o ganho do filtro}$$

$$H = \frac{\mathcal{V}_{ar}(W)}{\mathcal{V}_{ar}(W) + \mathcal{V}_{ar}(N)} = \frac{1}{1 + [\mathcal{V}_{ar}(N)/\mathcal{V}_{ar}(W)]} \begin{cases} \mathcal{V}_{ar}(W) \gg \mathcal{V}_{ar}(N) \rightarrow H \rightarrow 1 \rightarrow \hat{W} = V \\ \mathcal{V}_{ar}(W) \ll \mathcal{V}_{ar}(N) \rightarrow H \rightarrow 0 \rightarrow \hat{W} = \mathcal{E}(V) \end{cases}$$



# Filtros Redutores de *Speckle*



## ✓Filtro de Kuan-Nathan

- Minimiza o Erro Quadrático Médio Localmente e é Linear (LLMMSE)
- Transforma o modelo multiplicativo ( $Z = X \cdot Y$ ) em aditivo
- Calculando-se o ganho do estimador de Wiener

$$Z = X + (Y - 1) X = X + K, \text{ com } \mathcal{E}(X \cdot K) = 0$$

$$H = \frac{\mathcal{V}_{ar}(X)}{\mathcal{V}_{ar}(X) + \mathcal{V}_{ar}(K)}$$

- Desenvolvendo-se a  $\mathcal{V}_{ar}(K)$

$$\mathcal{V}_{ar}(K) = E(K^2) = \mathcal{V}_{ar}(Y) \{ \mathcal{V}_{ar}(X) + E^2(X) \}$$

- A estimativa do sinal a priori será:

$$\hat{X} = \mathcal{E}(Z) + \left\{ \frac{\mathcal{V}_{ar}(Z) - \mathcal{V}_{ar}(Y) \mathcal{E}^2(Z)}{\mathcal{V}_{ar}(Z) [\mathcal{V}_{ar}(Y) + 1]} \right\} \cdot [Z - \mathcal{E}(Z)]$$



# Filtros Redutores de *Speckle*



## ✓Filtro de Lee

- LLMMSE
- Expande o modelo multiplicativo ( $Z = X \cdot Y$ ) em série de Taylor em torno de  $\mathcal{E}(X)$   $\mathcal{E}(Y)$
- Utiliza somente os termos de 1ª ordem

$$Z' = X \mathcal{E}(Y) + \mathcal{E}(X) [Y - \mathcal{E}(Y)] = X + K, \text{ com } K = (Y - 1) \mathcal{E}(X)$$

- Desenvolvendo-se a  $\mathcal{V}_{ar}(K)$

$$\mathcal{V}_{ar}(K) = \mathcal{V}_{ar}(Y) \mathcal{E}^2(X)$$

- A estimativa do sinal a priori será:

$$\hat{X} = \mathcal{E}(Z) + \left\{ \frac{\mathcal{V}_{ar}(Z) - \mathcal{V}_{ar}(Y) \mathcal{E}^2(Z)}{\mathcal{V}_{ar}(Z) + [\mathcal{V}_{ar}(Y) \mathcal{E}(Z)]^2} \right\} \cdot [Z - \mathcal{E}(Z)]$$

- Adaptatividade:

o Li (1988)

$$o R = \mathcal{V}_{ar}(X) / \mathcal{V}_{ar}(Z)$$



# Filtros Redutores de *Speckle*



## ✓Filtro de Frost

- Convolutacional e linear
- Minimiza o Erro Quadrático Médio (MMSE)
- Incorpora a dependência dos pixels vizinhos (correlação exponencial)
- Adaptativo



$$\hat{X} = K \alpha \exp\{-\alpha |t|\}, \text{ com } k = \text{constante de normalização}$$

$$\alpha = \sqrt{2 \rho \left[ \frac{\mathcal{E}^2(Y)}{\mathcal{V}_{ar}(Y)} \right] \left\{ \frac{1}{1 + [\mathcal{E}^2(X) / \mathcal{V}_{ar}(X)]} \right\} + \rho} \quad \rho = \text{coeficiente de correlação entre os pixels}$$







# Filtros Redutores de *Speckle*



## ✓Filtros Robustos

- I déia = filtrar é estimar o *backscatter*
- Baseados em estatística de ordem
- Usa o modelo multiplicativo ( $Z = X \cdot Y$ )
- I magens amplitude e *1-look* → a distribuição marginal de  $Z$  é Rayleigh

$$f_Z(z) = \frac{z}{\theta^2} \exp\left[-\frac{z^2}{2\theta^2}\right], z \geq 0 \quad F_Z(z) = 1 - \exp\left[-\frac{z^2}{2\theta^2}\right], z \geq 0$$

$\theta = \text{backscatter}$

- Dado um vetor de  $n$  observações  $z = (z_1, \dots, z_n)$ , tem-se os seguintes estimadores:

### Máxima Verossimilhança (ML)

$$\hat{\theta}_{ML} = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n z_i^2}$$

Estes dois estimadores possuem bom desempenho para amostras puras

### Momentos (MO)

$$\hat{\theta}_{MO} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n z_i$$



# Filtros Redutores de *Speckle*



## ✓Filtros Robustos

- Seja  $\mathbf{a} = \{a_1, \dots, a_M\}$  um vetor  $M$ -dimensional e
- $\mathbf{a}_{(\cdot)} = \{a_{M:1}, \dots, a_{M:M}\}$  o vetor  $\mathbf{a}$  ordenado em ordem crescente

### o Mediana Amostral

$$Q_2(\mathbf{a}) = \begin{cases} a_{M:|M/2|+1} & , \text{ se } M \text{ é ímpar} \\ \frac{1}{2}(a_{M:M/2} + a_{M:M/2+1}) & , \text{ se } M \text{ é par} \end{cases}$$

### o Quartil Amostral Inferior

$$Q_1(\mathbf{a}) = \begin{cases} a_{M:(\ell+1)/2} & , \text{ se } \ell \text{ é ímpar} \\ \frac{1}{2}(a_{M:\ell/2} + a_{M:\ell/2+1}) & , \text{ se } \ell \text{ é par} \end{cases}$$

### o Quartil Amostral Superior

$$Q_3(\mathbf{a}) = \begin{cases} a_{M:(M+1-(\ell+1)/2)} & , \text{ se } \ell \text{ é ímpar} \\ \frac{1}{2}(a_{M:M+1-\ell/2} + a_{M:M-\ell/2}) & , \text{ se } \ell \text{ é par} \end{cases}$$

$$\ell = \begin{cases} (M-1)/2 & , \text{ se } M \text{ é ímpar} \\ M/2 & , \text{ se } M \text{ é par} \end{cases}$$







# Filtros Redutores de *Speckle*



## ✓Filtros Robustos

### Mediana

$$\hat{\theta}_{MED} = \frac{Q_2(z)}{K_1}$$

$$K_1 = \sqrt{2 \ln 2}$$

### Distância Inter-Quartil (IQR)

$$\hat{\theta}_{IQR} = \frac{Q_3(z) - Q_1(z)}{K_2}$$

$$K_2 = \sqrt{2 \ln 4} - \sqrt{2 \ln(4/3)}$$

Os  $K_i$  são calculados para tornar os estimadores assintoticamente consistentes

### Desvio Médio Absoluto (MAD)

$$\hat{\theta}_{MAD} = \frac{Q_2(u)}{K_3}$$

$$u = (u_1, \dots, u_n) \text{ com } u_i = |z_i - Q_2(z)|$$

$$K_3 = 0,4485$$

### Máxima Verossimilhança Aparado (TML)

$$\hat{\theta}_{TML} = \sqrt{\frac{1}{2(n-2a)} \sum_{i=a}^{n-a} z_{n,i}^2}$$

### Momentos Aparados (TMO)

$$\hat{\theta}_{TMO} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{n-2a} \sum_{i=a}^{n-a} z_{n,i}$$



# Filtros Redutores de *Speckle*



## ✓Filtros de Textura Weibull

• <http://www.ele.ita.cta.br/~david>

• Usa o modelo multiplicativo ( $Z = X \cdot Y$ )

$$\begin{cases} Z \sim \mathcal{W}(\gamma, \beta) \\ X \sim \mathcal{W}(\gamma_x, \beta_x) \\ Y \sim \mathcal{W}(\gamma_y, \beta_y) \end{cases}$$

$\gamma_y$  é estimado em áreas homogêneas

$$f_Z(z) = \frac{\gamma}{\beta} \left[ \frac{z}{\beta} \right]^{(\gamma-1)} \exp \left[ -\frac{z^\gamma}{\beta^\gamma} \right], z \geq 0 \text{ e } \gamma, \beta > 0$$

$\beta$  = parâmetro de escala

$\gamma$  = parâmetro de forma

$$\begin{cases} \gamma = 1 \rightarrow \text{Exponencial} \\ \gamma = 2 \rightarrow \text{Rayleigh} \end{cases}$$

$$\mathcal{E}(Z) = \frac{\Gamma[(1/\gamma) + 1]}{\beta}$$

$$\mathcal{V}_{ar}(Z) = \frac{\Gamma[(2/\gamma) + 1] - \Gamma^2[(1/\gamma) + 1]}{\beta^2}$$





# Filtros Redutores de *Speckle*



## ✓Filtros de Máximo a Posteriori (MAP)

• Usa o modelo multiplicativo (  $Z = X \cdot Y$  )

• Regra de Bayes:  $f(x/z) = \frac{f(z/x) f(x)}{f(z)}$

• A estimativa MAP é o valor que maximiza a função  $f(x/z) \rightarrow \hat{x}_{MAP} = \max_x \{ f(x/z) \}$

• Considerando  $f(z)$  constante com relação a  $x$

$$\hat{x}_{MAP} = \max_x \{ f(z/x) f(x) \}$$

• Tomando-se o logaritmo e derivando-se para encontrar o máximo

$$\left. \frac{\partial \ln f(x/z)}{\partial x} = \frac{\partial \ln f(z/x)}{\partial x} + \frac{\partial \ln f(x)}{\partial x} \right|_{x = \hat{x}_{MAP}} = 0$$

$\frac{\partial \ln f(x/z)}{\partial x}$  : Termo de Máxima Verossimilhança

$\frac{\partial \ln f(x)}{\partial x}$  : Termo a Priori



# Filtros Redutores de *Speckle*



## ✓Filtros de Máximo a Posteriori (MAP)

• No contexto da filtragem da imagem

$f(x)$  = fdp a priori, ou seja, a fdp que caracteriza o sinal da cena

$f(z/x)$  = descreve o modelo de degradação do sinal (modelo multiplicativo)

$z$  = o vetor de observações (pixels da imagem)

$f(x/z)$  = fdp a posteriori cuja maximização leva ao estimador MAP

• Exemplo

$f(x)$	Deteção Linear $f(Y) \sim \mathcal{R}(\xi^2)$	Deteção Quadrática $f(Y) \sim \mathcal{E}(\xi)$
Rayleigh $\mathcal{R}(\theta)$	$\hat{x}_{MAP}^4 + \theta^2 \hat{x}_{MAP}^2 - \left(\frac{z\theta}{\xi}\right)^2 = 0$	$\hat{x}_{MAP}^3 + \xi \theta^2 z = 0$
Exponencial $\mathcal{E}(\theta)$	$\hat{x}_{MAP}^3 + \left(\frac{2}{\theta z} - 1\right) \hat{x}_{MAP}^2 - \frac{z^2}{\theta \xi^2} = 0$	$\hat{x}_{MAP}^2 + \frac{1}{\theta} \hat{x}_{MAP} - \frac{z\xi}{\theta} = 0$
Gama $\Gamma(\alpha, \beta)$	$\hat{x}_{MAP}^3 + \left[\frac{(2/z) - \alpha + 1}{\beta}\right] \hat{x}_{MAP}^2 - \frac{z^2}{\beta \xi^2} = 0$	$\hat{x}_{MAP}^2 + \left(\frac{2-\alpha}{\beta}\right) \hat{x}_{MAP} - \frac{\xi z}{\beta} = 0$

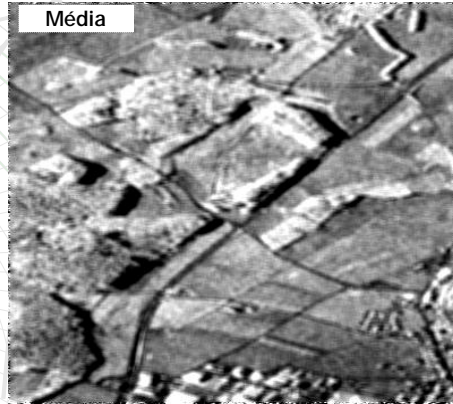


## Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)



AeS1 - Banda X

Zurich

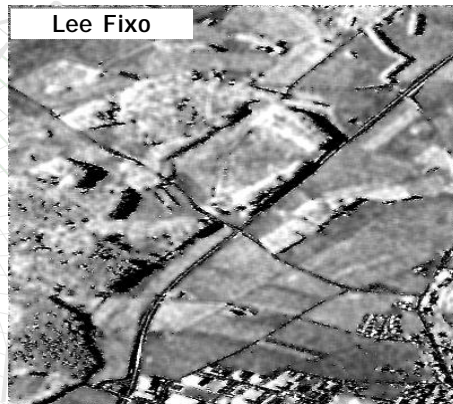


## Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)



AeS1 - Banda X

Zurich





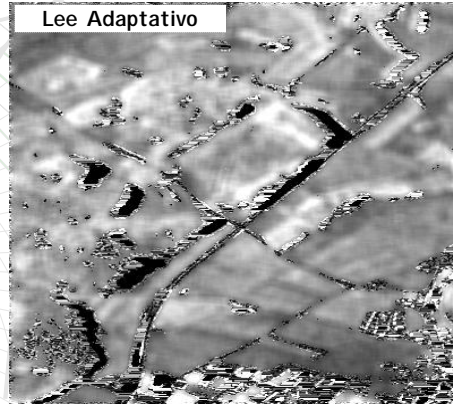


## Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)



AeS1 - Banda X

Zurich



## Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)



AeS1 - Banda X

Zurich





## Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)



AeS1 - Banda X

Zurich

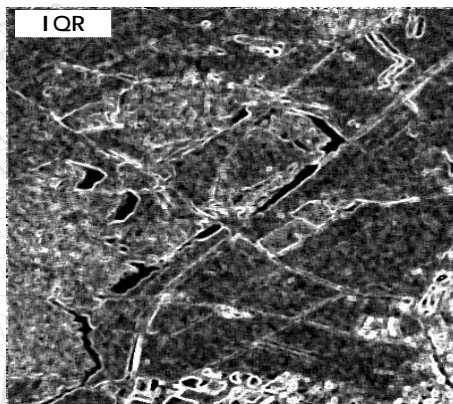


## Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)



AeS1 - Banda X

Zurich





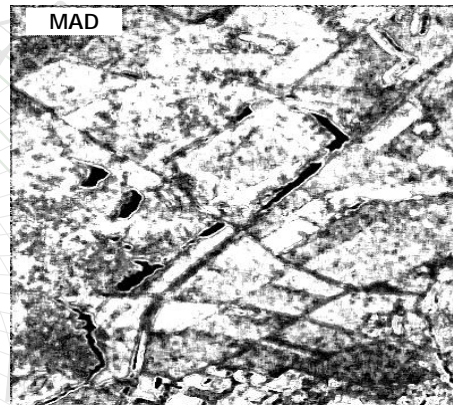


## Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)



AeS1 - Banda X

Zurich



## Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)



AeS1 - Banda X

Zurich



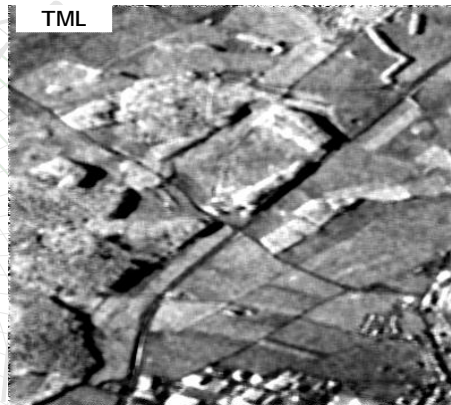


## Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)



AeS1 - Banda X

Zurich

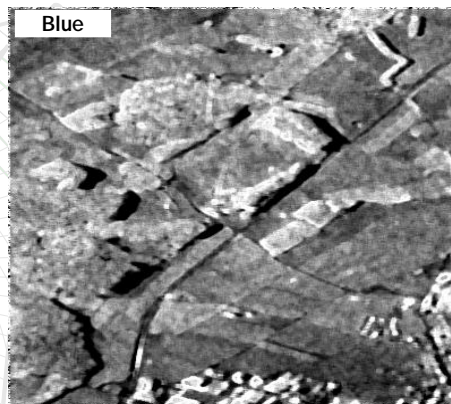


## Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)



AeS1 - Banda X

Zurich



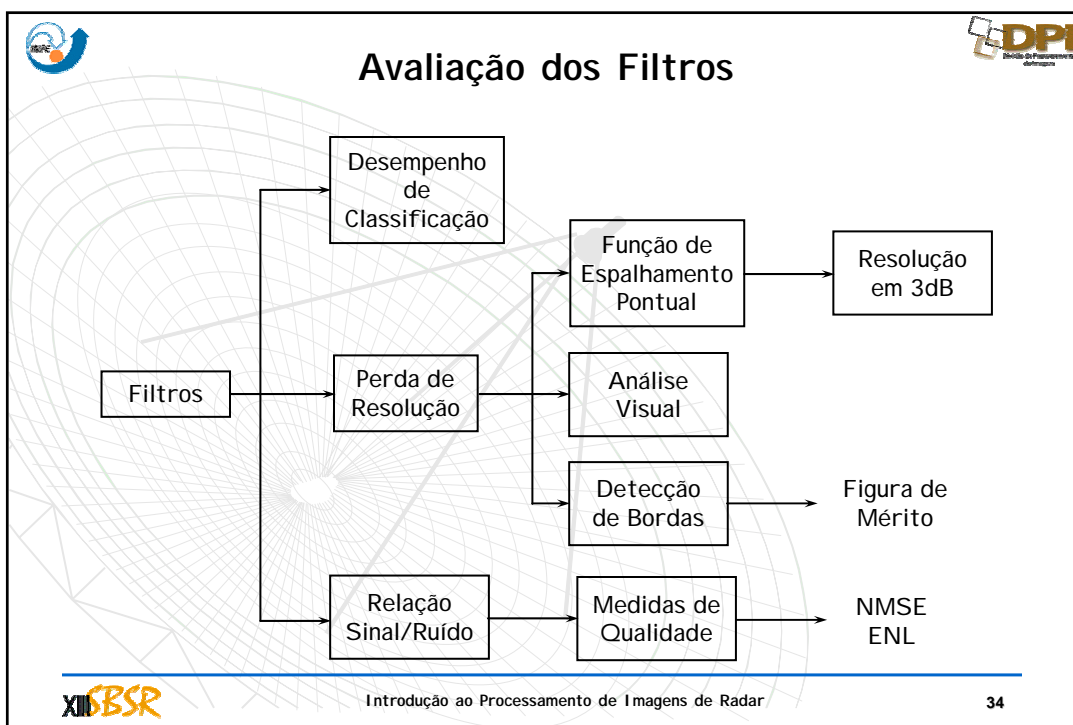


**Exemplos de Filtragens (5x5 pixels)**

Zurich

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

33



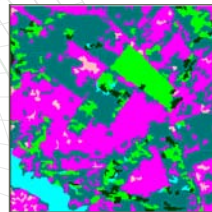
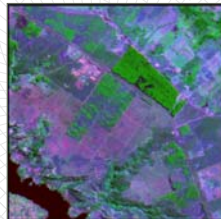


# Classificação e Segmentação de imagens SAR



# Classificação de padrões

- ◆ Para os nossos fins é o processo de separação e identificação de objetos em uma cena de Sensoriamento Remoto. É uma técnica que usa os conceitos de uma disciplina de Ciência da Computação chamada de Reconhecimento de Padrões ou *Pattern Recognition*
- ◆ Como resultado cada ponto (ou região) da cena é mapeado para um tema, classe ou rótulo ⇒ símbolos ou cores

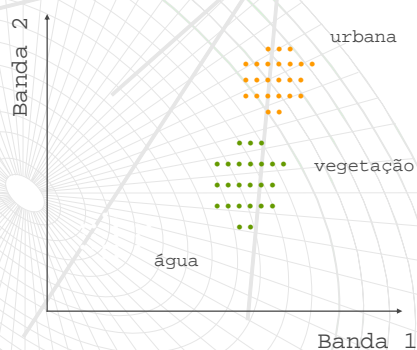




## Espaço de Atributos

Os elementos de imagem pertencentes a um mesmo objeto (classe) aparecem plotados como uma nuvem de pontos (aglomerado)

Os três aglomerados de pontos definem três diferentes alvos



## Tipos de classificadores

- Classificadores por **PIXEL**: classificam cada pixel isoladamente mapeando-os para uma classe baseando-se somente no seu valor
- Classificadores por **REGIÕES**: classificam regiões (um conjunto de pixels) mapeando todos os pixels que formam a região para uma mesma classe baseando-se no valor de todos os pixels que formam a região





## Tipos de Classificadores (outro critério)

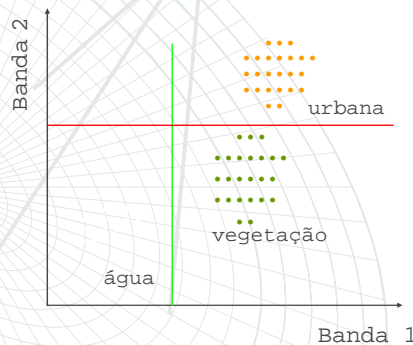
- ◆ **Classificadores supervisionados:** o usuário informa a-priori o conjunto de classes para as quais os pontos da imagem serão mapeados (Treinamento)
- ◆ **Classificadores não supervisionados:** o usuário não fornece nenhuma informação a priori relativa ao conjunto de classes para as quais deve-se mapear a imagem.

utiliza um algoritmo de agrupamento para determinar o número de classes diferentes presentes na imagem



## Projeto de um classificador

- ◆ O espaço de atributos é dividido em regiões de decisão correspondentes a classes distintas
- ◆ Identifica-se o ponto na imagem como pertencente a classe correspondente à região de decisão em que ele cai dentro



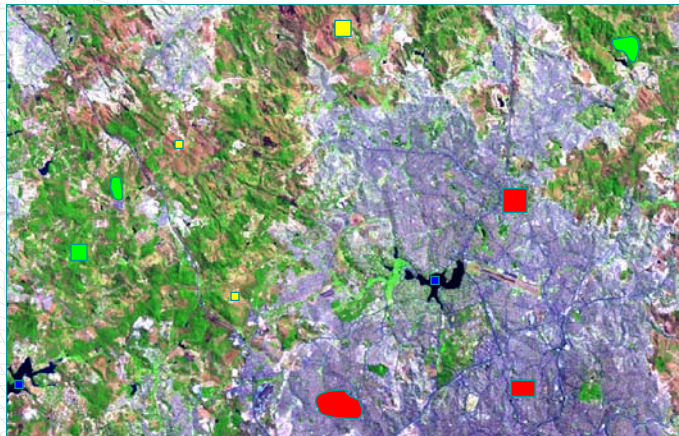


# Processo de treinamento

- ◆ Identificar amostras para cada uma das classes
- ◆ As amostras de uma classe devem ser homogêneas
- ◆ As amostras devem conter toda a variabilidade espectral esperada para a classe
- ◆ Analisar as amostras antes da classificação  $\Rightarrow$  grau de confusão entre as classes



# Treinamento



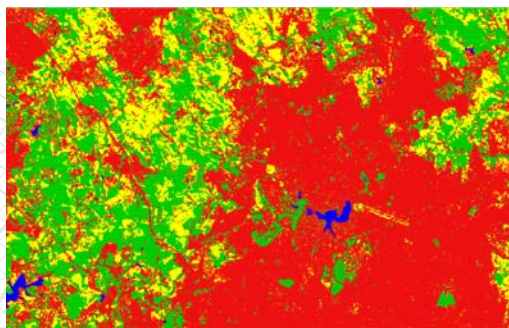
■ Cidade   ■ Vegetação   ■ Sem vegetação   ■ Água



## Análise de Amostras e Classificação

Matriz de Confusão do Tema	
cidade	98.93 %
solo	0.33 %
veg	0.74 %
agua	0.00 %
Rejection	0.00 %

Matriz de Confusão da Amostra	
Amostra2	98.45 %
Amostra3	0.12 %
Amostra15	1.43 %
agua	0.00 %
Rejeição	0.00 %



- Cidade
- Vegetação
- Sem vegetação
- Água



## Classificadores por pixel (SPRING)

- ♦ todos supervisionados:
  - **Maxver**: utiliza parâmetros estatísticos inferidos das amostras de treinamento como critério de decisão sobre a que classe um pixel pertence
  - **Maxver-ICM**: variação do MaxVer onde numa segunda etapa a informação contextual é levada em conta. Pixels são reclassificados de acordo com as classes atribuídas aos vizinhos
  - **Distância Euclidiana**: associa cada pixel à classe cuja distância euclidiana de seu valor ao valor médio da classe (obtido das amostras) seja mínimo



# Classificadores por pixel (SPRING)

- ◆ **Maxver:**

- É o método de classificação "pixel a pixel" mais comum. Considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos.

- É necessário um número razoavelmente elevado de *pixels*, para cada conjunto de treinamento.

Os conjuntos de treinamento definem o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade (Normal).

Representam a probabilidade de um pixel pertencer a uma ou outra classe, dependendo da posição do pixel em relação a esta distribuição.



# Classificador de MÁXima VERossimilhança MAXVER

- ◆ Cada classe é modelada por uma distribuição de probabilidade normal

classes:

$$W_i, i = 1, \dots, M$$

padrões:

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$$

para qualquer  $j \neq i, d(X, W_i) < d(X, W_j) \Rightarrow X \in W_i$

onde:

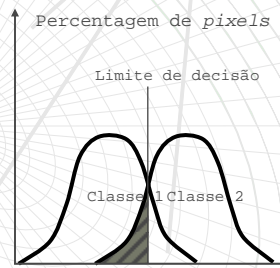
$$d(x, W_i)^2 = (x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i) + \ln |\Sigma_i|$$

\* Função discriminante, no jargão de RP, é a função que maximizada escolhe a classe para o ponto considerado.



# Classificadores por pixel (SPRING)

- ◆ **Maxver:**
  - Uma região onde as duas curvas sobrepõem-se, indicando que um determinado pixel tem igual probabilidade de pertencer a duas classes;
  - Nesta situação estabelece-se um critério de decisão a partir da definição de limiares.



# Classificadores por pixel (SPRING)

- ◆ **Maxver-ICM**
  - O classificador MAXVER-ICM (Iterated Conditional Modes) considera também a dependência espacial na classificação.
  - Após o **Maxver** aplica-se o ICM que leva em conta a informação contextual da imagem, ou seja, a classe atribuída depende tanto do valor observado nesse pixel, quanto das classes atribuídas aos seus vizinhos.
  - Este processo é finalizado quando a porcentagem de mudança (porcentagem de pixels reclassificados) definida pelo usuário, é satisfeita.





## A Classificação ICM (Modelo de Potts-Strauss)

- Em cada iteração cada coordenada é designada com a classe  $\xi \in \{0, \dots, K-1\}$  que maximiza:

$$f_{\xi}(z_s) * \exp(\beta \#\{t \in \partial_s : x_t = \xi\})$$

Maxver

Contexto

- $\beta$  pode ser estimado, ou usado fixo, para toda a imagem
- Se  $\beta \rightarrow 0$  tem-se Maxver
- Se  $\beta \rightarrow \infty$  tem-se a moda das classes
- Este método difere do anterior na medida em que o modelo provê uma distribuição a posteriori para a classe  $\xi$ .



## Classificadores por pixel (SPRING)

- Distância Euclidiana:**
  - classificação supervisionada, que utiliza esta distância para associar um "pixel" à uma determinada classe. através da análise da medida de similaridade de distância Euclidiana, que é dada por:

$$d(x, m) = \sqrt{(x - m)^2} / 2$$

- onde:
  - $x$  = "pixel" que está sendo testado
  - $m$  = média de um agrupamento
  - $N$  = número de bandas espectrais
- O classificador compara a distância Euclidiana do "pixel" à média de cada agrupamento.





## Pós-Classificação: refinamento

- ◆ Elimina pixels isolados
- ◆ Define-se um peso e um limiar
- ◆ Cada pixel é comparado com os seus vizinhos (3x3)
- ◆ Substitui o pixel pela classe de maior frequência nessa vizinhança
  - ◆ Exemplo: Peso 3 e Limiar 3

Imagem classificada original

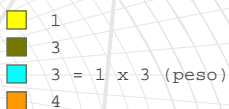
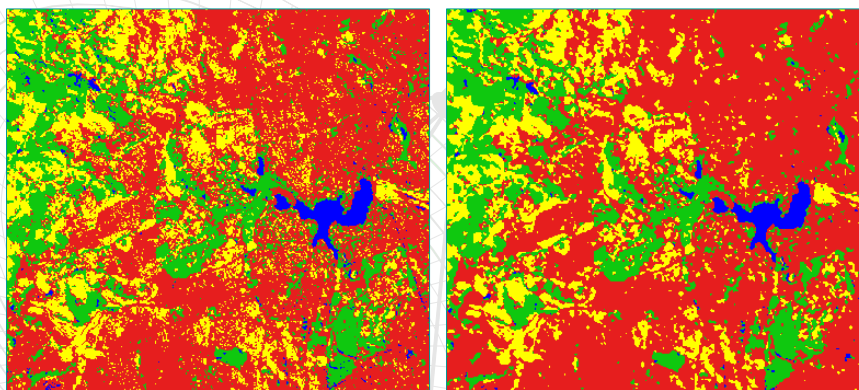


Imagem classificada modificada



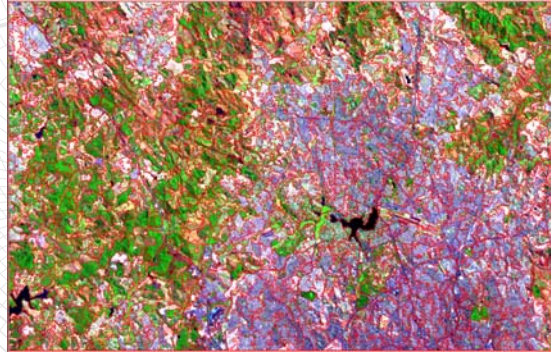
## Pós-Classificação: refinamento





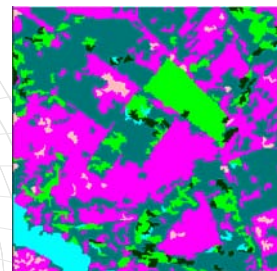
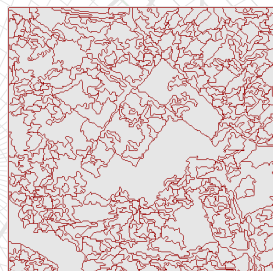
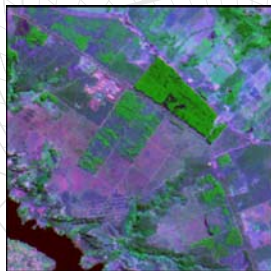
# Segmentação

- ◆ Segmentação: identifica as regiões homogêneas dentro da imagem
- ◆ Região: um conjunto de pixels contíguos bi-direcionalmente que possuem uma semelhança espectral
- ◆ São utilizados atributos estatísticos



# Classificação da segmentação

1. A cena é particionada em **regiões** que devem corresponder às áreas (objetos) de interesse da aplicação.
2. Cada região recebe um rótulo segundo suas características.





## Segmentação no SPRING



### ◆ Crescimento de regiões

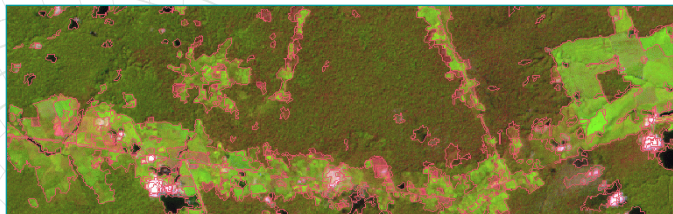
- Cada pixel é inicialmente rotulado como uma região
- Segundo um critério de similaridade regiões adjacentes vão sendo agrupadas
- O processo é repetido até que nenhum outro agrupamento possa ser feito

### ◆ Detecção de Bacias

- A classificação por detecção de bacias é feita sobre uma imagem resultante da extração de bordas.
- A extração de bordas é realizada por um algoritmo de detecção de bordas. O algoritmo calcula um limiar para a perseguição de bordas.
- Quanto maior a força da borda, maior é a dificuldade de uma região "vazar" para a outra.



## Crescimento de Regiões



TM-Landsat



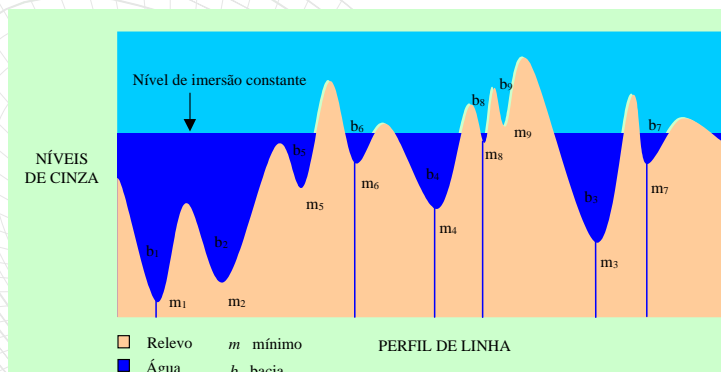
JERS-1







## I imagem representada como relevo



## Classificador de Regiões Supervisionado

- ◆ Segmenta-se a imagem.
- ◆ Para cada região calcula-se: vetor média e matriz de covariância.
- ◆ Calcula-se a distância  $B$  entre as classes de treinamento e cada região da cena.
- ◆ Associa-se cada segmento ou região à classe que for mais próxima em termos da distância  $B$ .



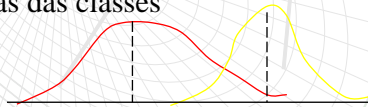
## Distância de Bhattacharyya

Mede a distância média entre as distribuições de probabilidade  $i$  e  $j$  (classes espectrais  $i$  e  $j$ )

$$B = \frac{1}{8} (m_i - m_j)^t \left\{ \frac{\Sigma_i + \Sigma_j}{2} \right\}^{-1} (m_i - m_j) + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{|\Sigma_i + \Sigma_j|}{|\Sigma_i|^{1/2} |\Sigma_j|^{1/2}} \right\}$$

Distância normalizada entre as médias das classes

Avalia a diferença entre as distribuições

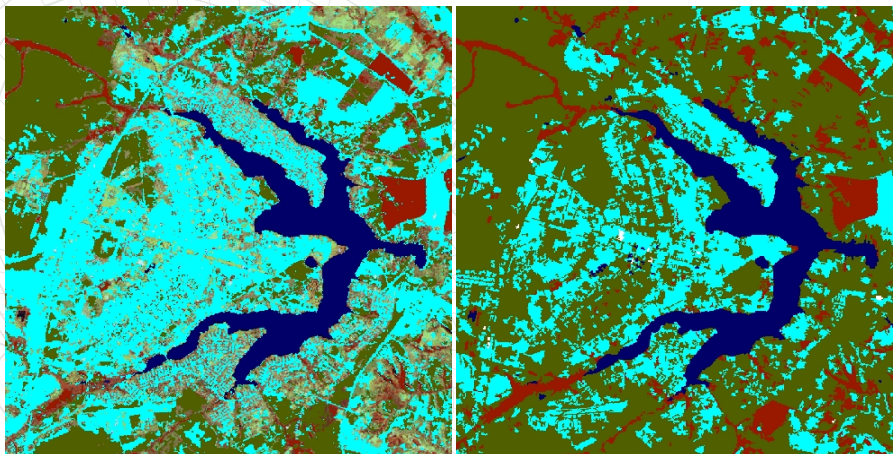


## Classificador não-supervisionado de Regiões (I SOSEG)

- ◆ Segmenta-se a imagem
- ◆ Para cada região calcula-se: vetor média, matriz de covariância e área
- ◆ Seleciona-se uma região ( $R$ ) como semente da classe (usa-se área para seleção) ( $\mu_R, \Sigma_R, A_R$ )
- ◆ Classificam-se as demais regiões usando-se a distância de Mahalanobis ( $DM$ ) entre o vetor de médias da região e a distribuição da classe.
- ◆ Quando uma região apresentar uma  $DM >$  certo limiar abre-se nova semente de agregado.
- ◆ Continua-se o procedimento para as regiões não classificadas e repete-se para o todo o conjunto até não mais haver mudanças de agregados.



# Classificação: pixel x região



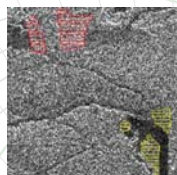
pixel

região



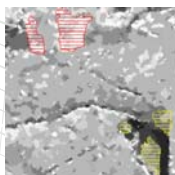
# Automatic Deforestation Detection

(Corregistered)

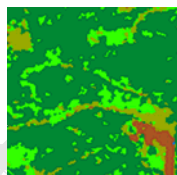


95

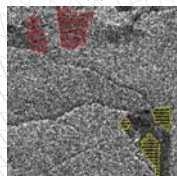
Original Images



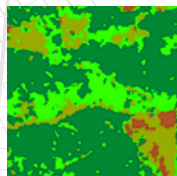
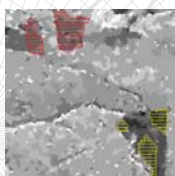
Segmentation after  
speckle reduction



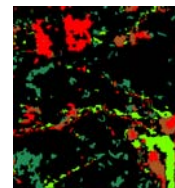
Land use/cover maps



96



Change Map



Deforestation

Conversion

Regeneration

- Pasture/soil
- Secondary Forest
- Dirty Pasture
- Forest/ Old Regeneration





## Fim introdução teórica

- ◆ Na seqüência:
- ◆ Um Segmentador flexível para radar e óticas - MultiSAR.





## SEGMENTADOR MultiSeg

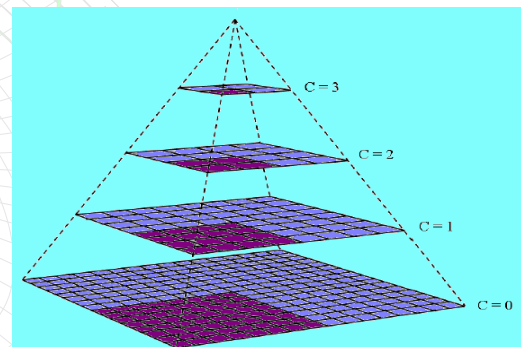
- ☞ Baseado em SOUSA Jr. (2005)
- ☞ SEGMENTADOR HÍBRIDO:
  - o Crescimento de regiões
  - o Agrupamento de regiões
  - o Refinamento de bordas
  - o Teste de homogeneidade de regiões
  - o Teste de homogeneidade entre regiões
  - o Teste de área mínima



## SEGMENTADOR MultiSeg

- MULTI-NÍVEIS (PIRÂMIDE HIERÁRQUICA)
  - o Compressão da imagem em N níveis

Exemplo para  $N=4$ .  
Cada *pixel* é formado pela  
média de 4 *pixels* da imagem  
um nível abaixo





## SEGMENTADOR MultiSeg

### ■ MULTI-MODELOS

#### ○ Modelo de manchas (cartoon)

- ❖ As regiões são homogêneas
  - imagem de radar → *backscatter* constante,  $\chi$  constante
  - imagem óptica → reflectância constante (ruído é responsável pela variância da região)

#### ○ Modelo de textura (texture)

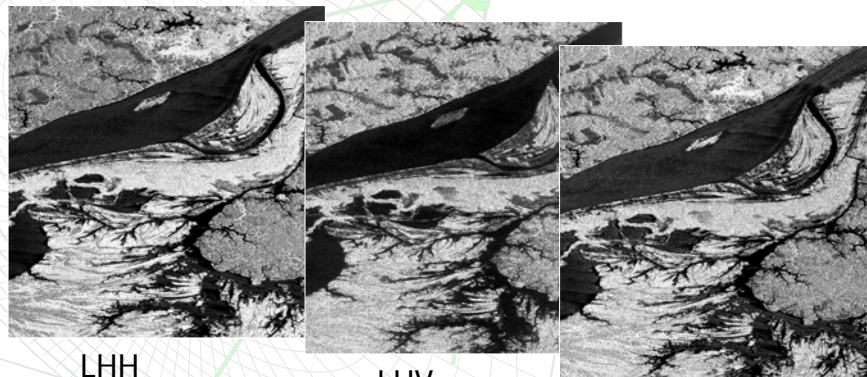
- ❖ As regiões são heterogêneas → variância em cada região depende do ruído e do alvo



## SEGMENTADOR MultiSeg

### ○ MULTI-BANDAS

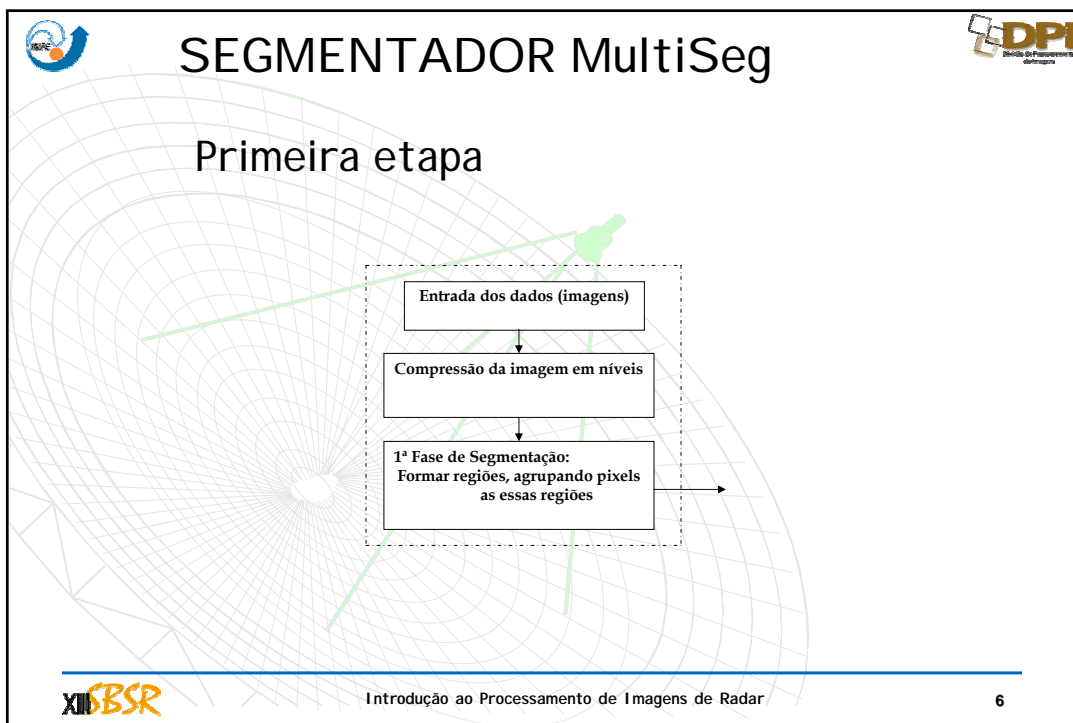
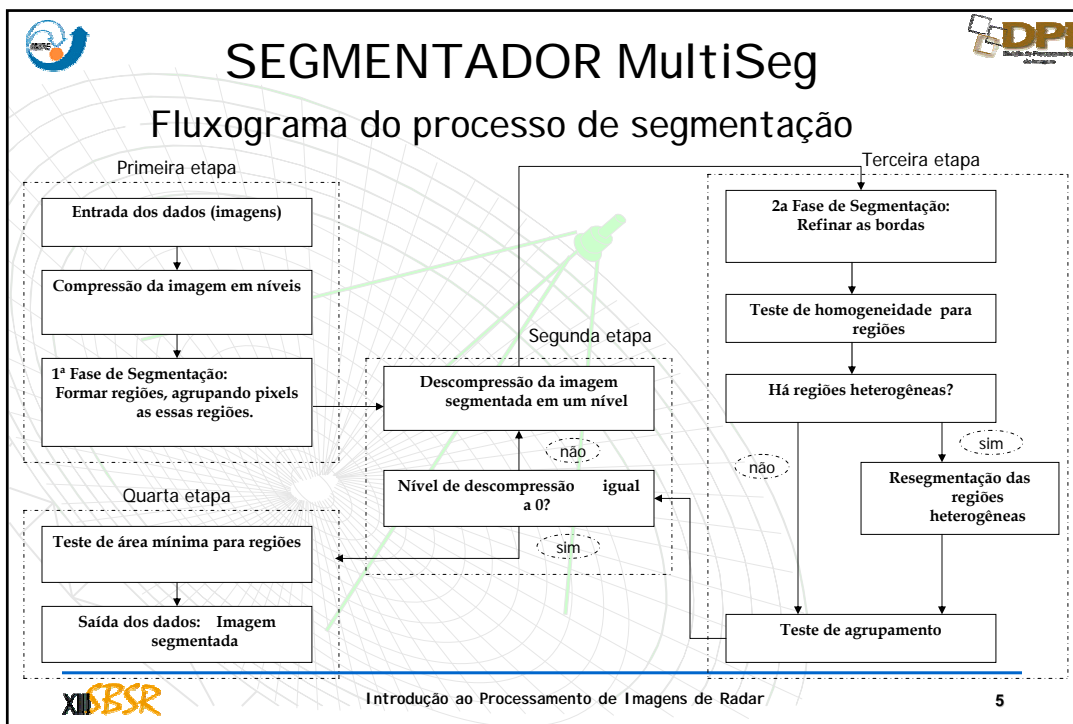
#### ○ Segmentar vários canais ou bandas




LHH


LHV

LVV





# SEGMENTADOR MultiSeg



SegSAR

Input Image

Loaded Images

rc02\_ml\_800int

Original Image Size	Levels	Compressed Image
Column: 800, Row: 1000	Levels: 5	Column: 25, Row: 31

Image Model Representation

Cartoon  Texture

Image Type

Radar  Optical

Segmentation Parameters

Similarity (dB): 1.00000, Minimum Area: 20, ENL: 1.00000, Conf (%): 95

Image for Segmentation

Original  PC

Image Format

Intensity  Amplitude  dB

start exit

o Interface principal do SegSAR: entrada dos parâmetros iniciais do nível 0

SegSAR

Input Image

Loaded Images

b3\_r\_tm\_13052002.tif (Band 1)  
b4\_r\_tm\_13052002.tif (Band 1)  
b5\_r\_tm\_13052002.tif (Band 1)

Original Image Size	Levels	Compressed Image
Column: 600, Row: 600	Levels: 5	Column: 37, Row: 37

Image Model Representation

Cartoon  Texture

Image Type

Radar  Optical

Parameters of Segmentation

Similarity: 17, Minimum Area: 20, Conf (%): 95.0000, CT: 0.300000


Image for Segmentation

Original  PC

Image Format


Intensity  Amplitude  dB

start exit




Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

7



# SEGMENTADOR MultiSeg



☞ Primeira etapa

Entrada dos dados (imagens)


↓

Compressão da imagem em níveis

↓

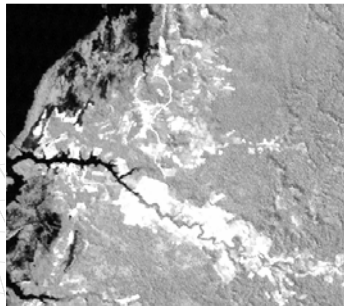
1ª Fase de Segmentação:  
Uso do limiar para agrupar pixel a pixel e para agrupar pixel à região

Imagens de Radar




SIR-C/X-SAR polarização HH

Imagens ópticas



TM Landsat – Banda 5



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

8



**SEGMENTADOR MultiSeg**

☞ Primeira etapa

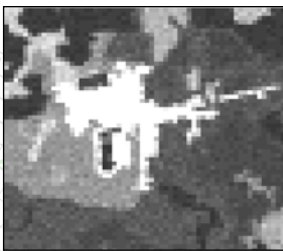
Entrada dos dados (imagens)

↓

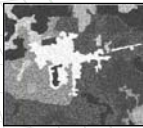
Compressão da imagem em níveis

↓

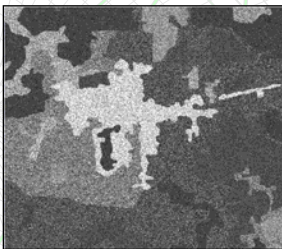
1ª Fase de Segmentação:  
Uso do limiar para agrupar regiões não visitadas (pixel) às regiões



Nível 3  
60 x 60 pixels



Nível 2  
120 x 120 pixels



Nível 1  
240 x 240 pixels

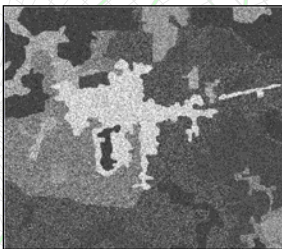



Imagem original  
480 x 480 pixels


Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
9

**SEGMENTADOR MultiSeg**

☞ Primeira etapa (Imagens de Radar)

- o Recálculo dos parâmetros do segmentador e da imagem para compatibilizar com o nível de compressão máximo  $C$ 
  - ☐ Diminui o limiar de similaridade (I)
 
$$Simil_C = Simil_0 \cdot f_C$$
  - ☐ Diminui o limiar do coeficiente de textura (para modelo T)
 
$$\hat{c}v_C^2 = \hat{c}v_0^2 \cdot f_C$$
  - ☐ Aumenta o número equivalente de looks
 
$$enl_C = enl_0 \cdot \frac{1}{f_C}$$

Entrada dos dados (imagens):  
Similaridade:  $simil_0$   
Coef. de variação:  $\hat{c}v_0$   
Nº eq. Looks:  $enl_0$

↓

Compressão da imagem em níveis


↓



1ª Fase de Segmentação:  
Uso do limiar para agrupar regiões não visitadas (pixel) às regiões

onde  $f_C$  vem da relação de variâncias:

$$\hat{\sigma}_C^2 = \hat{\sigma}_0^2 \cdot f_C$$

$$f_C = \frac{1}{2^{2c}} \left\{ 1 + 2 \left( 1 - \frac{1}{2^c} \right) \left[ \hat{\rho}(0,1) + \hat{\rho}(1,0) + \left( 1 - \frac{1}{2^c} \right) \hat{\rho}(1,1) \right] \right\}$$


Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
10

## SEGMENTADOR MultiSeg

☞ Primeira etapa (1 imagens Ópticas)

- o Recalculo dos parâmetros do segmentador e da imagem para compatibilizar com o nível de compressão máximo C
  - ☐ Diminui a similaridade
 
$$Simil_C = Simil_0 \cdot f_C$$
  - ☐ Diminui o coeficiente de textura (para modelo T)
 
$$\hat{c}t_C^2 = \hat{c}t_0^2 \cdot f_C$$

$$f_C = \frac{1}{2^{2c}} \left[ 1 + 2 \left( 1 - \frac{1}{2^c} \right) \left[ \hat{\rho}(0,1) + \hat{\rho}(1,0) + \left( 1 - \frac{1}{2^c} \right) \hat{\rho}(1,1) \right] \right]$$

Entrada dos dados (imagens):  
Similaridade:  $simil_0$   
Coef. de variação :  $\hat{c}t_0$

↓

Compressão da imagem em níveis


↓

1ª Fase de Segmentação:  
Uso do limiar para agrupar regiões não visitadas (pixel) às regiões

onde  $f_C$  vem da relação de variâncias



$$\hat{\sigma}_C^2 = \hat{\sigma}_0^2 \cdot f_C$$


---



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

11

## SEGMENTADOR MultiSeg

Matriz de posições (lexicográficas) para uma imagem 36 x 36 pixels

Entrada dos dados (imagens)

↓

Compressão da imagem em níveis

↓

1ª Fase de Segmentação:  
Uso do limiar para agrupar regiões não visitadas (pixel) às regiões

0	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17
18	19	22	21	22	23
24	25	26	27	28	29
30	31	32	33	34	35


2	2	8	8	4	4
1	2	8	8	4	4
9	4	5	6	9	9
4	8	9	9	6	8
2	3	7	8	3	7

$Simil_C = 1$

Vetor de posições = 

14	35	8	2	21	15	0	11	2	20	...	13
----	----	---	---	----	----	---	----	---	----	-----	----

---



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

12

**SEGMENTADOR MultiSeg**

Segunda etapa

```

    graph TD
      A[Nível de descompressão igual a 0?] -- não --> A
      A -- sim --> B[Descompressão da imagem segmentada em um nível]
      B --> C[ ]
  
```

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

13

**SEGMENTADOR MultiSeg**

Terceira etapa


o Refinamento das bordas

```

    graph TD
      A[2a Fase de Segmentação: Teste de borda (média de regiões)] --> B[Teste de homogeneidade para regiões]
      B --> C{Há regiões heterogêneas?}
      C -- sim --> D[Resegmentação das regiões heterogêneas]
      C -- não --> E[Teste de agrupamento]
      D --> E
      E --> F[ ]
  
```


Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

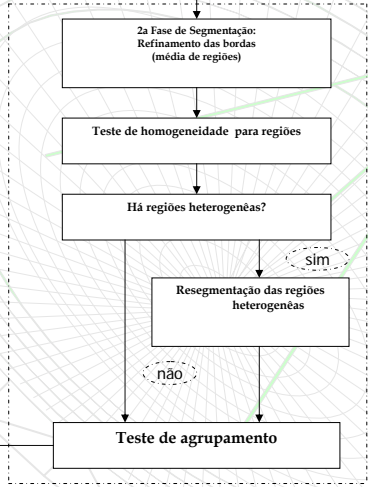
14

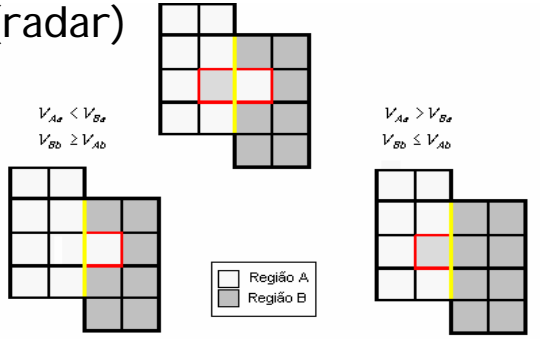


# SEGMENTADOR MultiSeg

## Terceira etapa(radar)







Onde: - Modelo cartoon


$$V_{Aa} = \frac{|p_{rA} - \bar{X}_{rA}|}{S_{rA}} \quad V_{Ba} = \frac{|p_{rA} - \bar{X}_{rB}|}{S_{rB}} \quad S_r^2 = \frac{\bar{X}_r^2}{nel_c}$$

$$V_{Bb} = \frac{|p_{rB} - \bar{X}_{rB}|}{S_{rB}} \quad V_{Ab} = \frac{|p_{rB} - \bar{X}_{rA}|}{S_{rA}} \quad S_r^2 = S^2$$

- Modelo textura


$$V_{Aa} = cv(r_A) \quad V_{Ba} = cv(r_A \cup \{p_{rB}\})$$

$$V_{Bb} = cv(r_B) \quad V_{Ab} = cv(r_B \cup \{p_{rA}\})$$




Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

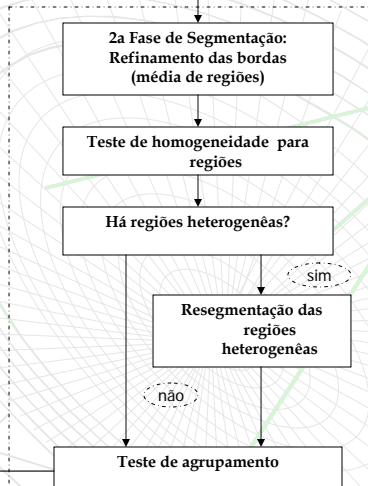
15

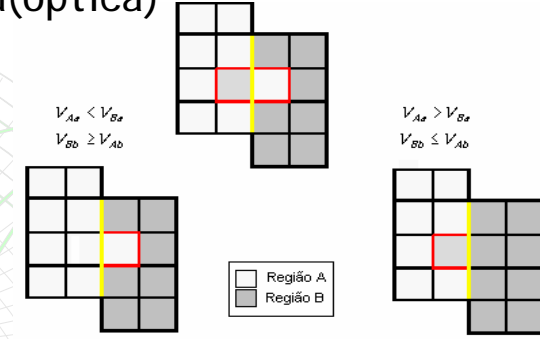


# SEGMENTADOR MultiSeg

## Terceira etapa(óptica)







Onde: - Modelo cartoon


$$V_{Aa} = \frac{|p_{rA} - \bar{X}_{rA}|}{S_{rA}} \quad V_{Ba} = \frac{|p_{rA} - \bar{X}_{rB}|}{S_{rB}} \quad S_r^2 = \frac{\bar{X}_r^2}{nel_c}$$

$$V_{Bb} = \frac{|p_{rB} - \bar{X}_{rB}|}{S_{rB}} \quad V_{Ab} = \frac{|p_{rB} - \bar{X}_{rA}|}{S_{rA}} \quad S_{rA}^2 = S_{rB}^2 = S^2$$

- Modelo textura

$$V_A = cv(r_A) \quad V_{Ab} = cv(r_A \cup \{p_{rB}\})$$


$$V_B = cv(r_B) \quad V_{Ba} = cv(r_B \cup \{p_{rA}\})$$




Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

16

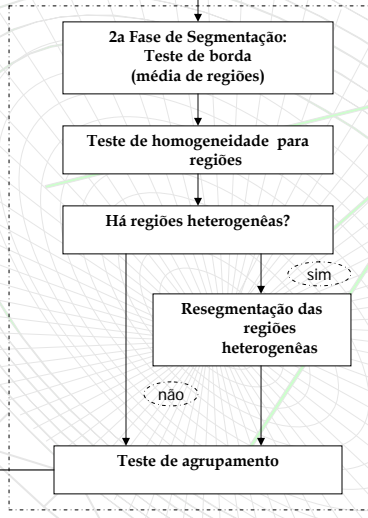





# SEGMENTADOR MultiSeg



## Terceira etapa




- o Teste de homogeneidade
  - ❖ Imagens de radar
    - $CV_{região} \leq CV_{crítico}$
    - ☐ Modelo de manchas -  $CV$  crítico da gama
    - ☐ Modelo de textura -  $CV$  crítico fornecido
  - ❖ Imagens ópticas
    - $ct_{região} \leq ct_{crítico}$
    - ☐ Modelo de manchas -  $ct$  crítico fornecido
    - ☐ Modelo de textura -  $ct$  crítico fornecido




Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

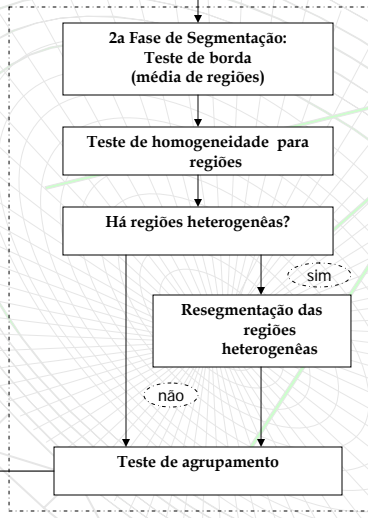
17




# SEGMENTADOR MultiSEG



## Terceira etapa




- o Testa homogeneidade entre regiões:
  - $t \leq t_{crítico}$
  - ❖ Condições para agrupar duas regiões:
    - Se  $|\bar{x}_A - \bar{x}_B| \leq Simil_{crítico}$  e  $CV(r_A \cup r_B) \leq CV_{crítico}$
  - ❖ Essas condições são usadas para imagens ópticas e para imagens de radar no modelo de mancha
  - ❖ Modelos de textura imagens de radar
    - $CV(r_A \cup r_B) \leq CV_{crítico}$




Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

18



# SEGMENTADOR MultiSEG

## Terceira etapa



2a Fase de Segmentação: Teste de borda (média de regiões)

Teste de homogeneidade para regiões

Há regiões heterogêneas?

Resegmentação das regiões heterogêneas

Teste de agrupamento

Testa homogeneidade entre regiões

	Modelo de manchas	Modelo de textura
Imagens de radar	Teste t homocedástico	Teste de CV
Imagens ópticas	Teste t homocedástico	Teste t heterocedástico


$$S_r^2 = \frac{\bar{X}_r^2}{nel_c}$$

$$S_r^2 = S^2$$

$$cv(r_A \cup r_B) \leq cv_{critico}$$


$$S_r^2$$

E o processo segue para a segunda etapa.




Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

19




# SEGMENTADOR MultiSEG

## Quarta etapa



Teste de área mínima para regiões

Compressão da imagem em níveis



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

20



# APLI CAÇÕES

- ☞ Imagens de radar simulada
  - ❖ Imagens Gama
    - ☑ 100 imagens com 3 *looks*
    - ☑ 100 imagens com 8 *looks*
  - ❖ Imagens com Textura
    - ☑ 100 imagens com 3 *looks*
    - ☑ 100 imagens com 8 *looks*
- ☞ Imagens de radar
  - ❖ Banda X
  - ❖ *Jers*
- ☞ Imagens ópticas
  - ❖ Imagem *TM/Landsat*
  - ❖ Imagem *ETM+/Landsat*



# APLI CAÇÕES

## ☞ Processo de segmentação em 5 níveis de compressão

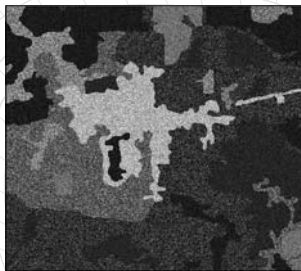
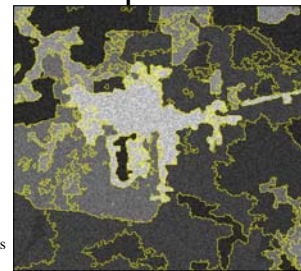
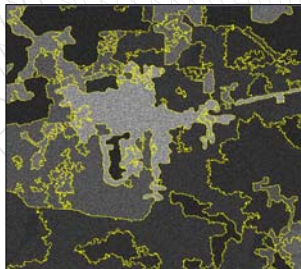


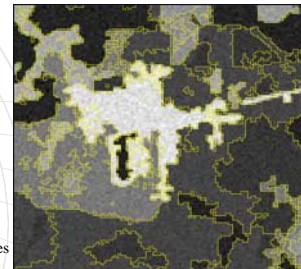
Imagem 8 *looks*



Nível C = 1 (240 x 240 pixels) 750 regiões



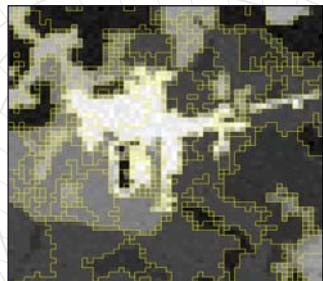
Nível C = 0 (480 x 480 pixels) 144 regiões



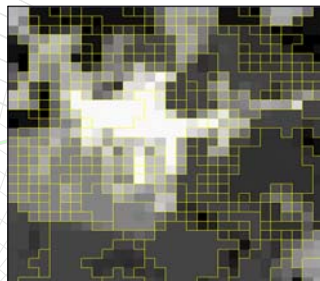
Nível C = 2 (120 x 120 pixels) 687 regiões



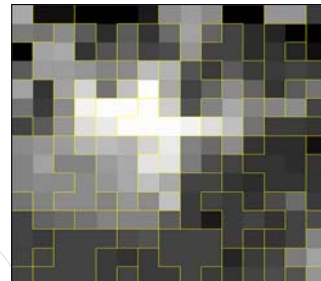
# APLI CAÇÕES



Nível C = 3 (60 x 60 pixels) 643 regiões



Nível C = 4 (30 x 30 pixels) 406 regiões



Nível C = 5 (15 x 15 pixels) 82 regiões

Parâmetros	Níveis					
	C = 0	C = 1	C = 2	C = 3	C = 4	C = 5
Similaridade	3916,11	2825,81	1005,62	293,07	78,74	20,38
Nel	8,00	11,08	31,15	106,89	250,00	250,00



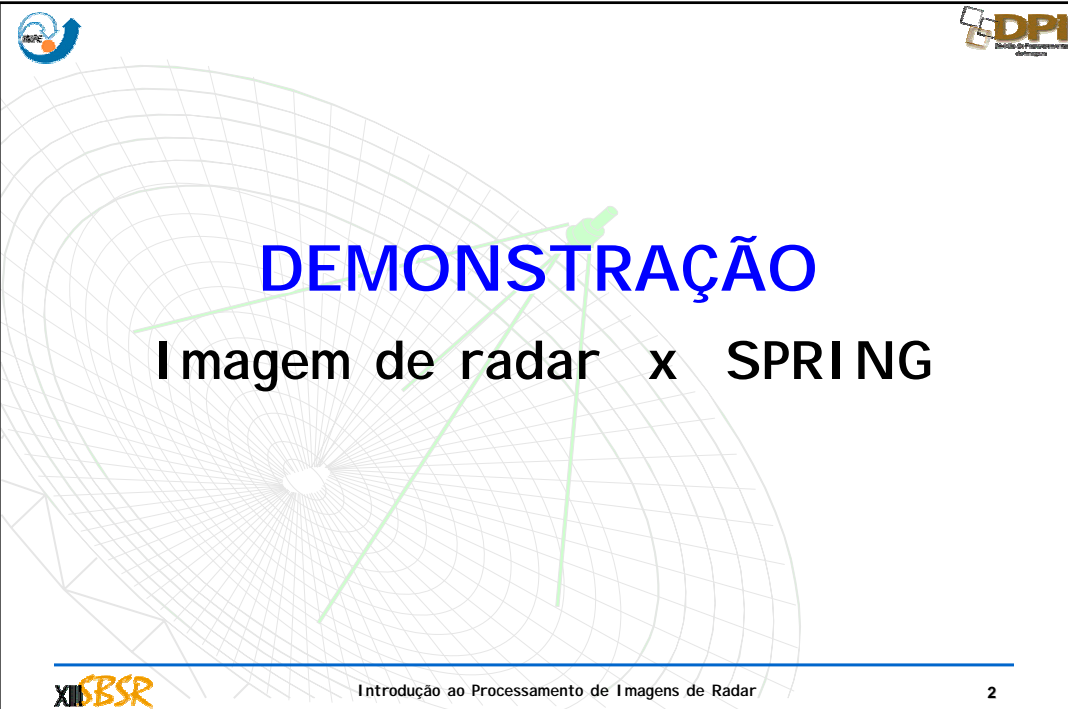






# Sensoriamento Remoto por Microondas

---

 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 1






# DEMONSTRAÇÃO

## Imagem de radar x SPRING

---

 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 2



## A IMAGEM

- ☞ **Tamanho:** número de linhas e colunas
- ☞ **Resolução espacial:** também utilizada a medida ou o tamanho do pixel
- ☞ **Tipo de imagem:** amplitude ou intensidade
- ☞ **Número de looks da imagem**

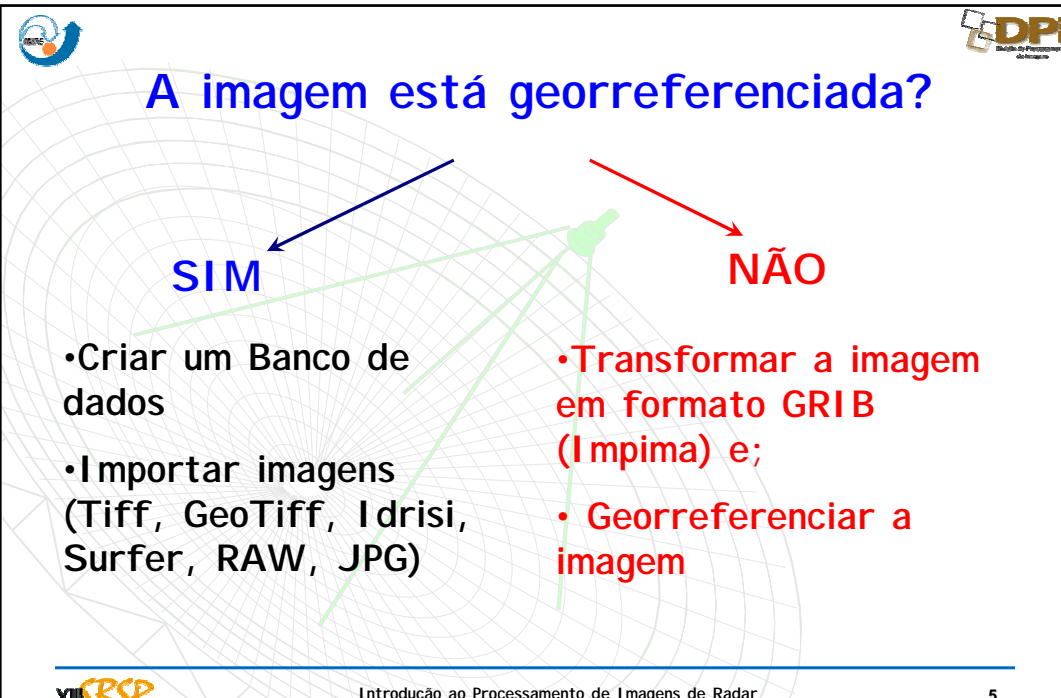


## SPRING

- ☞ **Módulo Impima:** transforma imagens de diferentes formatos para o formato GRB
- ☞ **Módulo SPRING:** possui as funções de um aplicativo para geoprocessamento e para processamento de imagens digitais
- ☞ **Módulo SCarta:** permite a geração de mapa de acordo com as necessidades do usuário
- ☞ **Módulo IPlot:** gera arquivos específicos para plotagem dos mapas gerados no SCarta



**SPRING**  
Sistema de Processamento de  
Informações Georeferenciadas



**A imagem está georreferenciada?**


**SIM** (indicated by a blue arrow pointing to the left side of the grid)

**NÃO** (indicated by a red arrow pointing to the right side of the grid)

- Criar um Banco de dados
- Importar imagens (Tiff, GeoTiff, Idrisi, Surfer, RAW, JPG)

- Transformar a imagem em formato GRIB (Impima) e;
- Georreferenciar a imagem

**XII FBSR**      Introdução ao Processamento de Imagens de Radar      5



**A imagem está georreferenciada?**

**SIM** (indicated by a blue arrow pointing to the left side of the grid)

- Criar um Banco de dados

**Banco de Dados**

Diretório... C:\VALESSANDRA\INPE

Banco de Dados

Bd\_CURSO

Nome: Bd\_CURSO

Gerenciador: DBase

Banco de Dados corrente Bd\_CURSO

**XII FBSR**      Introdução ao Processamento de Imagens de Radar      6

**DPI**  
Divisão de Processamento de Imagens de Radar

## A imagem está georreferenciada?

• Importar imagens:  
Tiff,  
GeoTiff,  
I drisi,  
Surfer,  
SITIM,  
RAW, JPEG

**XIII CBSR**      Introdução ao Processamento de Imagens de Radar      7

**DPI**  
Divisão de Processamento de Imagens de Radar

## A imagem está georreferenciada?

**NÃO**

• Transformar a imagem em formato GRIB (Impima) e;

**TIFF  
RAW  
DAT**

O Módulo **Impima** abre estes tipos de extensões e as transforma em arquivos GRB

**XIII CBSR**      Introdução ao Processamento de Imagens de Radar      8



**A imagem está georreferenciada?**


**NÃO**



**Georreferenciar a imagem**


**XII FBSR** Introdução ao Processamento de Imagens de Radar **9**

**Banco de Dados - SPRING**


**XII FBSR** Introdução ao Processamento de Imagens de Radar **10**



**Imagem JERS**  
 de parte da  
 Floresta  
 Nacional do  
 Tapajós  
 (FLONA),  
 administrada  
 pelo IBAMA








 DPI  
 Instituto de Processamento  
 de Imagens

---



 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
 11


**Imagem TM**  
 de  
 parte da  
 Floresta  
 Nacional do  
 Tapajós  
 (FLONA),  
 administrada  
 pelo IBAMA


 DPI  
 Instituto de Processamento  
 de Imagens

---


 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
 12



# Processamentos digitais

Contraste

Filtragem

Classificação

Segmentação

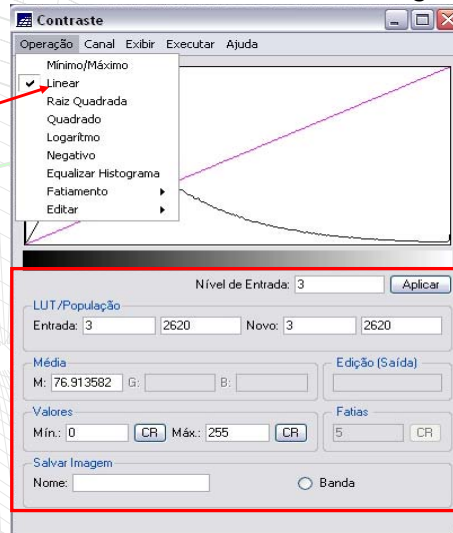


## Contraste

### Janela de contraste de imagens

Operações que podem ser realizadas a partir do histograma da imagem:

- mínimo máximo
- Linear
- Raiz quadrada
- Quadrado
- Logaritmo
- Negativo
- Equalização do histograma
- Fatiamento
- Edição



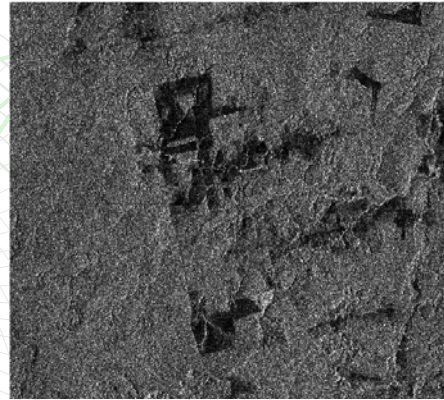
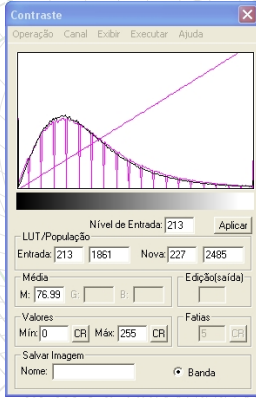
Parâmetros da imagem obtidos a partir do histograma apresentado





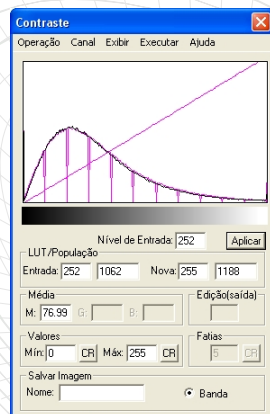
# Contraste de imagem

## Aplicação de contraste mínimo / máximo



# Contraste de imagem

## Aplicação de contraste linear

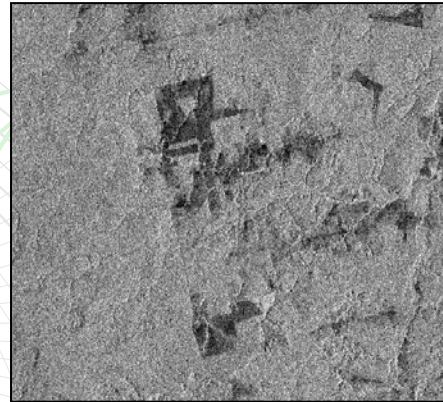
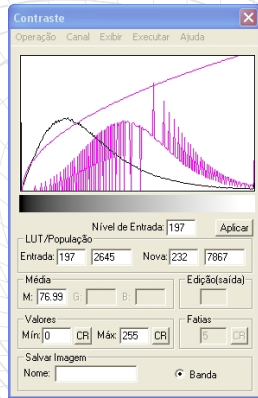






## Contraste de imagem

### Aplicação de contraste raiz quadrada

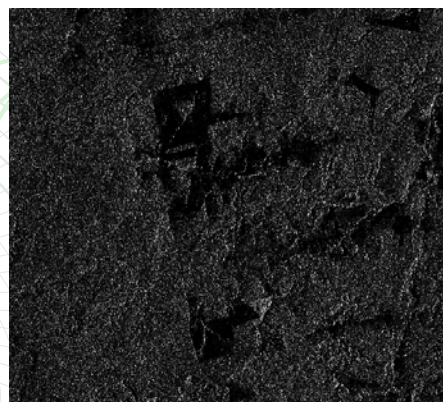
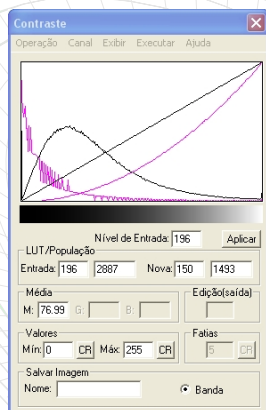


O contraste por raiz quadrada visa aumentar o contraste das regiões escuras da imagem original e se mostrou satisfatório para a imagem de radar por tender a uma curva Gaussiana, que mais se assemelha à distribuição desse tipo de imagem



## Contraste de imagem

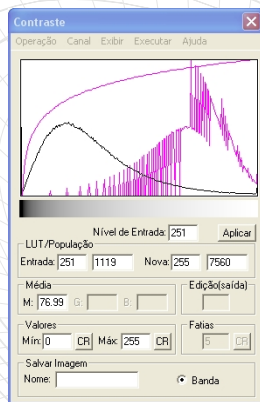
### Aplicação de contraste quadrado





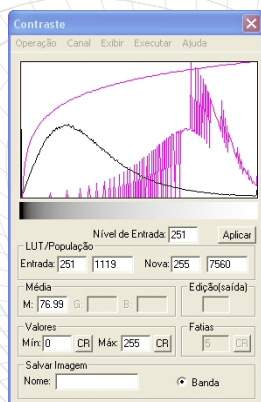
# Contraste de imagem

## Aplicação de contraste logarítmico



# Contraste de imagem

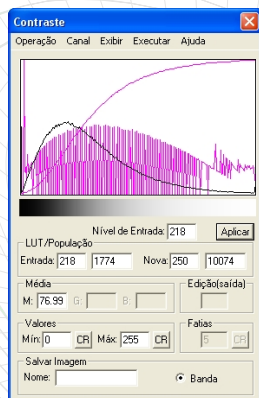
## Aplicação de contraste negativo





# Contraste de imagem

## Aplicação de contraste equaliza histograma



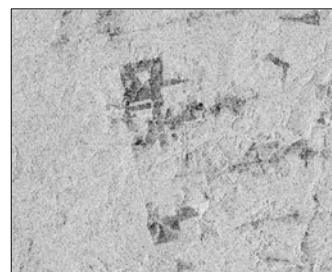
# Contraste de Imagens



Mínimo / Máximo



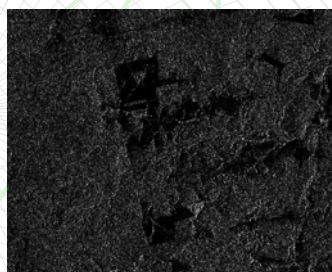
Linear



Logaritmo



Raiz quadrada





Quadrado



Negativo



## Filtragem

### Janela de filtros lineares

**Filtros lineares**  
O filtros servem para suavizar ou realçar detalhes da imagem, ou ainda, minimizar efeitos de ruído.

Pode-se definir o número de iterações para o filtro aplicado

Tipo:  Linear  Não Linear  Radar

Filtros Lineares

Passa Baixa-Média

Direcional de Borda

Não Direcional de Borda

Realce de Imagem TM

Máscaras

3x3

PI de Saída


Nome:

Retângulo Envolvente...

No de Iterações:



O sistema provê algumas máscaras pré-definidas (3x3, 5x5 ou 7x7) para a aplicação de cada tipo de filtro. Qualquer outro tamanho pode ser elaborado de acordo com a necessidade do usuário

Deve-se definir um nome para a imagem de saída



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

23

## Filtragem

### Janela de filtros não lineares

**Filtros não lineares**  
Alteram a imagem, sem diminuir sua resolução. Servem para minimizar/realçar ruídos e suavizar/realçar bordas

Filtros disponíveis:

- Detecção de bordas
- Morfológico - dilatação
- Morfológico - mediana
- Morfológico - erosão
- Máscaras

Tipo:  Linear  Não Linear  Radar

Filtros Não Lineares

Detecção de Bordas

Morfológico-Dilatação

Mediana

Morfológico-Erosão

Máscaras


Sobel

PI de Saída

Nome:

Retângulo Envolvente...

No de Iterações:



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

24





# Filtragem

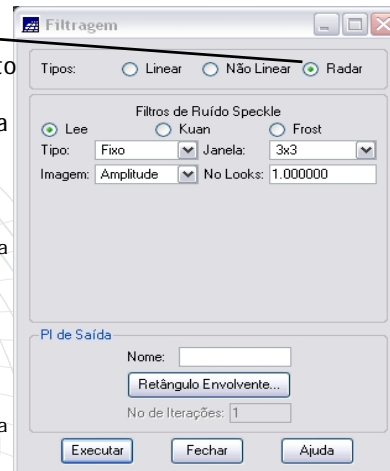
## Janela de filtros radar

### Filtros para radar

Utilizados para a redução do ruído Speckle e para aumento da relação sinal-ruído, objetivando uma melhoria na separabilidade entre os alvos da superfície, com a mínima perda de informação

### Filtros disponíveis:

- **Filtro de Frost:** filtro convolucional linear, específico para imagens de radar para diminuir o ruído *speckle*, onde a dependência estatística do sinal original é incorporada, uma vez que se supõe uma função de correlação espacial exponencial entre *pixels*.
- **Filtro de Lee:** filtro local, específico para imagens de radar, que utiliza estatísticas locais do *pixel* a ser filtrado, considerando a não estacionaridade da média e da variância do sinal. É um filtro linear que pode ser adaptativo.
- **Kuan:** modelo multiplicativo, semelhante ao Lee, sem nenhuma aproximação. Também um filtro adaptativo e geral.



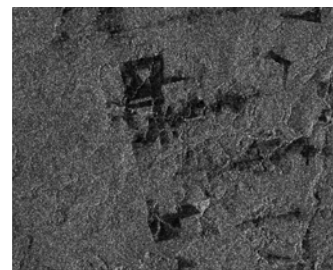
# Imagens filtradas



IMAGEM ORIGINAL



Média



Lee



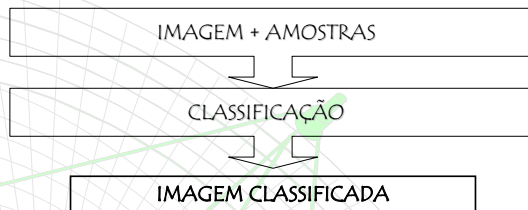
Kuan



Frost



## Classificação pixel a pixel



O processo de classificação consiste em um conjunto de etapas:

- Criação do arquivo de **contexto** (define a (s) imagem (s) utilizadas para o processo)
- **Treinamento** (auxilia na coleta de amostras ou recuperação de amostras previamente definidas)
- **Classificação** (seleciona o classificador e os limiares)

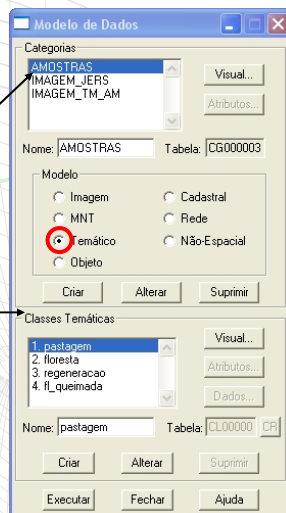


## Definir as amostras

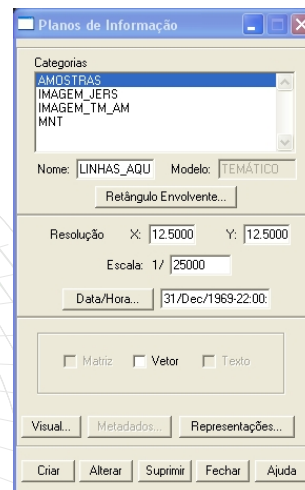


Para se trabalhar com dados vetoriais, deve-se:

1. Criar uma Categoria TEMÁTICO com as classes desejadas



2. Criar um PI AMOSTRAS



3. Clicar em Temático- Edição Vetorial





# Definir as amostras



**Edição** é utilizada para fazer as linhas, pontos, polígonos a **Verificação** é utilizada para conferir os vetores

Exibe a área do PI que será editado, bem como os nós ajustados ou não ajustados

Modos **Passo** ou contínuo, determinam como será o processo de digitalização (pontos por clique ou linhas por clique).

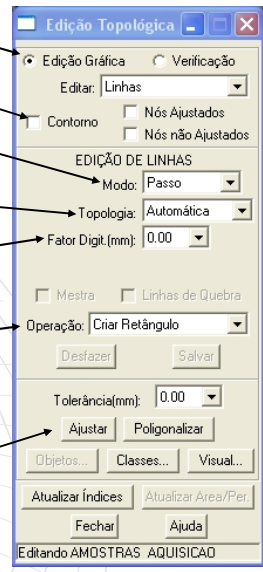
Topologia: Manual ou **Automática** de acordo com a interação do próprio SIG no processo de formação de vetores.

Varia de 0.0 a 2.0. Selecione **0.1** pois este valor significa que numa escala 1:50 000, por exemplo, 1 mm equivale a 50 m e 0,1 mm equivalem a 5m

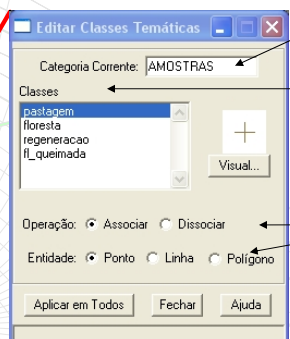
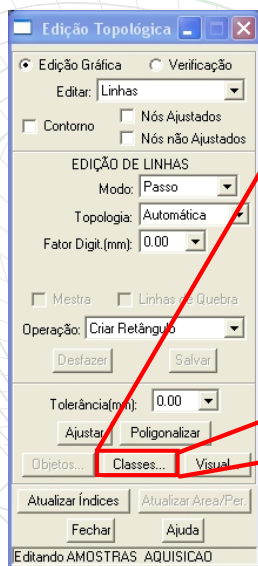
Existem muitas operações que podem ser realizadas e serão abordadas. Para a coleta de amostras, utilizou-se o "criar retângulo"

Sempre que finalizar uma linha ou a cada intervalo de tempo, salvar os dados. Caso tenha cometido algum erro e quiser apagar a última ação, clicar em desfazer (=undo)

Ao finalizar a(s) linha(s), clicar em **Ajustar**: permite verificar se os nós dos polígonos estão corretamente digitalizados e **Poligonalizar** permite gerar, a partir da linha fechada, o POLIGONO.



# Definir as amostras



**Categoria corrente:** indica de que categoria estão sendo recuperadas as classes

Lista de **classes** presentes na categoria corrente, com as configurações visuais configuradas

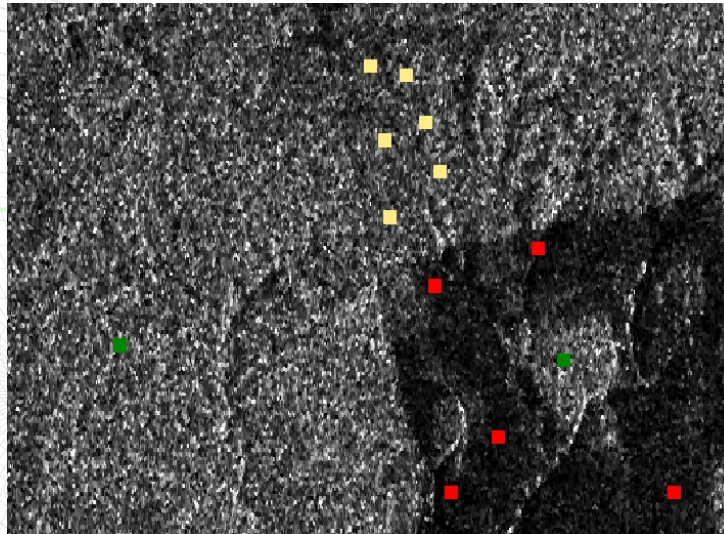
Operação: **Associar** ou Dissociar uma classe, de acordo com a entidade (ponto/linha/polígono) desejada



## Definição das áreas amostradas



Imagem JERS e amostras definidas a partir de informações de campo e de imagens óticas



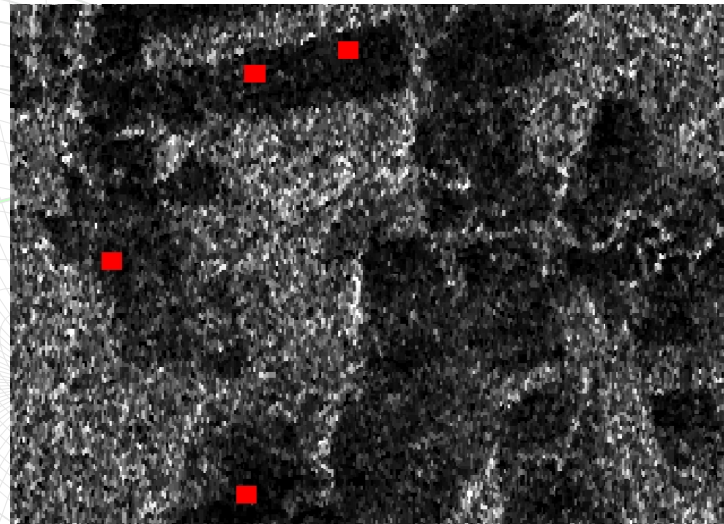
○ - floresta   ○ - regeneração   ○ - pastagem



## Definição das áreas amostradas



Imagem JERS e amostras definidas a partir de informações de campo e de imagens óticas



○ - floresta   ○ - regeneração   ○ - pastagem

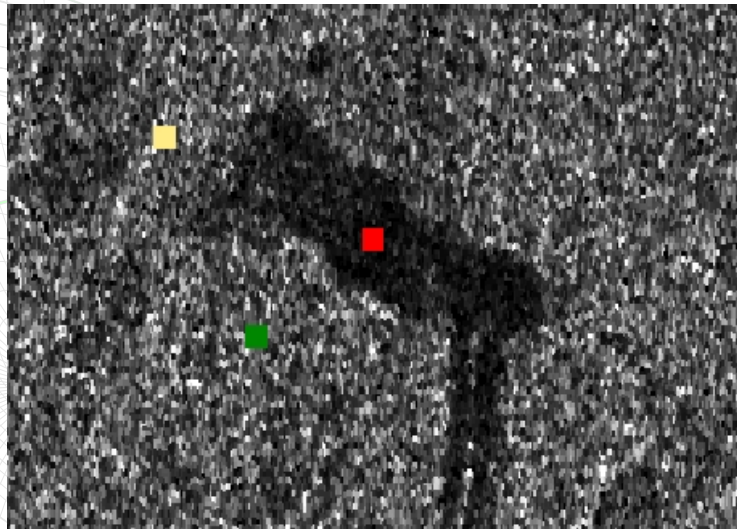






## Definição das áreas amostradas

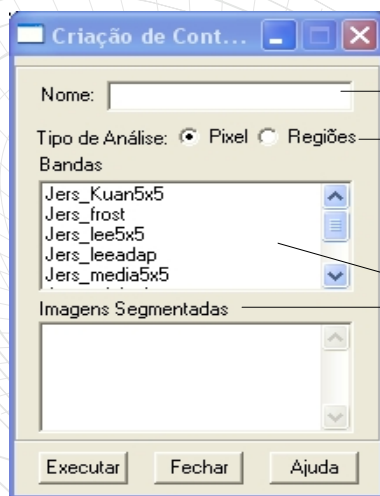
Imagem JERS e amostras definidas a partir de informações de campo e de imagens óticas



○ - floresta   ○ - regeneração   ○ - pastagem



## Criação do Arquivo de Contexto



Nome que será definido ao contexto

Se o objetivo for uma classificação por pixel ou se a imagem classificada partir de uma imagem segmentada por regiões

Lista de bandas e imagens segmentadas que serão utilizadas durante a classificação



## Treinamento

Parâmetros das classes (nome, cor)

Importa as amostras já desenhadas e com classe (Edição Vetorial)

Classificação das amostras em **AQUISIÇÃO** ou **TESTE**, de acordo com o usuário

Alterações permitidas às amostras

Exportação das amostras geradas dentro do treinamento permite gerar arquivos vetoriais e diferenciá-las de acordo com a utilidade (aquisição/teste)

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
35

## Classificação

Lista de imagens classificadas no mesmo arquivo de contexto

Nome da imagem a ser gerada



Ao criar a imagem, a opção de **analisar as amostras** se torna disponível

Classificadores disponíveis: **Maxver** - Maxver1 CM - Distância Euclidiana - Kmédias

Representam a porcentagem de "pixels" da distribuição de probabilidade de uma classe que será classificada como pertencente à esta classe

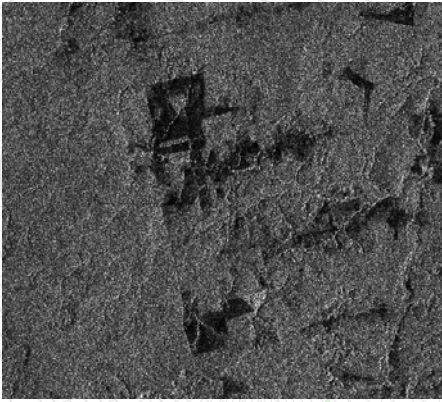
**Analisa as amostras** gerando uma matriz de confusão com valores de Kappa e variância de Kappa para cada classe de amostra

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
36





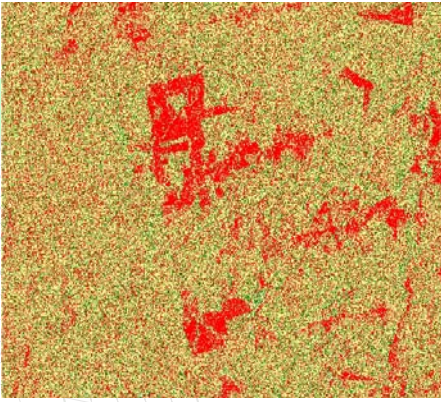
## Classificação de imagem

### Maxver




I imagem original







I imagem classificada  
(MaxVer)


---


Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
37





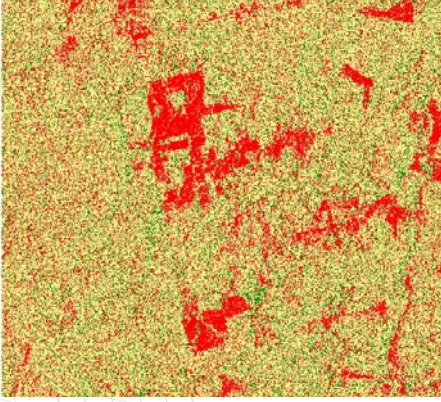
## Classificação de imagem

### Maxver - ICM




I imagem original





I imagem classificada  
(MaxVer-ICM)

---


Introdução ao Processamento de Imagens de Radar
38





A utilização de filtros  
tornariam melhores os  
resultados das classificações?



## Classificação de imagem

Filtrada - Média



Imagem filtrada média

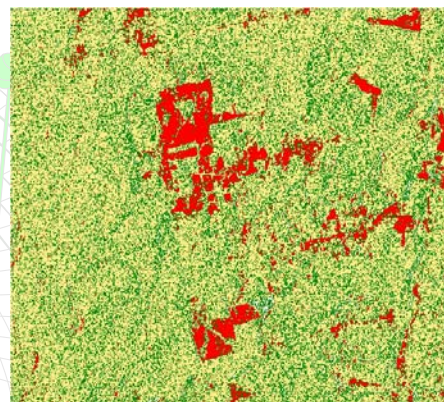


Imagem classificada  
(MaxVer)



**Classificação de imagem**  
Filtrada - Média




Imagem filtrada média

➔

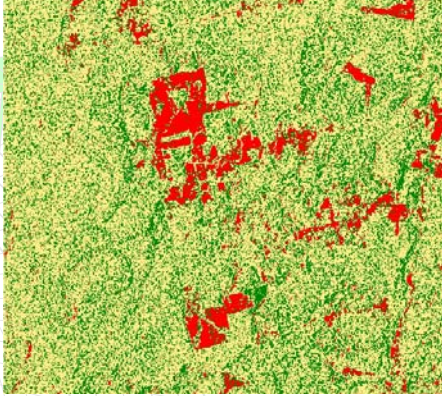




Imagem classificada  
(MaxVer-ICM)

---



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar



41

**Classificação de imagem**  
Filtrada - Lee




Imagem filtrada Lee

➔

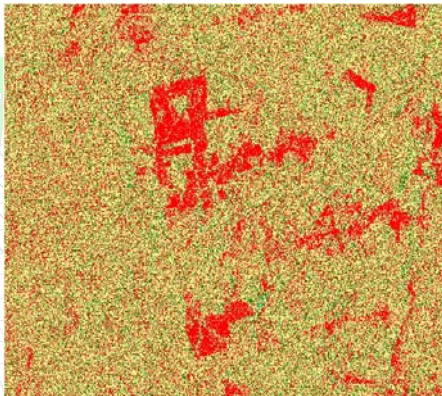




Imagem classificada  
(MaxVer)



---



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar



42

 **Classificação de imagem**  
Filtrada - Lee 



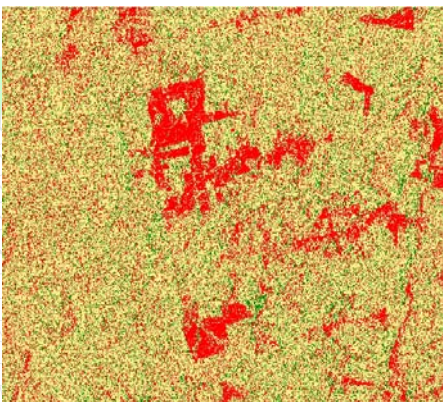



  

Imagem filtrada Lee      Imagem classificada (MaxVer-1 CM)

---

 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 43

 **Classificação de imagem**  
Filtrada - Frost 

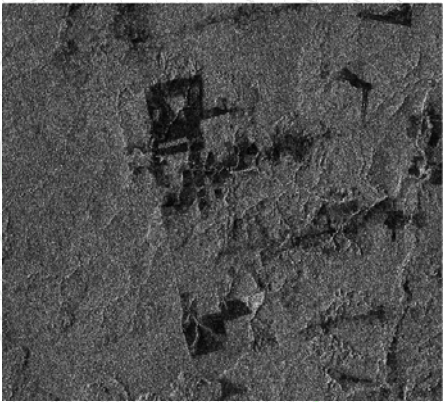

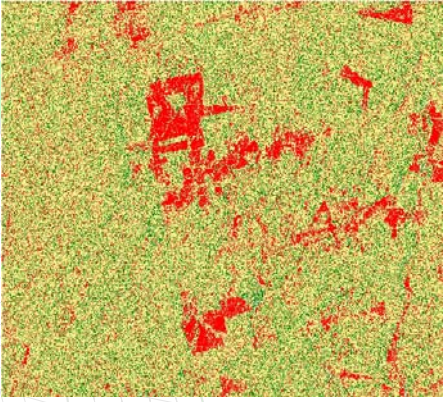



  

Imagem filtrada Frost      Imagem classificada (MaxVer)

---

 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 44



 **Classificação de imagem**  
Filtrada - Frost 



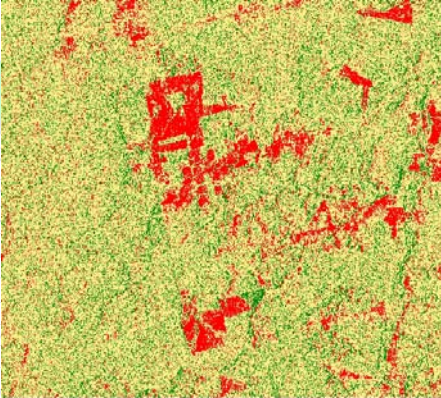



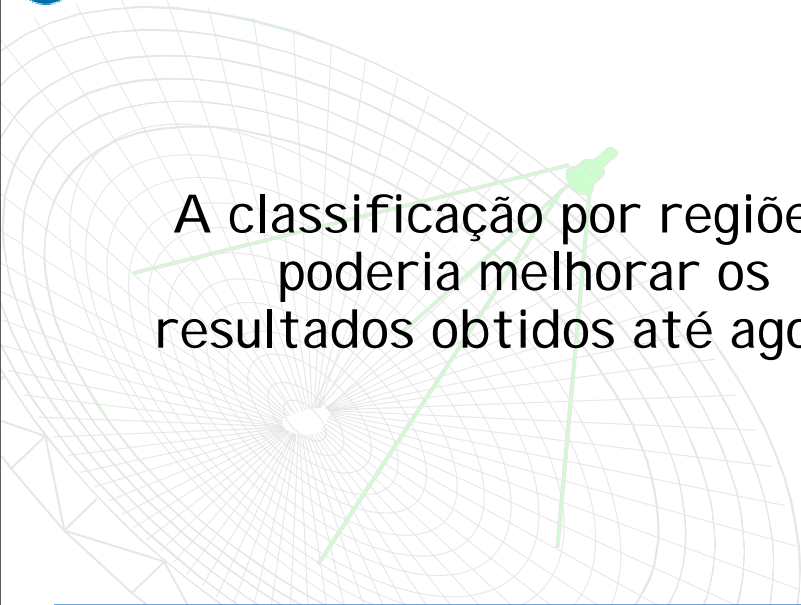
  

Imagem filtrada Frost      Imagem classificada (MaxVer-ICM)


---

 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 45

 **A classificação por regiões**  
poderia melhorar os  
resultados obtidos até agora? 



---

 Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 46

**DPI**  
Divisão de Processamento de Imagens de Radar

## Classificação por regiões

```

    graph TD
      A[IMAGEM ORIGINAL] --> B[SEGMENTAÇÃO]
      B --> C[CLASSIFICAÇÃO]
      C --> D[IMAGEM CLASSIFICADA]
      E[Definição de limiares para segmentação] --> A
  
```

A partir da imagem original, alguns parâmetros estatísticos foram calculados para auxiliar na definição dos limiares (similaridade e área de pixel) para a segmentação

---

**XIII FBSR** Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 47

**DPI**  
Divisão de Processamento de Imagens de Radar

## Segmentação por regiões

**Lista de bandas de imagens para a segmentação**

**Métodos de segmentação:**

- Crescimento de regiões: técnica de agrupamento de dados, na qual somente as regiões adjacentes, espacialmente, podem ser agrupadas
- Detecção de bacias: feita sobre uma imagem resultante da extração de bordas

**Área de pixel:** valor inteiro e maior que zero que representa o tamanho mínimo, em pixel, que representará uma região segmentada

**Similaridade:** valor inteiro e maior que zero, que será usado como limite para de similaridade entre os níveis de cinza da imagem

**Banda de exclusão:** banda que não será considerada durante o processo de segmentação. Serve para definir regiões onde não se deseja segmentar a imagem escolhida

**Suavização de arcos:** caso o usuário pretenda suavizar as bordas dos segmentos

---

**XIII FBSR** Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 48

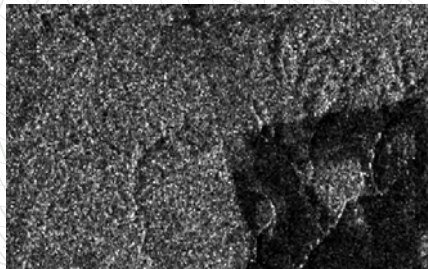




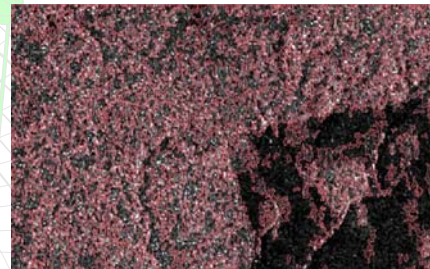
## Segmentação por regiões



Imagem segmentada



JERS original



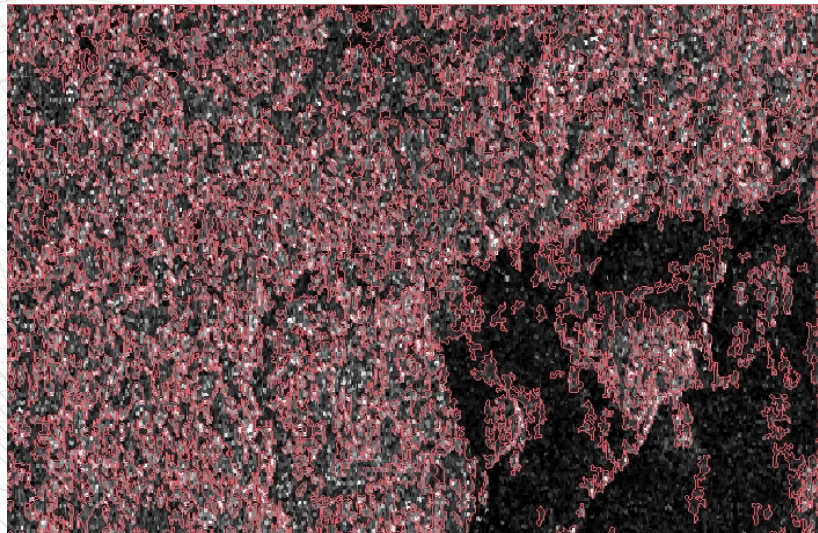
JERS segmentada  
Limiares:  
Área de pixel = 25  
Similaridade = 20



## Segmentação por regiões



Imagem segmentada (detalhe)

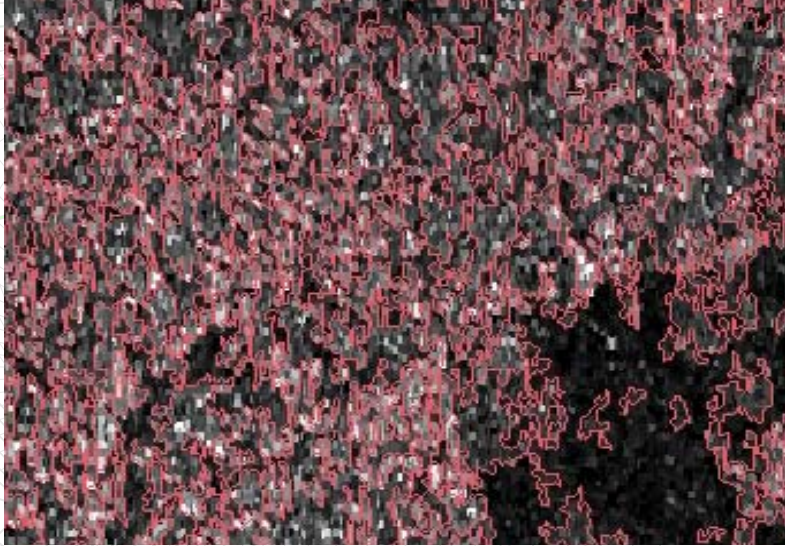




## Segmentação por regiões



Imagem segmentada (detalhe)



## Classificação de imagem



Classificador Batthacharrya (por regiões)

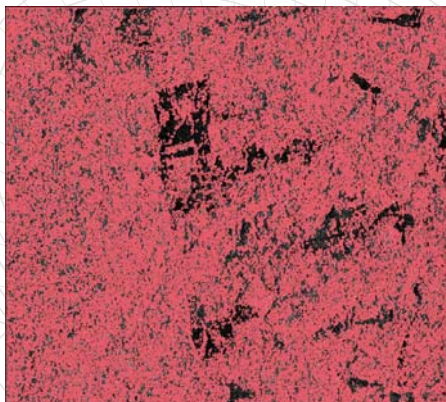


Imagem original segmentada

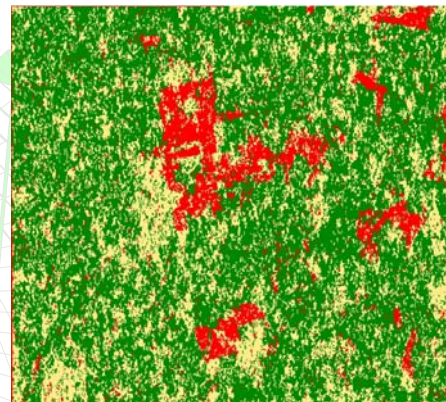


Imagem original classificada (Batthacharrya)





## Classificação de imagem

Classificador Batthacharrya (por regiões)

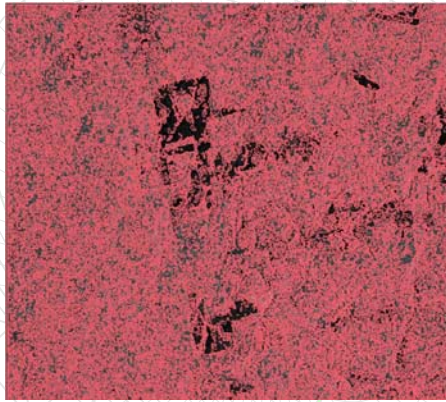


Imagem filtrada pela média e segmentada

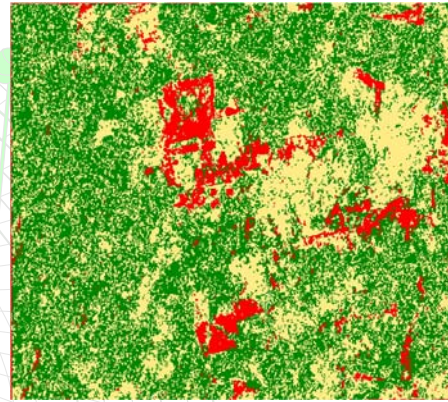


Imagem Filtro média classificada (Batthacharrya)



## Classificação de imagem

Classificador Batthacharrya (por regiões)

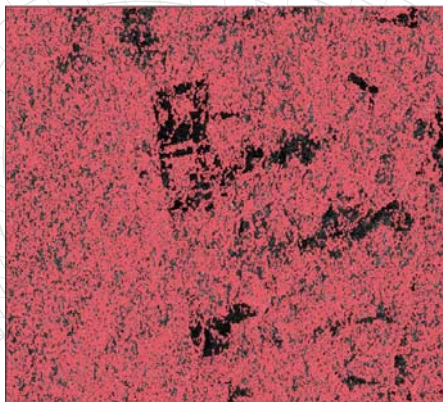


Imagem filtrada pelo filtro Lee e segmentada

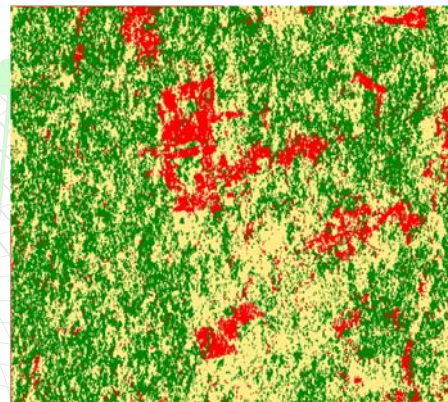


Imagem Filtro Lee classificada (Batthacharrya)



# Classificação de imagem

## Classificador Batthacharrya (por regiões)

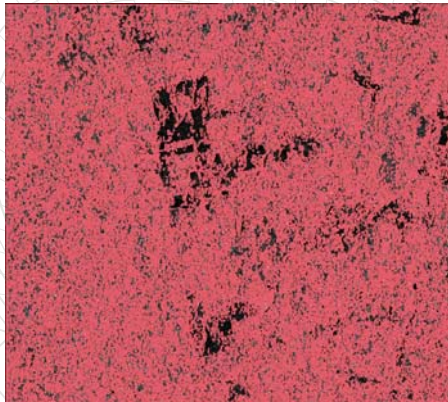


Imagem filtrada pelo filtro Frost e segmentada

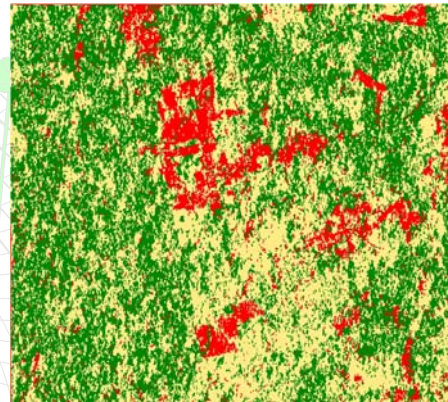
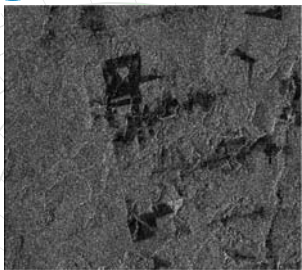


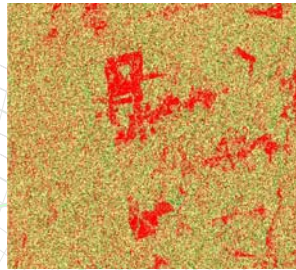
Imagem Filtro Frost classificada (Batthacharrya)



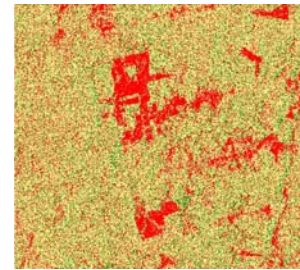
# Resultados das Classificações



Original



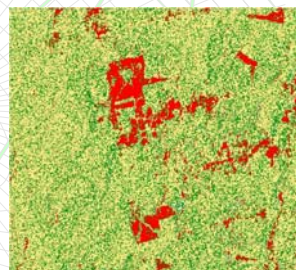
MaxVER



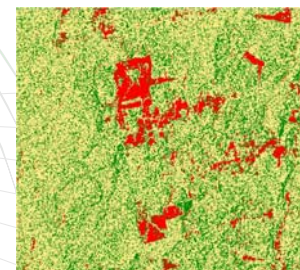
MaxVER-ICM



Filtrada Média



MaxVER



MaxVER-ICM



**Resultados das Classificações**

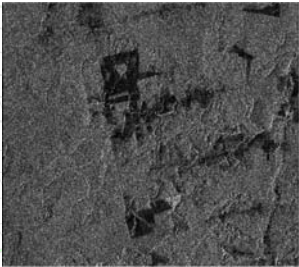
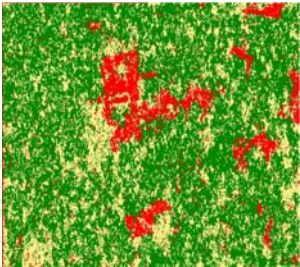



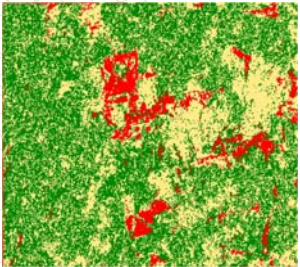
Imagem original



Batthacharrya - Original



Filtrada Média




Batthacharrya - Média

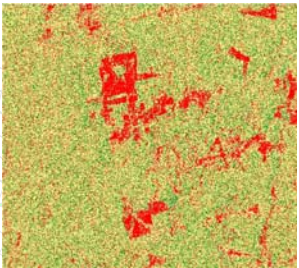
---

**XII CBSR**      Introdução ao Processamento de Imagens de Radar      57

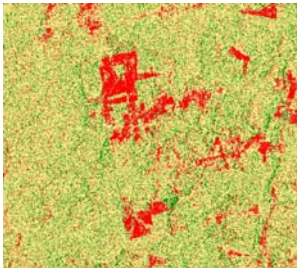
**Resultados das Classificações**




Filtrada Frost



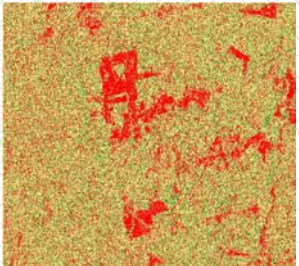
MaxVER



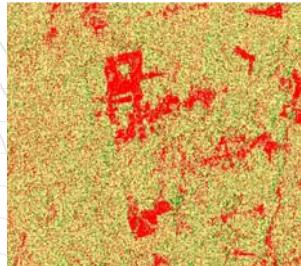
MaxVER-ICM



Filtrada Lee



MaxVER



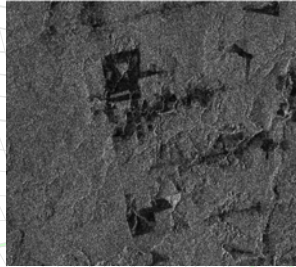
MaxVER-ICM

---

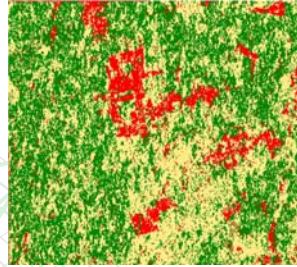
**XII CBSR**      Introdução ao Processamento de Imagens de Radar      58



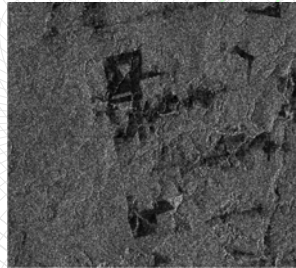
## Resultados das Classificações



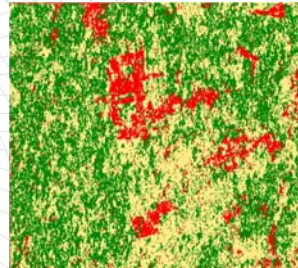
Filtrada Frost



Batthacharrya - Frost



Filtrada Lee



Batthacharrya - Lee



# POLARIMETRIA SAR



- ☑ Polarização/Espalhamento de Ondas EM
- ☑ Matriz de Espalhamento
- ☑ Resposta Polarimétrica (*Polarimetric Response* ou *Polarization Signature*)
- ☑ Atributos Polarimétricos
- ☑ Teoremas de Decomposição de Alvos
- ☑ Classificação de Polarimétrica (Exemplos)

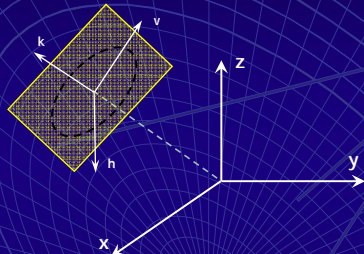


# POLARIMETRIA SAR



Equação de Ondas EM

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0$$



$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{h}E_h(\vec{r}, t) + \vec{v}E_v(\vec{r}, t)$$

$$E_h(\vec{r}, t) = a_h \cos(\tau + \delta_h)$$

$$E_v(\vec{r}, t) = a_v \cos(\tau + \delta_v)$$






$$\frac{E_h(\vec{r}, t)^2}{a_h^2} + \frac{E_v(\vec{r}, t)^2}{a_v^2} - 2 \cos \delta \frac{E_h(\vec{r}, t)E_v(\vec{r}, t)}{a_h a_v} = \sin^2 \delta$$

$$\delta = \delta_v - \delta_h$$



**POLARIZAÇÃO DE ONDAS EM**








Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

3

**POLARIZAÇÃO DE ONDAS EM**

A forma da Elipse de Polarização descreve o estado de polarização de uma onda plana

**Ângulos de Polarização**

$\psi$ : ângulo de inclinação do semi-eixo maior


$\chi: \text{tg}(\chi) = \pm \frac{\text{semi-eixo menor}}{\text{semi-eixo maior}}$

$-\frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \quad -\frac{\pi}{4} \leq \chi \leq \frac{\pi}{4}$

**Parâmetros de Deschamps**

$a = \text{arctg}\left(\frac{a_v}{a_h}\right)$

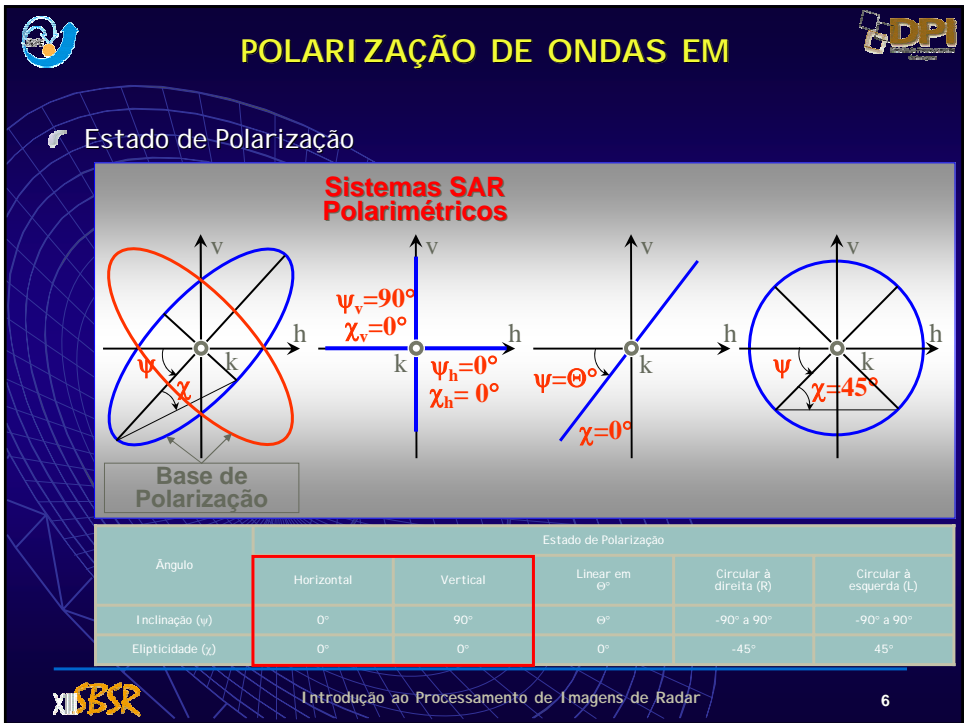
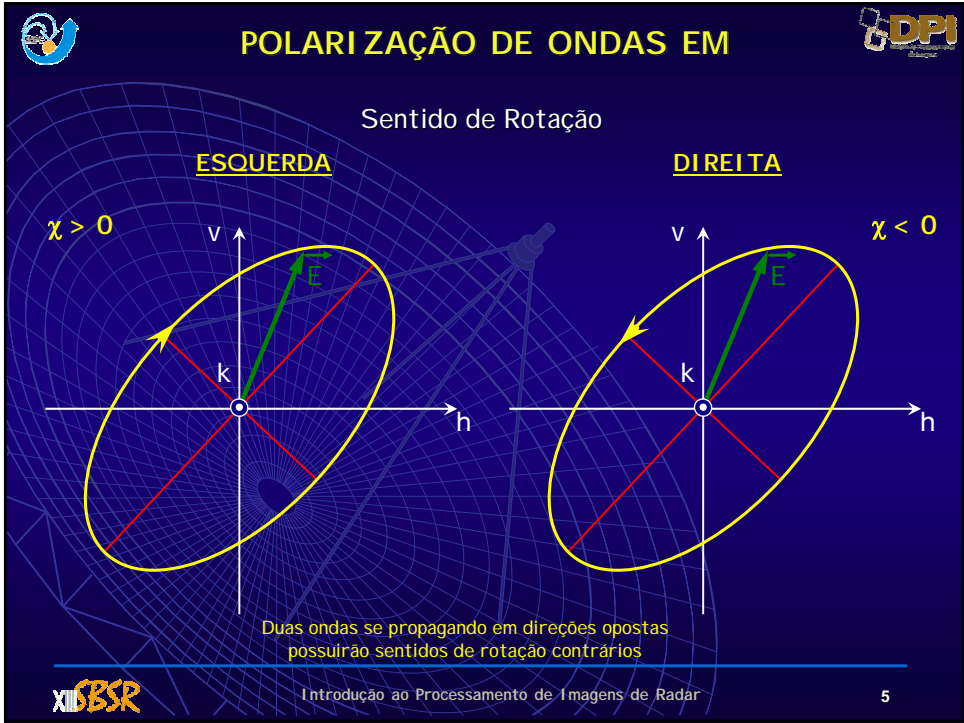
$\delta = \delta_v - \delta_h$



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

4







# POLARIZAÇÃO DE ONDAS EM



## DESPOLARIZAÇÃO DA ONDA EM

- ❖ Para sistemas de radar polarimétricos utilizados em sensoriamento remoto, a onda transmitida é sempre suposta como totalmente polarizada, com uma polarização do tipo linear (H ou V), mas a onda recebida pode ter sua polarização alterada devido a interação com os alvos.
- ❖ Quatro principais mecanismos são responsáveis pela despolarização da onda EM, isto é, mudança de estado de polarização (por ex. HH -> HV):
  - a) Reflexão quase especular, causada por superfícies suavemente onduladas
  - b) Múltiplo espalhamento devido à superfície rugosa do alvo
  - c) Múltiplo espalhamento devido ao volume do alvo
  - d) Propriedades anisotrópicas do alvo (geometria do alvo)



# REPRESENTAÇÃO - VETOR DE STOKES



☞ Stokes introduziu um conjunto de para caracterizar o estado de polarização de uma onda eletromagnética, que é estimado através de medidas de intensidade

Vetor de Stokes  $\vec{q} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_v|^2 + |E_h|^2 \\ |E_v|^2 - |E_h|^2 \\ 2\Re\{E_v^* E_h\} \\ 2\Im\{E_v^* E_h\} \end{bmatrix}$

- $g_0$  : é proporcional a intensidade total do campo elétrico
- $g_1$  : representa a diferença entre as intensidades do campo elétrico nas polarizações v e h
- $g_2$  e  $g_3$  : representam juntamente a diferença de fase do campo elétrico nas polarizações v e h

- Valor significativo em  $q_2$  indica tendência para polarização linear
- Valor significativo em  $q_3$  indica tendência para orientação a esquerda ou direita

$q_0^2 = q_1^2 + q_2^2 + q_3^2$	→	Completamente Polarizada
$q_0^2 > q_1^2 + q_2^2 + q_3^2$	→	Parcialmente Polarizada
$0 = q_1^2 + q_2^2 + q_3^2$	→	Totalmente Despolarizada





## REPRESENTAÇÃO - VETOR DE STOKES



- Utilizando os parâmetros de amplitude do campo elétrico e a fase entre polarizações:

Vetor de Stokes

$$\vec{q}(a_h, a_v, \delta) = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_h^2 + a_v^2 \\ a_h^2 - a_v^2 \\ 2a_h a_v \cos \delta \\ 2a_h a_v \sin \delta \end{bmatrix}$$

- Utilizando os parâmetros de amplitude do campo elétrico e da elipse de polarização:

Vetor de Stokes

$$\vec{q}(\alpha, \psi, \delta) = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_h^2 + a_v^2 \\ (a_h^2 + a_v^2) \cos(2\psi) \cos(2\chi) \\ (a_h^2 + a_v^2) \sin(2\psi) \cos(2\chi) \\ (a_h^2 + a_v^2) \sin(2\chi) \end{bmatrix}$$



## REPRESENTAÇÃO - VETOR DE STOKES



### ONDA PARCIALMENTE POLARIZADA

- Quando os parâmetros amplitude e fase variam com o tempo, a elipse de polarização também varia, neste caso a onda é dita parcialmente polarizada.
- Neste caso a polarização pode ser definida apenas no sentido de média estatística. Para representar este tipo de onda, é utilizado o vetor de Stokes modificado.

Vetor de Stokes modificado

$$\vec{q}(a_h, a_v, \delta) = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle a_h^2 \rangle + \langle a_v^2 \rangle \\ \langle a_h^2 \rangle - \langle a_v^2 \rangle \\ \langle 2a_h a_v \cos \delta \rangle \\ \langle 2a_h a_v \sin \delta \rangle \end{bmatrix}$$

onde  $\langle \rangle$  significa operador de média

A principal diferença entre o vetor de Stokes normal e este modificado, é que os parâmetros são representados por média estatística.

Relação para onda parcialmente polarizada:  $q_0^2 > q_1^2 + q_2^2 + q_3^2$

- Para sistemas de radar polarimétrico, a onda transmitida é sempre considerada como totalmente polarizada.

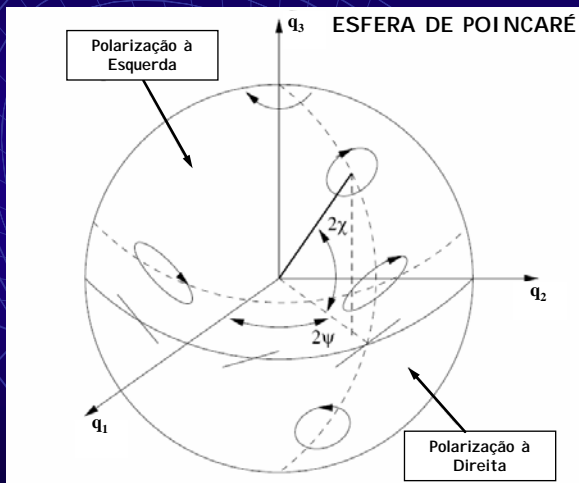




# POLARIZAÇÃO DE ONDAS EM



- Os três parâmetros  $q_1$ ,  $q_2$  e  $q_3$  podem ser considerados como as coordenadas cartesianas de um ponto em uma esfera, onde o raio da esfera é igual a  $q_0$ . Esta esfera é chamada de esfera de Poincaré, ela é uma representação tridimensional do vetor de Stokes



## Grau de Polarização

$$m = \frac{\sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}}{q_0}$$

$$0 < m < 1$$

Totalmente Despolarizada

Completamente Polarizada

Está relacionado com a pureza do mecanismo de espalhamento

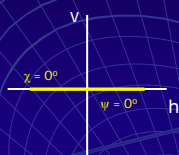


# POLARIZAÇÃO DE ONDAS EM

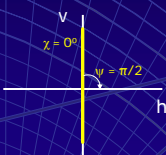


Estado de Polarização Ortogonal  $\rightarrow$  formam uma base

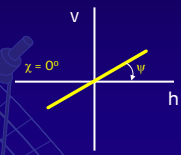
Linear Horizontal



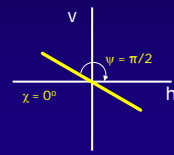
Linear Vertical



Linear em ψ

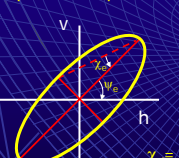


Linear em ψ+π/2

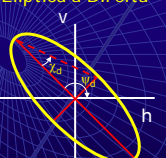


Condição de Ortogonalidade  $\rightarrow \chi_m = -\chi_n$  e  $\psi_m = \psi_n + \pi/2$

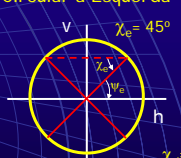
Elíptica à Esquerda



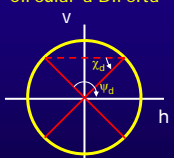
Elíptica à Direita



Circular à Esquerda



Circular à Direita



$$\chi_d = -\chi_e$$

$$\psi_d = \psi_e + \pi/2$$

$$\chi_d = -\chi_e$$

$$\psi_d = \psi_e + \pi/2$$







## REPRESENTAÇÃO - VETOR DE JONES



- ✓ Vetor de Stokes é representação 3D
- ✓ Vetor de Jones é representação 2D (mais usada em S.R.)
  - ✓ O campo Elétrico é escrito como uma combinação linear de 2 estados de polarização ortogonais ponderados por suas respectivas amplitudes complexas ( $E_m$  e  $E_n$ )

$$\vec{E} = E_m \vec{e}_m + E_n \vec{e}_n \quad \vec{E} = \begin{bmatrix} E_m \\ E_n \end{bmatrix} \quad E_m = a_m e^{i\delta_m} \quad \text{Base Ortogonal } \{\vec{e}_m, \vec{e}_n\}$$

- ✓ Não possui informação do sentido de rotação do campo elétrico
- ✓ 2 ondas se propagando em direções opostas possuem o mesmo vetor de Jones
- ✓ Utiliza os sinais + e - para indicar a direção de propagação



## MUDANÇA DE BASE DE POLARIZAÇÃO



Uma onda EM monocromática plana pode ser expressa como uma combinação linear de dois estados ortogonais de polarização, formando uma base de polarização.

A representação da onda EM depende da escolha de uma base de polarização.

**Efeito da mudança de base de polarização:**

Seja  $\{\vec{e}_m, \vec{e}_n\}$  e  $\{\vec{e}_i, \vec{e}_j\}$  duas bases de polarização. O vetor campo elétrico pode ser escrito como:

$$\vec{E} = \{\vec{e}_m, \vec{e}_n\} = \vec{e}_m E_m + \vec{e}_n E_n = \vec{e}_i E_i + \vec{e}_j E_j$$

-Os correspondentes vetores de Jones, para as duas bases, são respectivamente:

$$\vec{E}_{mn} = \begin{bmatrix} E_m \\ E_n \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \vec{E}_{ij} = \begin{bmatrix} E_i \\ E_j \end{bmatrix}$$

-As razões complexas entre as polarizações são dada por:

$$\rho_{mn} = E_n / E_m \quad \text{e} \quad \rho_{ij} = E_j / E_i$$





## MUDANÇA DE BASE DE POLARIZAÇÃO



Base de polarização I:  $\{\vec{e}_m, \vec{e}_n\}$

$$\vec{E}_{mn} = \begin{bmatrix} E_m \\ E_n \end{bmatrix}$$

Base de polarização II:  $\{\vec{e}_i, \vec{e}_j\}$

$$\vec{E}_{ij} = \begin{bmatrix} E_i \\ E_j \end{bmatrix}$$

-A transformação do vetor de Jones da base I para a correspondente base II, é uma transformação linear no espaço bidimensional complexo, controlado pela matriz de transformação  $[U_2]$ :

$$\vec{E}_{ij} = [U_2] \vec{E}_{mn}$$

onde  $[U_2] = \frac{1}{\sqrt{1 + \rho_{mn} \rho_{mn}^*}} \begin{bmatrix} 1 - \rho_{mn}^* \\ \rho_{mn} & 1 \end{bmatrix}$  e  $\rho_{mn} = E_n / E_m$

- Propriedades de  $[U_2]$ :

$$[U_2][U_2]^T = I_2 \quad (\text{garante a preservação da energia na nova base})$$

$$\det([U_2]) = 1 \quad (\text{garante a definição correta da fase na nova base})$$




## RETROESPALHAMENTO




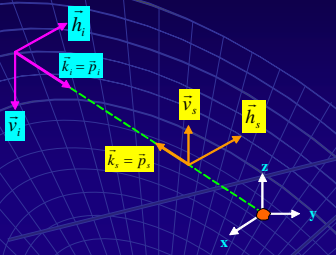
- Em sensoriamento remoto por radar a onda EM transmitida interage com o alvo no chão e retorna para o receptor em forma de eco. Ambas as ondas transmitidas e recebidas podem ser representadas na forma vetorial.
- A transformação que ocorre entre a onda EM transmitida e a recebida é expressa através de uma transformação linear representada por uma matriz.
- Esta matriz contém toda a informação sobre o processo de espalhamento.
- Duas diferentes representação para o retroespalhamento são utilizadas na literatura, a matriz de Jones e a matriz de Muller.
- Ambas matrizes representam a relação entre os vetores incidentes e os vetores de retorno do alvo, e com isso a informação sobre o espalhamento.
- A matriz de Jones é utilizada quando a onda é representada através do vetor de Jones, e a matriz de Muller é utilizada quando se utiliza o vetor de Stokes para a representação da onda EM.





## SISTEMA DE COORDENADAS



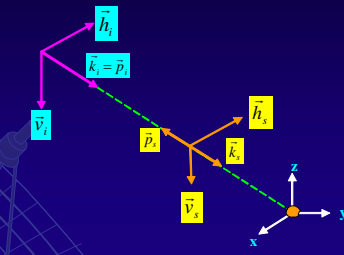


**Forward Scattering Alignment (FSA) Convention**  
(Sistema de coordenadas orientado pela onda)

$$\vec{p}_s = -\vec{p}_i \Rightarrow \vec{k}_s = -\vec{k}_i$$

$$(\vec{k}_i, \vec{h}_i, \vec{v}_i) \text{ e } (\vec{k}_s, \vec{h}_s, \vec{v}_s)$$

Os vetores de incidência e de espalhamento estão rotacionados




**Back Scattering Alignment (BSA) Convention**  
(Sistema de coordenadas orientado pela antena)

$$\vec{p}_s = -\vec{p}_i \Rightarrow \vec{k}_s = \vec{k}_i$$

$$(\vec{k}_i, \vec{h}_i, \vec{v}_i) \text{ e } (\vec{k}_s, \vec{h}_s, \vec{v}_s)$$

Os vetores de incidência e de espalhamento são idênticos



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

17



## MATRIZ DE ESPALHAMENTO (VETOR DE JONES)



$$\vec{E}^{re} = \frac{e^{ik_0 r}}{r} [S] \vec{E}^{tr} \Rightarrow \begin{bmatrix} E_h^{re} \\ E_v^{re} \end{bmatrix} = \frac{e^{ik_0 r}}{r} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^{tr} \\ E_v^{tr} \end{bmatrix}$$

Sistemas Monoestáticos e Meios Recíprocos

$$S_{hv} = S_{vh}$$

[S] só depende das propriedades físicas e geométricas do alvo imageado



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

18

**MATRIZ DE ESPALHAMENTO**

Sistema Monoestático

Medida Monoestática

Matriz de Espalhamento de Jones

$$S_{hv} = S_{vh}$$

$$\begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}$$

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

19

**MATRIZ DE ESPALHAMENTO**

Sistema Biestático

Matriz de Espalhamento de Sinclair

$$S_{hv} \neq S_{vh}$$

$$\begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}$$

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

20



**IMAGENS POLARIMÉTRICAS**

Banda P - Tapajós (Orbisat)

TM-543
HH
HV
VH
VV

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

21

**IMAGENS POLARIMÉTRICAS**

Banda L - Machadinho do Oeste (Sivam)

4-looks

HH
VH

HV
VV

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

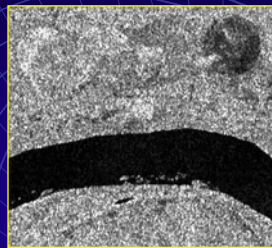
22



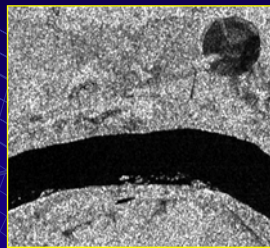
# IMAGENS POLARIMÉTRICAS



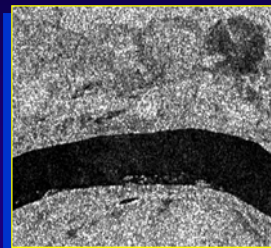
Bandas C e L - Bebedouro (SIR-C)



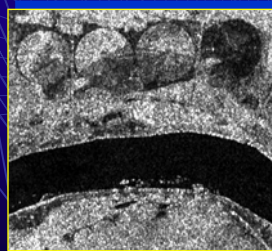
C-HH



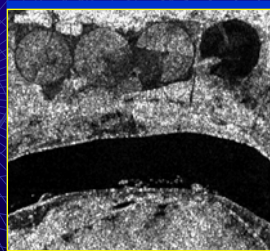
C-HV



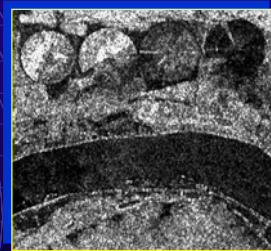
C-VV



L-HH



L-HV



L-VV

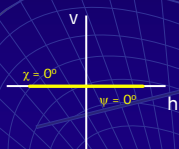


# TRANSFORMAÇÃO DE BASE

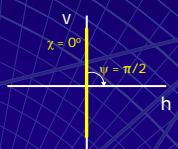


- Uma aplicação comum é a transformação de uma base linear,  $\{\vec{e}_h, \vec{e}_v\}$  para uma base circular  $\{\vec{e}_R, \vec{e}_L\}$ , cujos elementos da matriz de espalhamento são representados por:

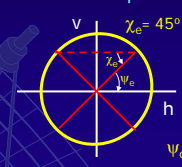
Linear Horizontal



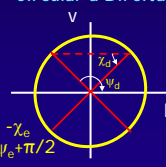
Linear Vertical



Circular à Esquerda



Circular à Direita

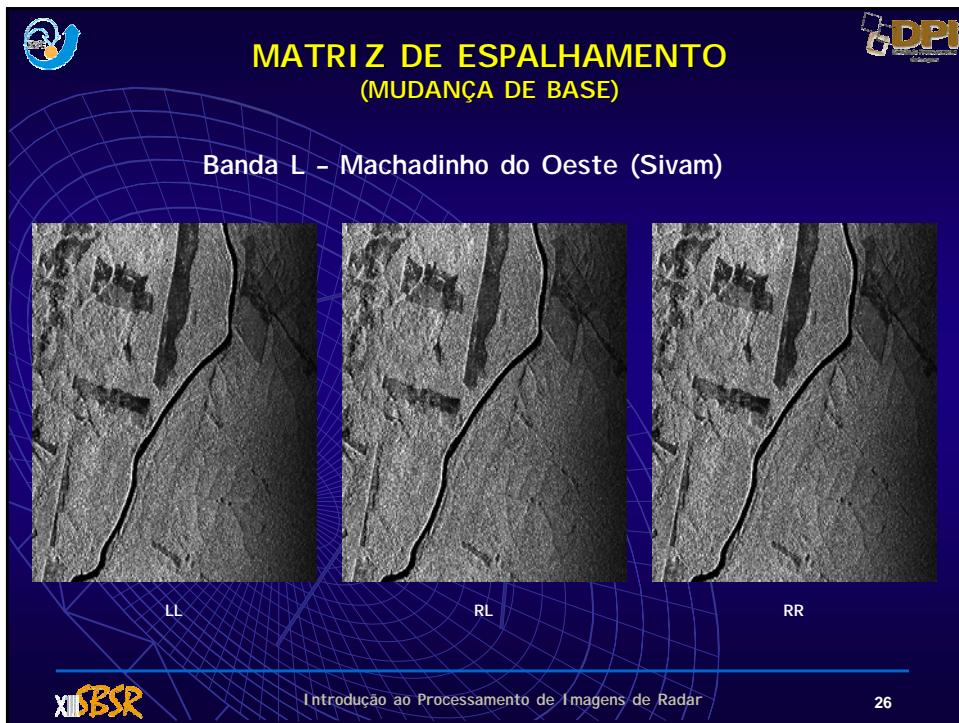
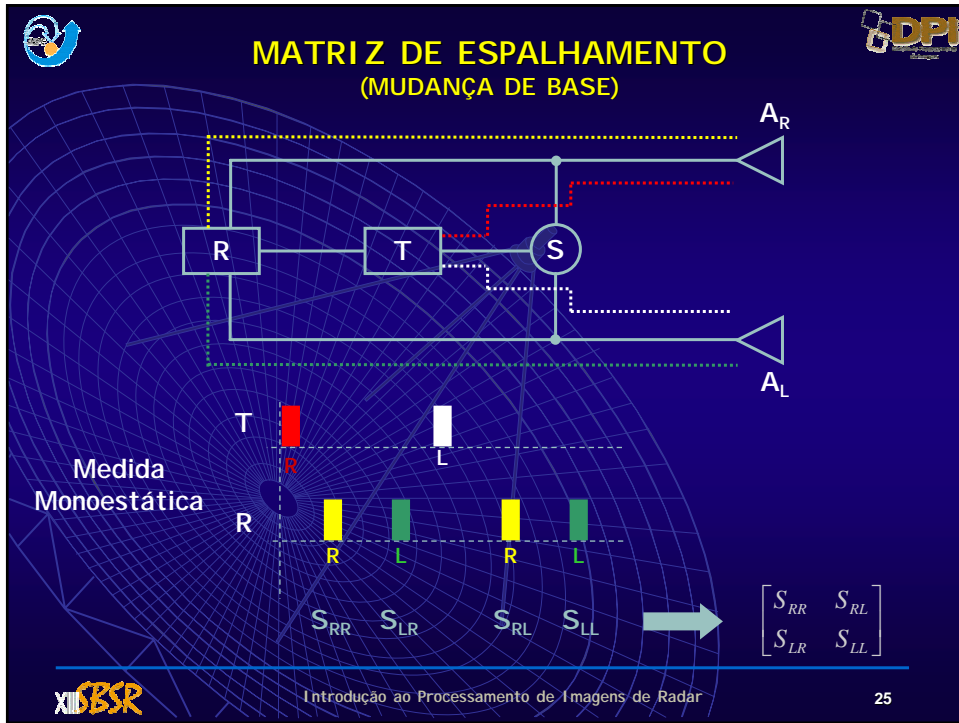


A transformação para base circular é representada por:

$$\begin{bmatrix} S_{LL} & S_{LK} \\ S_{RL} & S_{RK} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} S_{RR} = iS_{hh} + \frac{1}{2}(S_{hh} - S_{vv}) \\ S_{LL} = iS_{vh} - \frac{1}{2}(S_{hh} - S_{vv}) \\ S_{RL} = \frac{i}{2}(S_{hh} + S_{vv}) \end{cases}$$

-As mudanças de base mudam as propriedades dos alvos moderadamente, pode-se ajustar uma base de polarização para que se tenha a máxima potência para um dado tipo de alvo de interesse.

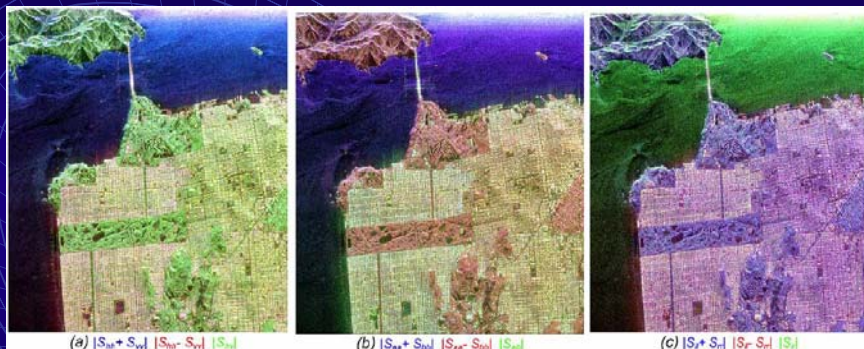








# TRANSFORMAÇÃO DE BASE: EXEMPLO



(a)  $|S_{xx}+S_{yy}|$   $|S_{xx}-S_{yy}|$   $|S_{xy}|$   
Horizontal-Vertical  
(Base de Pauli)

(b)  $|S_{xx}+S_{yy}|$   $|S_{xx}-S_{yy}|$   $|S_{xy}|$   
Horizontal-Vertical  
(Horizontal rotacionada de 45°)

(c)  $|S_r+S_l|$   $|S_r-S_l|$   $|S_c|$   
Circular  
(À direita)



# RESPOSTA POLARIMÉTRICA



$$\left\{ P_{\psi\chi} \right\} = \left\{ \vec{S}_{Re}^T [K] \vec{S}_{Tr} \right\} \begin{matrix} \psi=180^\circ & \psi=45^\circ \\ \psi=0^\circ & \psi=-45^\circ \end{matrix}$$

$\psi$  : ângulo de inclinação

$\chi$  : ângulo de elipticidade

$\vec{S}_{Re}$  : Vetor de Stoke da antena de recepção

$\vec{S}_{Tr}$  : Vetor de Stoke da antena de transmissão

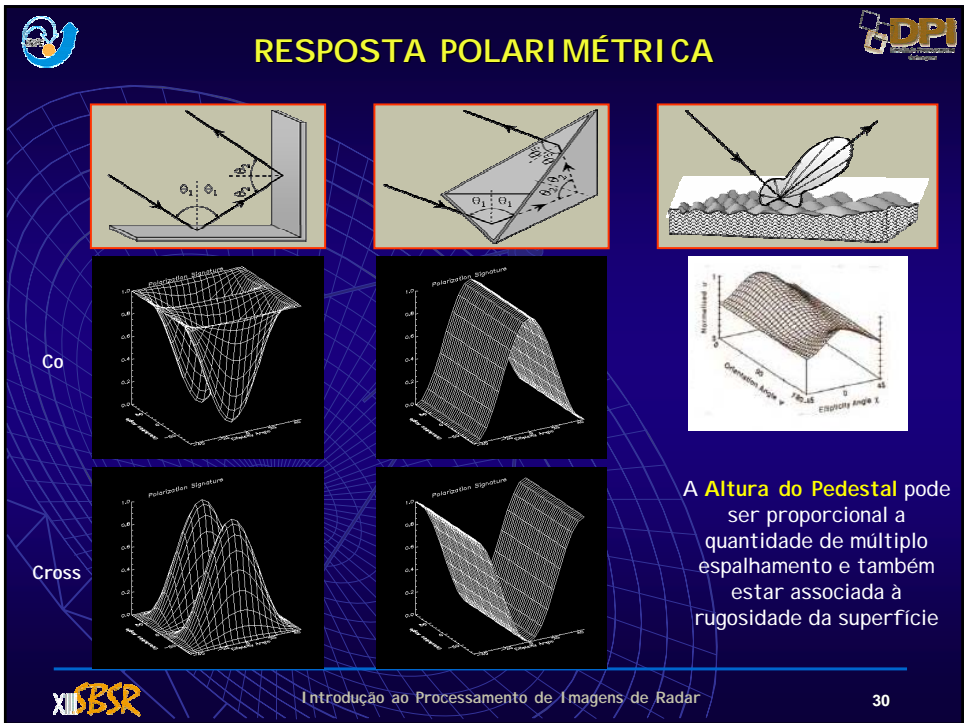
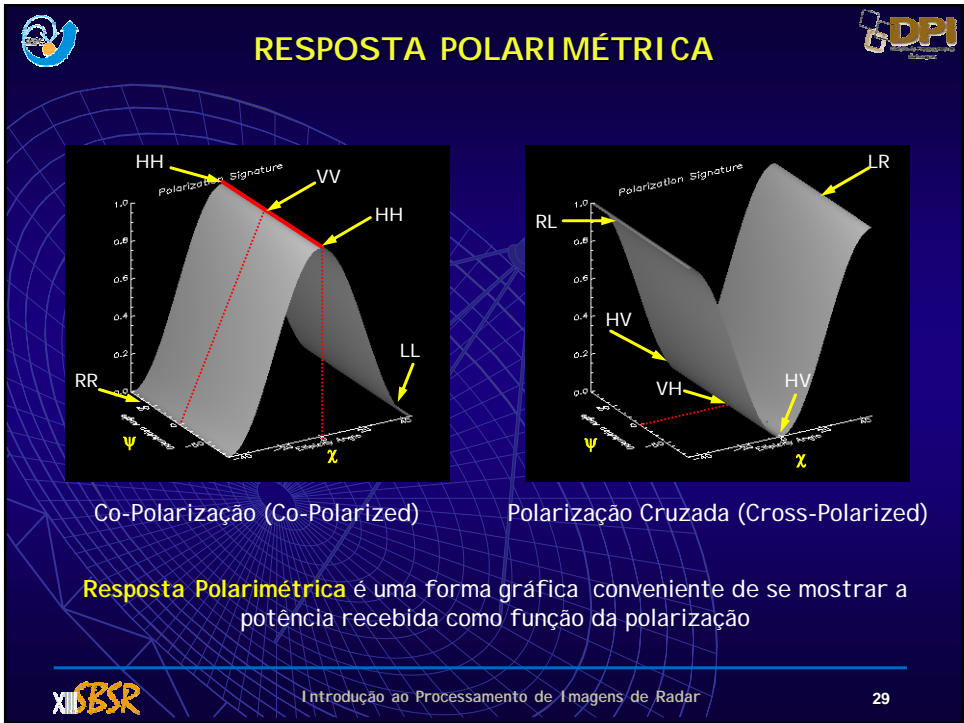
$[K]$  : Matriz de Kennaugh

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(2\chi) \cos(2\psi) \\ \cos(2\chi) \sin(2\psi) \\ \sin(2\chi) \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(|S_{xx}|^2 + |S_{yy}|^2 + |S_{yx}|^2 + |S_{xy}|^2) & \frac{1}{2}(|S_{xx}|^2 - |S_{yy}|^2 + |S_{yx}|^2 - |S_{xy}|^2) & \Re\{S_{xx}S_{yy}^* + S_{yx}S_{xy}^*\} & \Im\{S_{xx}S_{yy}^* + S_{yx}S_{xy}^*\} \\ \frac{1}{2}(|S_{xx}|^2 + |S_{yy}|^2 - |S_{yx}|^2 - |S_{xy}|^2) & \frac{1}{2}(|S_{xx}|^2 - |S_{yy}|^2 - |S_{yx}|^2 + |S_{xy}|^2) & \Re\{S_{xx}S_{yy}^* - S_{yx}S_{xy}^*\} & \Im\{S_{xx}S_{yy}^* - S_{yx}S_{xy}^*\} \\ \Re\{S_{xx}S_{yx}^* - S_{yy}S_{xy}^*\} & \Re\{S_{xx}S_{yx}^* + S_{yy}S_{xy}^*\} & \Re\{S_{xx}S_{yy}^* + S_{yx}S_{xy}^*\} & \Im\{S_{xx}S_{yy}^* + S_{yx}S_{xy}^*\} \\ \Im\{S_{xx}S_{yx}^* + S_{yy}S_{xy}^*\} & \Im\{S_{xx}S_{yx}^* - S_{yy}S_{xy}^*\} & \Im\{S_{xx}S_{yy}^* - S_{yx}S_{xy}^*\} & -\Re\{S_{xx}S_{yy}^* - S_{yx}S_{xy}^*\} \end{bmatrix}$$

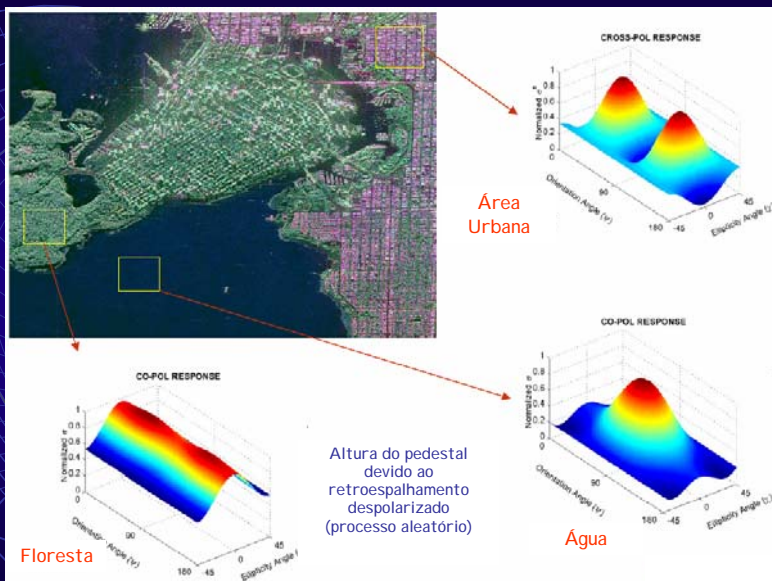








## RESPOSTA POLARIMÉTRICA



XIII CBSR

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

31



## ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS



São relacionados com os mecanismos de espalhamento (superficial, volumétrico e *double bounce*)

- ☛ Potência Total (*Span*)
- ☛ Razão de Co-Polarização
- ☛ Razão de Polarização Cruzada
- ☛ Coeficiente de Correlação Complexo
- ☛ Índice Biofísicos
  - ☛ De Biomassa (*Biomass Index - BMI*)
  - ☛ Espalhamento Volumétrico (*Volume Scattering Index - VSI*)
  - ☛ Do Tipo de Interação (*Interaction Type Index - ITI*)
  - ☛ De Estrutura do Dossel (*Canopy Structure Index - CSI*)
- ☛ Vorticidade

XIII CBSR

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

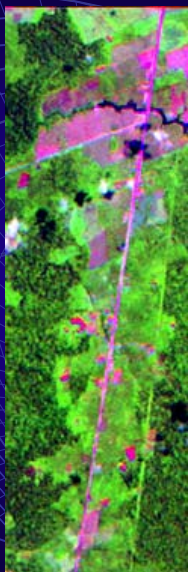
32



## ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS



TM-543



Potência Total  
(*Span*)

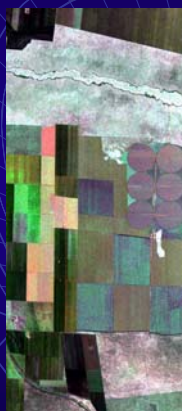
$$\text{Span} = |HH|^2 + |HV|^2 + |VH|^2 + |VV|^2$$



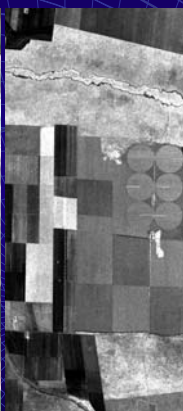
## ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS



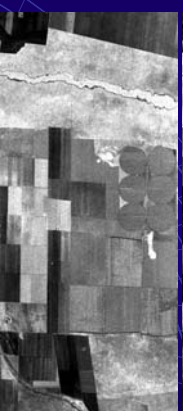
Potência Total (*Span*):  $\text{Span} = |HH|^2 + |HV|^2 + |VH|^2 + |VV|^2$



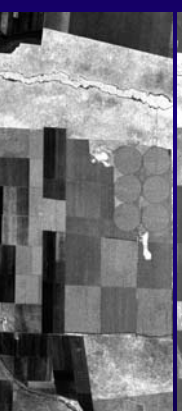
HH VV HV



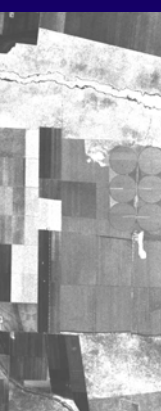
HH



VV



HV



SPAN





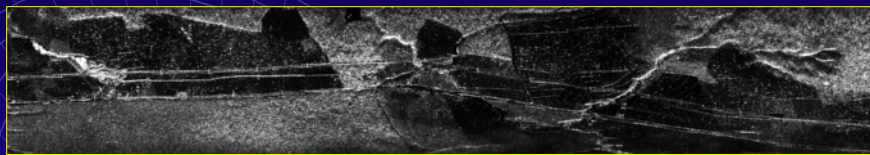


## ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS

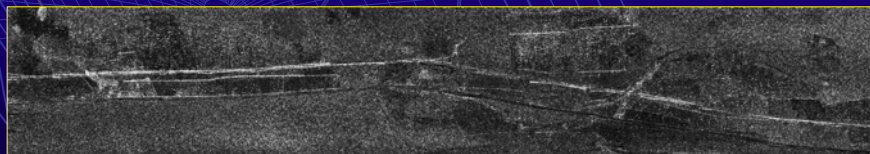
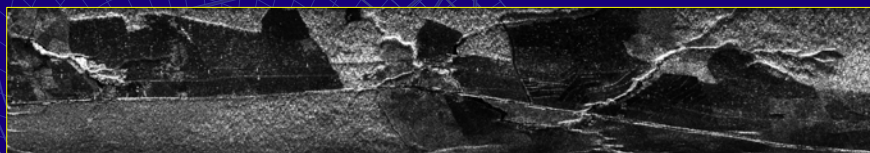


### Razão de Co-Polarização (Intensidade)

HH



VV



HH/VV



## ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS

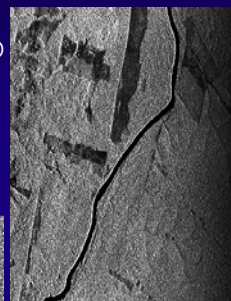


### Razão de Co-Polarização (Complexo)

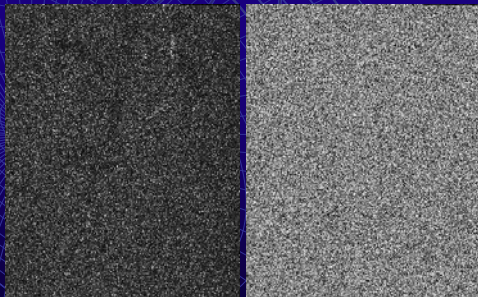
HH  
(Intensidade)



VV  
(Intensidade)



VV/HH



Módulo

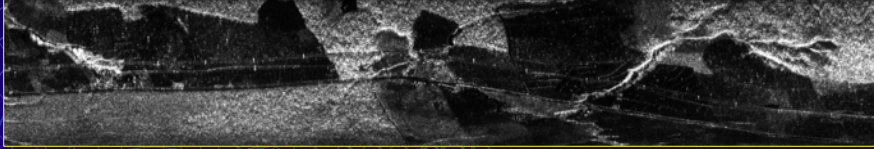
Fase

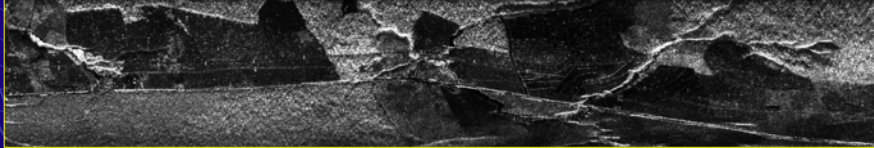


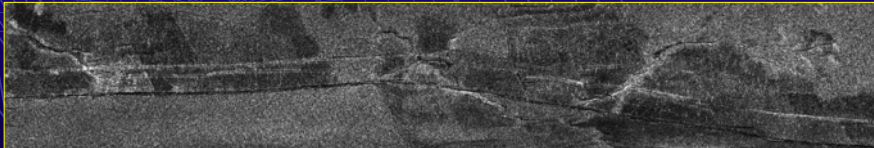


**ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS**


Razão de Polarização Cruzada (Intensidade)

HH


VV




HV/VV

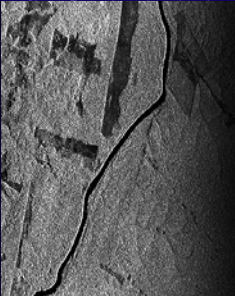


Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

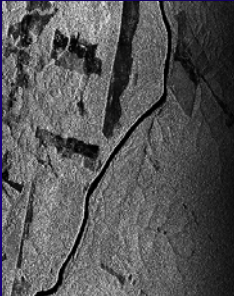
37

**ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS**

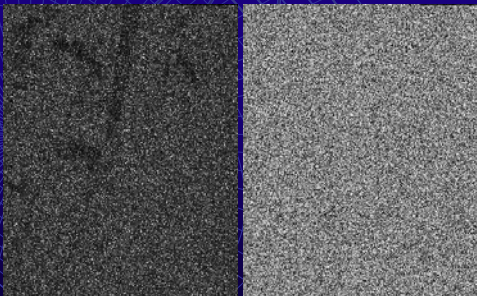
Razão de Polarização Cruzada (Complexo)



VV  
(Intensidade)




HV  
(Intensidade)



Módulo

Fase

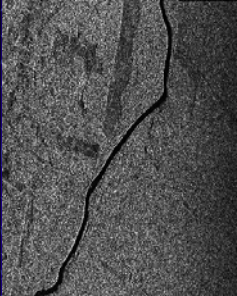


Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

38

**ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS**

Módulo



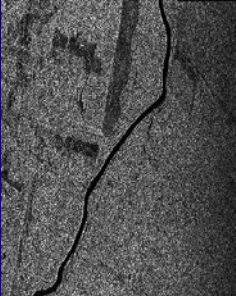
Co-Polarized  
(HH e VV)

**Coefficiente de Correlação Complexo**

$$\rho_{hh-vv} = \frac{S_{hh} S_{vv}^*}{\sqrt{\langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle \langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle}}$$


$$\rho_{vv-hv} = \frac{S_{vv} S_{hv}^*}{\sqrt{\langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle \langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle}}$$

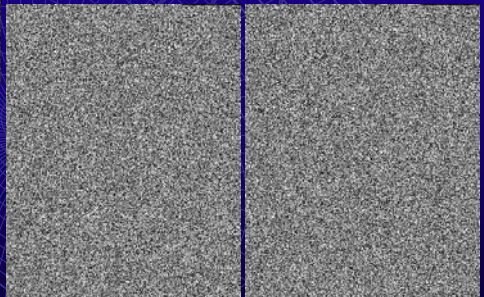
Módulo



Cross-Polarized  
(VV e HV)

Fase





Fase

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

**ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS**

Parâmetros	Razão de Co-Polarização	Razão de Polarização Cruzada	Coefficiente de Correlação
<b>Uso</b>	Medida de Rugosidade	Discriminação entre os espalhamentos volumétrico e superficial	Detecção de Despolarização e <i>Double Bounce</i>
<b>Espalhamento Superficial</b>	Baixo para superfícies quase Lisa e tende a 1 quando a rugosidade cresce	Muito Baixo para superfícies quase Lisa e aumenta quando a rugosidade cresce	Alta Amplitude (Baixa despolarização) e Pequena Diferença de Fase
<b>Espalhamento Volumétrico</b>	-1	Relativamente Alto	Baixa Amplitude (Alta despolarização) e Diferença de Fase é pobremente definida
<b><i>Double Bounce</i></b>	> 1	Baixo	Diferença de Fase próxima a 180°

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar



## ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS



### Índices Biofísicos

BMI é um indicador da quantidade de biomassa

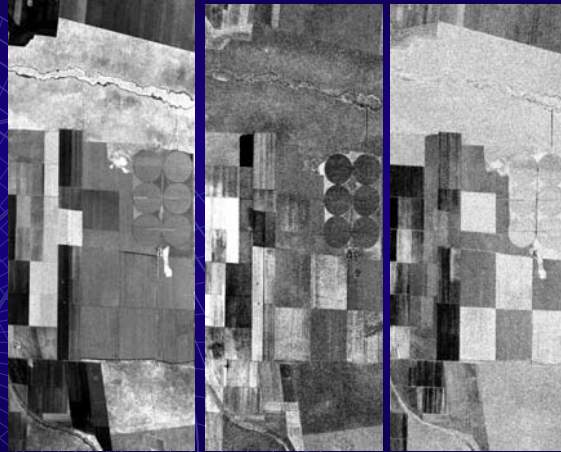
$$BMI = \frac{VV+HH}{2}$$

CSI medida da relação entre as estruturas vertical e horizontal na vegetação. Só tem sentido em áreas com vegetação

$$CSI = \frac{VV}{VV+HH}$$

VSI está relacionado com o espalhamento volumétrico. É baixo para um solo (espalhamento superficial).

$$VSI = \frac{(HV+VH)/2}{(HV+VH)/2 + BMI}$$



BMI

CSI

VSI

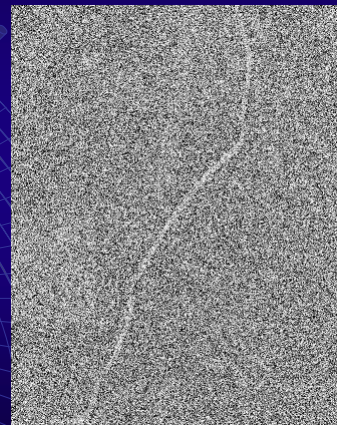


## ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS



### Vorticidade

- Espalhadores tais como dipolo filamental e hélices apresentam alta vorticidade, enquanto que, tanto o espalhamento superficial quanto o provocado por refletor diédricos apresentam baixa vorticidade







## VETOR DE ESPALHAMENTO



- A matriz [S] descreve o processo de espalhamento e contém toda informação sobre o alvo imageado. Pode-se utilizar uma representação vetorial com as informações sobre a matriz de retroespalhamento, da seguinte forma:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \rightarrow \vec{k} = \frac{1}{2} \text{Traço}([S]\Psi) = [k_0, k_1, k_2, k_3]^T$$

onde  $\text{Traço}([S])$  é a soma dos elementos da diagonal de [S] e  $\Psi$  é uma base matricial 2x2.

### Base de Borgeaud (Lexicográfica)

$$\Psi_B = \left\{ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\}$$



$$\vec{k}_B = [S_{hh} \quad S_{vv} \quad S_{vh} \quad S_{vh}]^T$$

### Base de Pauli

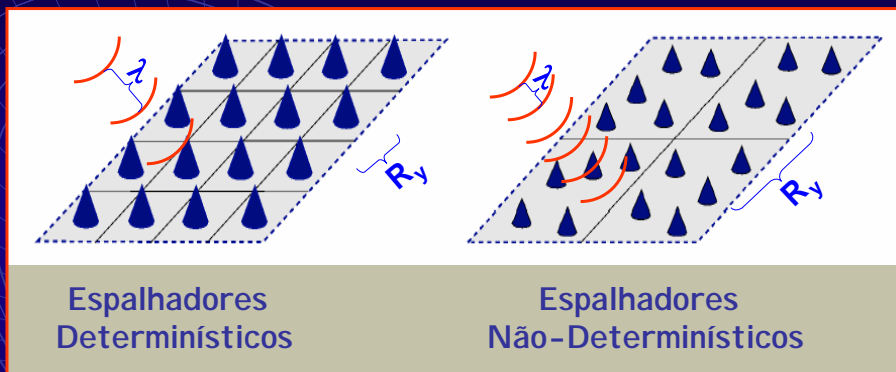
$$\Psi_P = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{bmatrix} \right\}$$



$$\vec{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [(S_{hh} + S_{vv}) \quad (S_{hh} - S_{vv}) \quad (S_{hv} + S_{vh}) \quad i(S_{vh} - S_{hv})]^T$$



## ESPALHADORES (SCATTERING)



Matrizes de Espalhamento [S]



Matrizes de Covariância [C]  
Coerência [T]







## ESPALHAMENTO DE ONDAS EM



Espalhadores Determinísticos

### 1) Matriz de Espalhamento

$$\vec{E}^{re} = \frac{\exp(ikr)}{r} [S] \vec{E}^{tr} \Rightarrow \begin{bmatrix} E_h^{re} \\ E_v^{re} \end{bmatrix} = \frac{\exp(ikr)}{r} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^{tr} \\ E_v^{tr} \end{bmatrix}$$

Espalhadores Não-Determinísticos

### 2) Matriz de Covariância

$$[C_j] = \langle \vec{k}_{4L} \vec{k}_{4L}^T \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{hh}|^2 \rangle & \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vh}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & \langle |S_{hv}|^2 \rangle & \langle S_{hv} S_{vh}^* \rangle & \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vh} S_{hh}^* \rangle & \langle S_{vh} S_{hv}^* \rangle & \langle |S_{vh}|^2 \rangle & \langle S_{vh} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle & \langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{vv} S_{vh}^* \rangle & \langle |S_{vv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad \vec{k}_{4L} = \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{hv} \\ S_{vh} \\ S_{vv} \end{bmatrix}$$

### 3) Matriz de Coerência

$$[T_4] = \langle \vec{k}_{4P} \vec{k}_{4P}^T \rangle \quad \vec{k}_{4P} = 1/\sqrt{2} [(S_{hh} + S_{vv}) \quad (S_{hh} - S_{vv}) \quad (S_{hv} + S_{vh}) \quad i(S_{vh} - S_{hv})]^T$$



## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS



- O objetivo da decomposição é o de expressar o mecanismo médio de espalhamento como uma soma de elementos independentes, e associar a cada um destes elementos a um mecanismo físico.

Duas classes principais de decomposição são utilizadas.

#### a) Decomposição coerente:

Se o espalhamento for determinístico a onda retroespalhada é completamente polarizada, neste caso, a matriz [S] é comumente utilizada para caracterizar os estados de polarização.

Ex.: [Decomposição de Pauli](#), [de Krogager \(SDH\)](#) e [de Cameron](#).

#### b) Decomposição incoerente:

Se o espalhamento não for determinístico a onda retroespalhada é parcialmente polarizada, neste caso, as matrizes de covariância [C] e de coerência [T] são comumente utilizadas para caracterizar os estados de polarização.

Ex.: [Decomposição de Freeman](#), [decomposição por autovalor e autovetor](#).





## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (COERENTE DE PAULI)



-A idéia básica deste enfoque é a de expressar a matriz [S] como a soma complexa de matrizes de espalhamento elementares, que representam certos mecanismos de espalhamento determinísticos.

-A base de Pauli pode ser interpretada como descritores dos espalhadores em termos dos mecanismos de espalhamento determinísticos, representada pelas seguintes matrizes elementares:

$$[S_a] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [S_b] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, [S_c] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, [S_d] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$$

- Considerando a reciprocidade, a matriz de espalhamento pode ser representada por:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = a[S_a] + b[S_b] + c[S_c] \quad \text{onde} \quad \begin{cases} a = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{hh} + S_{vv}) \\ b = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{hh} - S_{vv}) \\ c = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{hv}) \end{cases}$$

$$[S_a] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Reflexão isotrópica do tipo "odd-bounce" ( $S_{hh} = S_{vv}$ )  
(superfícies planas, esferas e triedros)

$$[S_b] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

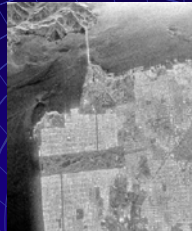
Reflexão isotrópica do tipo "even-bounce" ( $S_{hh} = -S_{vv}$ )  
(refletor de canto do tipo diedro)

$$[S_c] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Reflexão isotrópica do tipo "even-bounce  $\pi/4$  tilted"  
(do tipo diedro rotacionado de  $\pi/4$  em relação a horizontal)



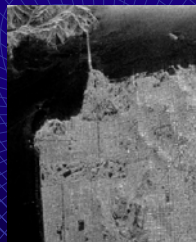
## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (COERENTE DE PAULI)



HH



VV



HV



$$|S_{vv} + S_{hh}| \quad |S_{hh} - S_{vv}| \quad |S_{hv}|$$

$$[S]_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} & S_{hh} - S_{vv} & 2S_{hv} \end{bmatrix}$$



## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (COERENTE DE KROGAGER)



- Krogager propôs uma alternativa para decompor a matriz  $[S]$  como uma soma de espalhadores parciais, representando espalhadores do tipo esfera, diedros e espalhadores do tipo hélice.
- A matriz de espalhamento decomposta, segundo a alternativa de Krogager é expressa na base circular, e dada por:

$$[S]_{RL} = e^{j\phi} \left\{ K_s e^{j\phi_s} \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} + K_d \begin{bmatrix} e^{i2\theta} & 0 \\ 0 & -e^{-i2\theta} \end{bmatrix} + K_h \begin{bmatrix} e^{i2\theta} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right\}$$

Reflexão do tipo "helix"  
(espalhamento do tipo hélice)

Reflexão do tipo "odd-bounce" ( $S_{hh} = S_{vv}$ )  
(superfícies planas, esferas e triedro)

Reflexão do tipo "even-bounce" ( $S_{hh} = -S_{vv}$ )  
(refletor de canto do tipo diedro inclinado)

$$\begin{cases} K_s = |S_{RL}| \\ K_d^+ = |S_{LL}| \Rightarrow \text{rotação a esquerda} \\ K_d^- = |S_{RR}| \Rightarrow \text{rotação a direita} \\ K_h^+ = |S_{RR}| - |S_{LL}| \Rightarrow \text{rotação a esquerda} \\ K_h^- = |S_{LL}| - |S_{RR}| \Rightarrow \text{rotação a direita} \end{cases}$$

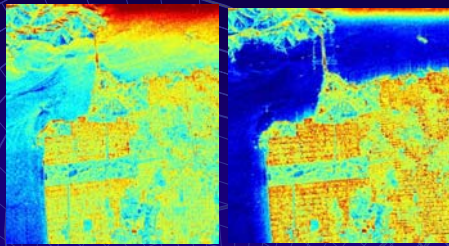
onde

$$\begin{cases} S_{RR} = iS_{hv} + \frac{1}{2}(S_{hh} - S_{vv}) \\ S_{LL} = iS_{vh} - \frac{1}{2}(S_{hh} - S_{vv}) \\ S_{RL} = \frac{i}{2}(S_{hh} + S_{vv}) \end{cases}$$

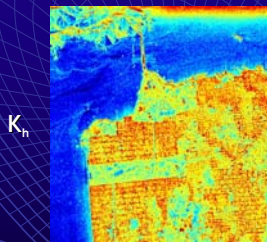
- Os ângulos  $\phi$  representa a fase absoluta e  $\theta$  ângulo de orientação



## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (COERENTE DE KROGAGER)



$K_s$   $K_d$



$K_h$



$K_s$ (dB)

$K_d$ (dB)

$K_h$ (dB)







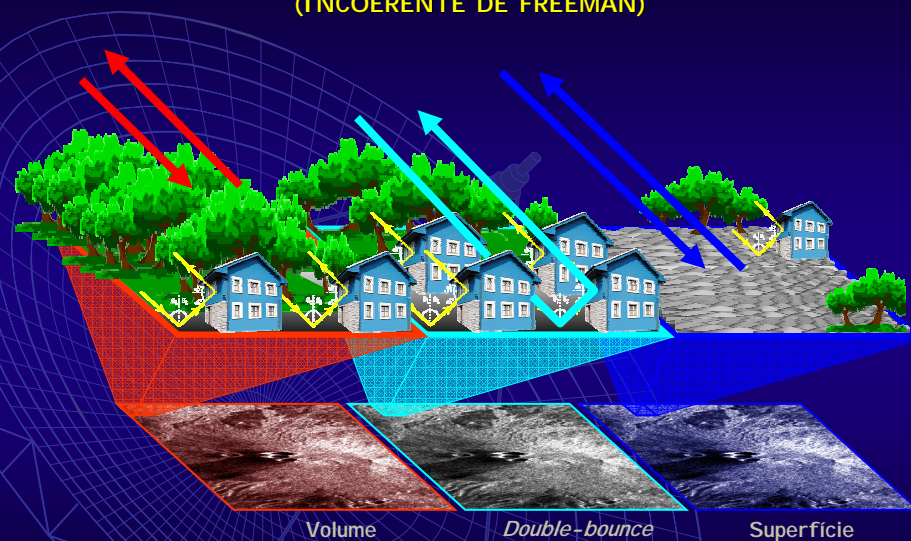
## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE)



- Nas aplicações de sensoriamento remoto por radar a suposição de espalhadores determinísticos puros não é válida, pois normalmente a célula de resolução é maior que o comprimento de onda e os alvos naturais apresentam muitos espalhadores distribuídos espacialmente.
- Para tratar com os efeitos estatísticos dos espalhadores e para a análise de alvos extensos, o conceito de matriz de reflexão de potência é tradicionalmente preferido.
- As matrizes de covariância e coerência são da classe das matrizes de potência, elas carregam os mesmos tipos de informações com representação diferentes. Dependendo da informação desejada, uma ou outra representação pode fornecer alguma vantagem.



## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE FREEMAN)







## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE FREEMAN)



- A decomposição de Freeman modela a matriz de covariância como sendo a contribuição de três mecanismos de espalhamento:

Espalhamento Volumétrico - a copa das árvores é modelada como um conjunto de espalhadores do tipo dipolo orientados aleatoriamente.

"Double-Bounce" - espalhadores modelados como refletores do tipo diedro.

Superficial - modelado como sendo espalhadores do tipo Bragg

Segundo o modelo de Freeman:

- A potência correspondente ao espalhamento do tipo volumétrico é dado por:

$$P_v = \frac{8}{3} f_v$$

- A potência correspondente ao espalhamento do tipo "double-bounce" é dado por:

$$P_d = f_d (1 + |S_{hh} + S_{vv}|^2)$$

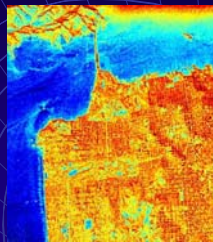
- A potência correspondente ao espalhamento do tipo superficial é dado por:

$$P_s = f_s (1 + |S_{hh} - S_{vv}|^2)$$

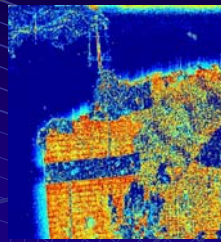
Os fatores  $f_v$ ,  $f_d$  e  $f_s$  correspondem à contribuição da componente  $|S_{vv}|^2$  aos espalhadores do tipo volumétricos, "double-bounce" e superficial, respectivamente.



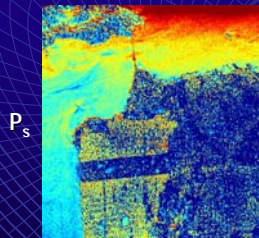
## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE FREEMAN)



$P_v$



$P_d$



$P_s$



$P_v$  (dB)

$P_d$  (dB)

$P_s$  (dB)





## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE CLOUDE)



### - Teorema da decomposição de Cloude:

Este teorema é capaz de cobrir todos os tipos de mecanismos de espalhamento, ele é baseado na análise dos auto-vetores da matriz de coerência [T].

Este enfoque traz importantes vantagens, ele não depende da base utilizada, e devido ao fato da matriz de coerência [T] ser hermitiana, positiva e semi-definida, ela pode ser sempre diagonalizável.

A matriz de coerência diagonalizada pode ser expressa da seguinte forma:

$$[T_3] = [U_3][\Lambda][U_3]^{-1} = [U_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U_3]^{-1} \quad \text{onde} \quad [U_3] = [\vec{e}_1 \ \vec{e}_2 \ \vec{e}_3]^T$$

Onde [\Lambda] é a matriz diagonal dos auto-valores de [T], eles são reais e obedecem a seguinte relação:  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$

A matriz [U<sub>3</sub>] é uma matriz unitária cujas colunas correspondem aos auto-vetores de [T], ou seja:

$$\vec{e}_1 = \begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{21} \\ e_{31} \end{bmatrix}, \vec{e}_2 = \begin{bmatrix} e_{12} \\ e_{22} \\ e_{32} \end{bmatrix}, \vec{e}_3 = \begin{bmatrix} e_{13} \\ e_{23} \\ e_{33} \end{bmatrix}$$

(base ortonormal)



## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE CLOUDE)



### - Teorema da decomposição de Cloude:

A idéia do enfoque em autovetores é o de decompor a matriz de coerência [T<sub>3</sub>] em elementos que representem espalhamento parciais.

A matriz de coerência [T] pode ser decomposta na soma de 3 matrizes de coerência [T<sub>n</sub>], cada uma ponderada pelo seu respectivo auto-valor, ou seja:

$$[T_3] = [U_3][\Lambda][U_3]^{-1} = \sum_1^3 T_{3i} = \sum_1^3 \lambda_i (\vec{e}_i \vec{e}_i^{*T}) = \underbrace{\lambda_1 (\vec{e}_1 \vec{e}_1^{*T})}_{T_1} + \underbrace{\lambda_2 (\vec{e}_2 \vec{e}_2^{*T})}_{T_2} + \underbrace{\lambda_3 (\vec{e}_3 \vec{e}_3^{*T})}_{T_3}$$

- Cada matriz [T<sub>n</sub>] é uma matriz unitária de espalhamento, representando uma contribuição de um espalhamento determinístico.

- O valor da contribuição é dado pelo autovalor enquanto que o mecanismo de espalhamento é dado pelo autovetor.





## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE CLOUDE)



### -Teorema da decomposição de Cloude: Entropia

Dois indicadores importantes podem ser extraídos desta decomposição. O primeiro é chamado de "entropia polarimétrica", que indica o grau de aleatoriedade da distribuição dos mecanismos de espalhamento, dada por:

**ENTROPIA:** 
$$H = -P_1 \log_3 P_1 - P_2 \log_3 P_2 - P_3 \log_3 P_3$$

Os valores de  $P_i$  podem ser interpretados como a intensidade relativa do processo de espalhamento "i", definido como:

$$P_i = \lambda_i / \sum_{j=1}^3 \lambda_j$$

- Por definição H está restrito ao intervalo de 0 a 1.

H=0 → indica que [T] tem apenas um autovalor diferente de zero, representando apenas um processo determinístico de espalhamento.

H=1 → significa que os autovalores de [T] são todos iguais, indicando um processo de espalhamento do tipo "ruído aleatório" que despolariza completamente a onda incidente.



## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE CLOUDE)



### -Teorema da decomposição de Cloude: Anisotropia

Um segundo indicador importante, introduzida por Pottier, foi o conceito de "anisotropia polarimétrica", que é um indicador da importância relativa dos mecanismos de espalhamento secundários, sendo mais representativo quando ocorre média entropia, dada por:

**ANISOTROPIA:** 
$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}$$

- Para alta entropia a anisotropia não traz nenhuma informação adicional uma vez que os autovalores são aproximadamente iguais.

- Para baixa entropia os auto-valores  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  são próximos a zero.

- A média entropia significa que mais de um mecanismo de espalhamento contribui para o retroespalhamento, mas não esclarece quantos mecanismos.

Neste caso, a anisotropia pode fornecer informações adicionais, tais como:

- Uma alta anisotropia indica que apenas o segundo mecanismo de espalhamento é importante.

- Uma baixa anisotropia indica que o existe também a contribuição do terceiro mecanismo de espalhamento



## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE CLOUDE)



### Interpretação dos mecanismos de espalhamento:

Nos processos de classificação não é apenas necessário extrair e separar diferentes mecanismos de espalhamento, mas também identificar estes mecanismos de espalhamento. Como já visto anteriormente, a matriz de coerência diagonalizada pode ser representada por:

$$[T_3] = [U_3][\Lambda][U_3]^{-1} \quad \text{onde} \quad [U_3] = [\vec{e}_1 \ \vec{e}_2 \ \vec{e}_3]^T \quad \text{a matriz dos autovetores}$$

-Cada autovetor pode ser parametrizado em termos de 5 ângulos, ou seja:

$$\vec{e} = \begin{bmatrix} \cos \alpha e^{i\phi} \\ \cos \alpha \cos \beta e^{i\delta} \\ \text{sen} \alpha \text{sen} \beta e^{i\gamma} \end{bmatrix} \quad \text{onde} \quad \begin{cases} \alpha - \text{Tipo de mecanismo de espalhamento: } 0 \leq \alpha \leq 90^\circ \\ \beta - \text{Orientação do alvo: } -180^\circ \leq \beta \leq 180^\circ \\ \phi, \delta, \gamma - \text{Ângulos de fase do alvo} \end{cases}$$

$$[U_3] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 e^{i\theta_{11}} & \cos \alpha_2 e^{i\theta_{12}} & \cos \alpha_3 e^{i\theta_{13}} \\ \cos \alpha_1 \cos \beta_1 e^{i\theta_{21}} & \cos \alpha_2 \cos \beta_2 e^{i\theta_{22}} & \cos \alpha_3 \cos \beta_3 e^{i\theta_{23}} \\ \text{sen} \alpha_1 \text{sen} \beta_1 e^{i\theta_{31}} & \text{sen} \alpha_2 \text{sen} \beta_2 e^{i\theta_{32}} & \text{sen} \alpha_3 \text{sen} \beta_3 e^{i\theta_{33}} \end{bmatrix}$$

(1º Autovetor)
(2º Autovetor)
(3º Autovetor)

1º mecanismo de espalhamento
2º mecanismo de espalhamento
3º mecanismo de espalhamento



## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE CLOUDE)



### Interpretação dos mecanismos de espalhamento:

Os parâmetros  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  e  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  são estimados através dos autovetores:

$$\alpha_1 = \arccos(|e_{11}|), \quad \alpha_2 = \arccos(|e_{21}|), \quad \alpha_3 = \arccos(|e_{31}|)$$

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{e_{13}}{e_{12}}\right), \quad \beta_2 = \arctan\left(\frac{e_{23}}{e_{22}}\right), \quad \beta_3 = \arctan\left(\frac{e_{33}}{e_{32}}\right)$$

Os ângulos "α" e "β" e as fases são estimadas através da soma ponderada da intensidade de relativa de cada autovalor, dado por:

Ângulos:

$$\alpha = P_1 \alpha_1 + P_2 \alpha_2 + P_3 \alpha_3$$

$$\beta = P_1 \beta_1 + P_2 \beta_2 + P_3 \beta_3$$

Fases:

$$\Theta_1 = P_1 \Theta_{11} + P_2 \Theta_{12} + P_3 \Theta_{13}$$

$$\Theta_2 = P_1 \Theta_{21} + P_2 \Theta_{22} + P_3 \Theta_{23}$$

$$\Theta_3 = P_1 \Theta_{31} + P_2 \Theta_{32} + P_3 \Theta_{33}$$

onde:  $P_i = \lambda_i / \sum_{j=1}^3 \lambda_j$

O ângulo "β" representa a orientação física do espalhamento em relação a linha de visada do radar. Através dele, pode-se obter o ângulo de orientação do alvo, de maneira muito mais simples que utilizar a assinatura polarimétrica para determinar esta orientação.







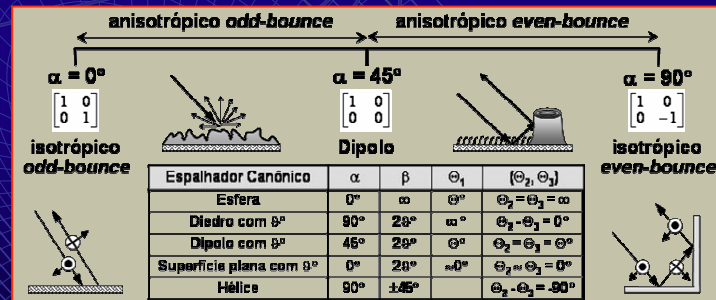
## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE CLOUDE)



### Interpretação dos mecanismos de espalhamento: ângulo $\alpha$

O ângulo " $\alpha$ " não está relacionado com a orientação do alvo, ele representa o grau de liberdade do alvo, e pode ser utilizado para descrever o tipo de mecanismo de espalhamento, como representado na figura:

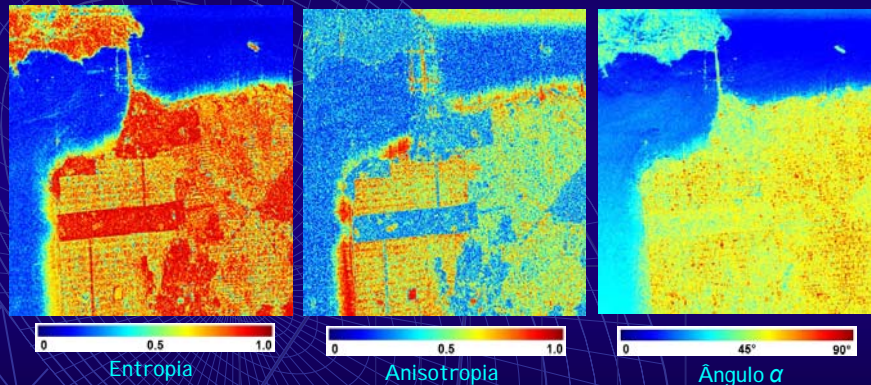
ÂNGULO  $\alpha$ :



## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE CLOUDE)



- Exemplo:

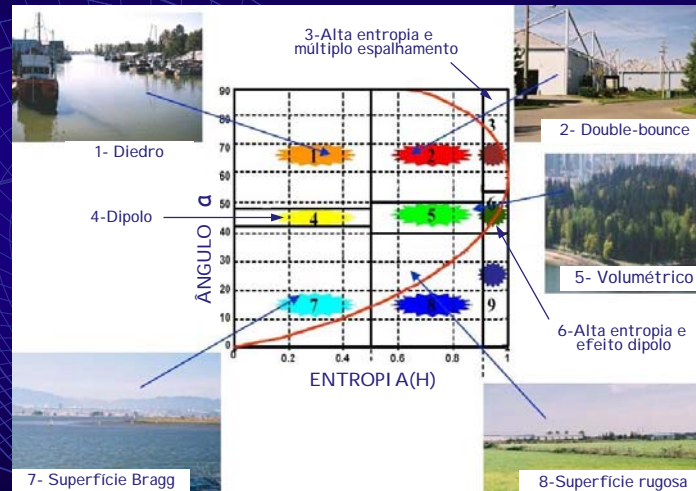




## DECOMPOSIÇÃO DE ALVOS (INCOERENTE DE CLOUDE)



- Segmentação no espaço H/ $\alpha$



XIII **BSR**

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

63



## CLASSIFICAÇÃO POLARIMÉTRICA



Os métodos de classificação de dados SAR polarimétricos podem ser divididos, basicamente, em quatro classes:

- 1) Algoritmos baseados em técnicas de classificação supervisionada (redes neurais) ou não-supervisionada (K-médias), sem nenhum modelo estatístico para os dados, onde, normalmente, não são utilizados os dados complexos
- 2) Algoritmos de classificação supervisionada baseados em um modelo estatístico para os dados
- 3) Algoritmos de classificação supervisionada ou não-supervisionada baseados nos Teoremas de Decomposição de Alvos
- 4) Algoritmos híbridos que utilizam as técnicas 2) e 3)

As técnicas mais importantes pertencem as classes 2), 3) e 4), pois empregam os dados polarimétricos completos (representados pela matriz de covariância ou coerência)

XIII **BSR**

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

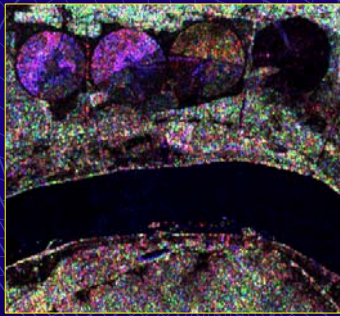
64



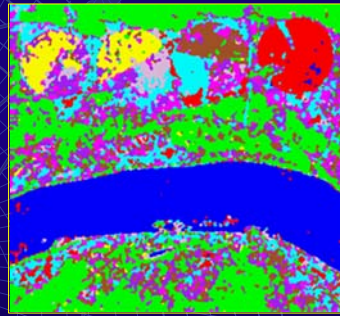
## CLASSIFICAÇÃO POLARIMÉTRICA



- Classificação por Modelagem Estatística:
  - Classificação Pontual/Contextual, com dados da banda L (missão SIR-C) (Correia, 1998), sobre uma área de pivôs irrigados



Composição Colorida  
R-HH G-HV B-VV



Exatidão Global de 87,61%

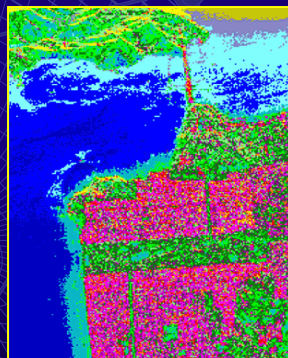
CAATINGA
MILHO1
MILHO2
RESTOLHO
RIO
SOLO
SOJA1
SOJA2
SOJA3



## CLASSIFICAÇÃO POLARIMÉTRICA



L / R-HV G-HH B-VV



16 classes ( $H_s/\alpha/A$ )





Superfície Especular Volume Double-bounce

Freeman







# Classificador Polarimétrico

## *Polarimetric Classifier 7*

<http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser410/laboratorio.php>

---

**XIII FBSR** Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 1

Classificador pontual Maxver e contextual ICM desenvolvidos com a linguagem I DL

O sistema dispõe de 7 classificadores:

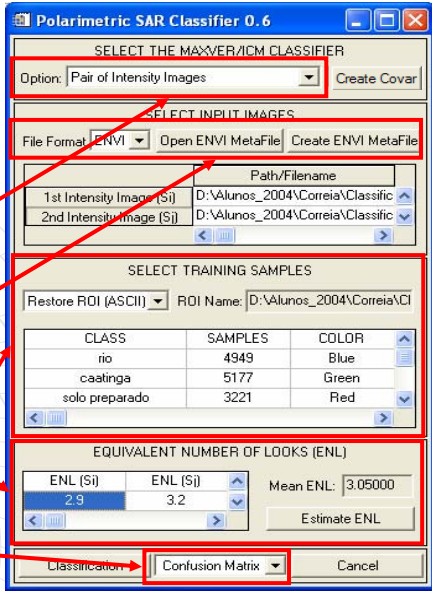
- 1) Par de imagens em intensidade
- 2) Razão de imagens em intensidade
- 3) Intensidade e Fase
- 4) Diferença de fase
- 5) Amplitude
- 6) Multivariado em Amplitude
- 7) Multivariado Complexo

Diferentes formatos de dados podem ser importados

Seleção de amostras de treinamento para as classes

Estimação do número equivalente de looks

Matriz de confusão e teste de hipóteses para as classificações



**Polarimetric SAR Classifier 0.6**

SELECT THE MAXVER/ICM CLASSIFIER  
Option: Pair of Intensity Images Create Covar

SELECT INPUT IMAGES  
File Format: ENVI Open ENVI MetaFile Create ENVI MetaFile

1st Intensity Image (S1): D:\Alunos\_2004\Correia\Classific  
2nd Intensity Image (S2): D:\Alunos\_2004\Correia\Classific

SELECT TRAINING SAMPLES  
Restore ROI (ASCII) ROI Name: D:\Alunos\_2004\Correia\CI

CLASS	SAMPLES	COLOR
rio	4949	Blue
caatinga	5177	Green
solo preparado	3221	Red

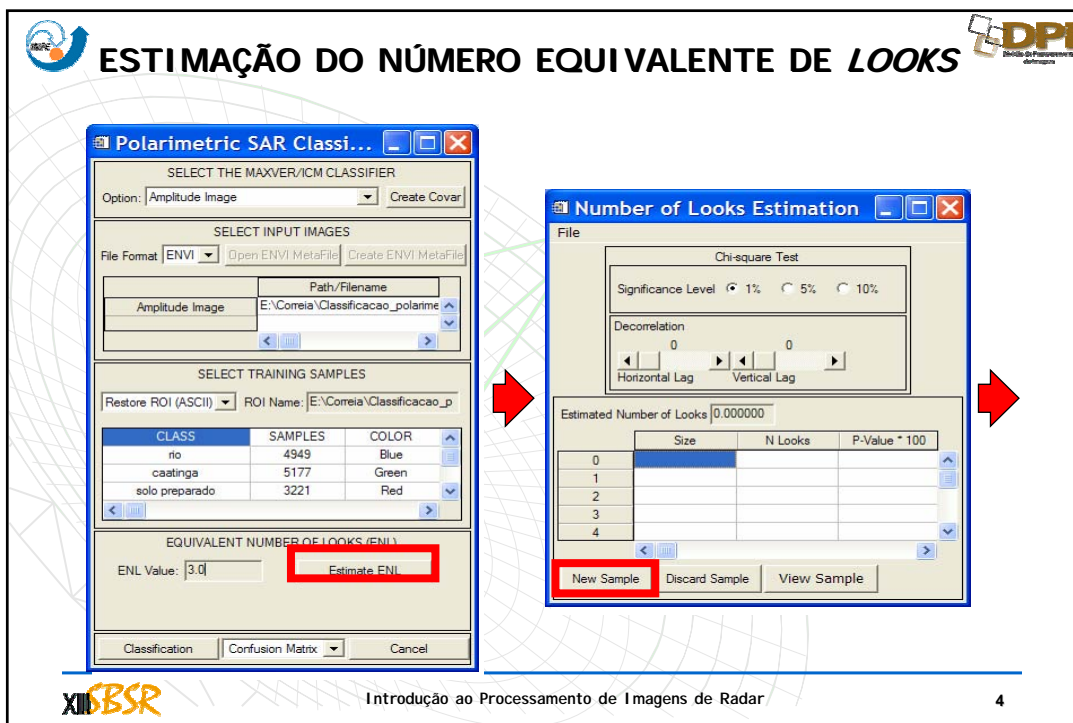
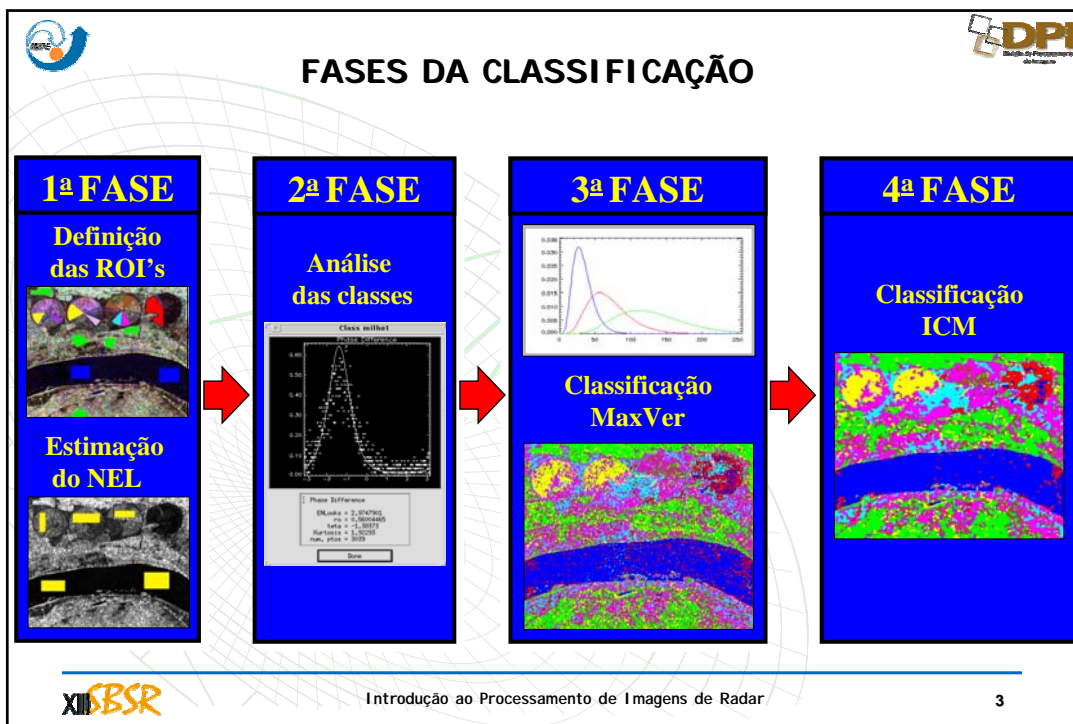
EQUIVALENT NUMBER OF LOOKS (ENL)  
ENL (S1): 2.9 ENL (S2): 3.2 Mean ENL: 3.05000  
Estimate ENL

Classification: Confusion Matrix Cancel

---

**XIII FBSR** Introdução ao Processamento de Imagens de Radar 2





**ESTIMAÇÃO DO NÚMERO EQUIVALENTE DE LOOKS**

The 'Select a sample' dialog box shows the 'Done' button highlighted in red. The SAR image window shows a blue rectangular selection box on a grayscale image. The 'Chi square goodness of fit test' window displays a normal distribution curve and the following statistics:

- Number of elements = 1318
- Minimum value = 2.00000
- Lower quartile (Q1) = 12.00000
- Median (Q2) = 15.00000
- Upper quartile (Q3) = 18.00000
- Maximum value = 30.00000
- Upper Mode = 13.00000
- Mean = 14.6369
- Variance = 20.4707
- Coefficient of variation = 0.304947
- Skewness = 0.381467
- Kurtosis = 0.210076
- Equivalent number of look = 2.79903
- P-Value = 0.623283
- Level of confidence = 0.0100000
- Result = ACCEPT

**XIII FBSR** Introdução ao Processamento de Imagens de Radar **5**

**CLASSIFICADOR MONOESPECTRAL EM AMPLITUDE**

The 'Polarimetric SAR Classifier' dialog box shows the following configuration:

- Option: Amplitude Image
- Amplitude Image Path: E:\Correia\Classificacao\_polarime
- ROI Name: E:\Correia\Classificacao\_p
- Equivalent Number of Looks (ENL): 3.0



The 'Information and Decisions about ICM' dialog box shows the following configuration:

- Image to apply ICM: D:\Alunos\_2004\Correia\
- Information Classes: ROIs
- Contextual Image: MLC
- Equivalent Number of Looks: 3.00000

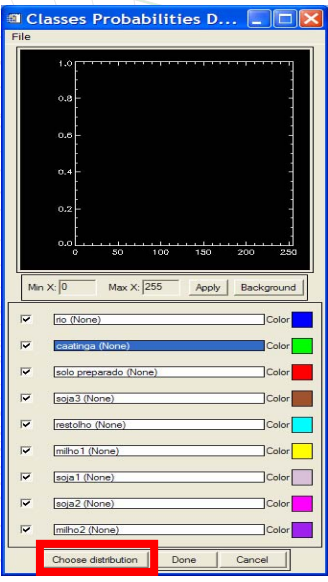
CLASS	SAMPLES	COLOR
rio	4949	Blue
coatinga	5177	Green
solo preparado	3221	Red

**XIII FBSR** Introdução ao Processamento de Imagens de Radar **6**

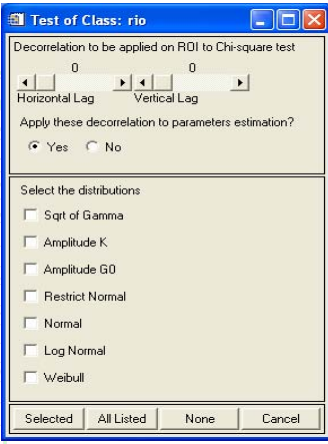
**CLASSIFICADOR MONOESPECTRAL EM AMPLITUDE**





**Classes Probabilities D...**



**Test of Class: rio**







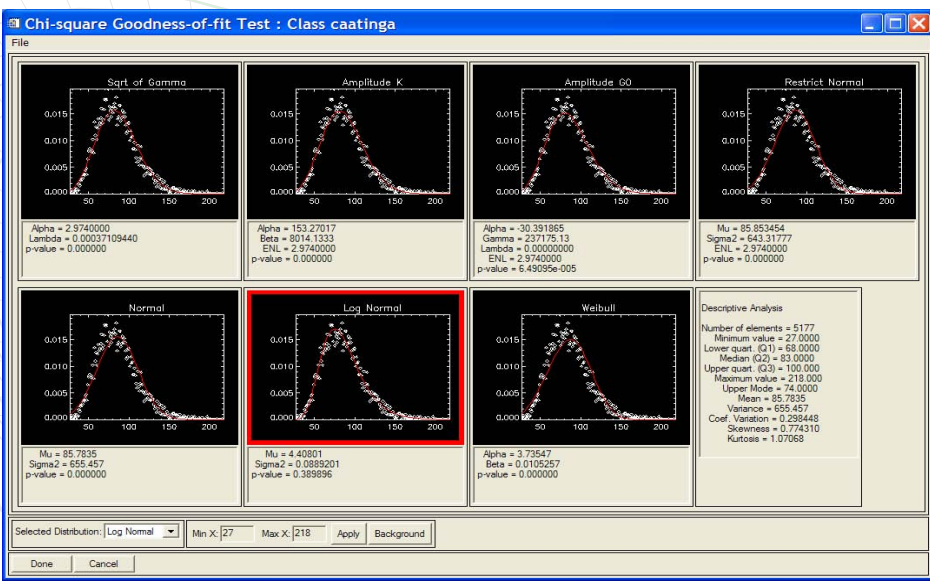
Introdução ao Processamento de Imagens de Radar


7

**CLASSIFICADOR MONOESPECTRAL EM AMPLITUDE**

**Chi-square Goodness-of-fit Test : Class caatinga**



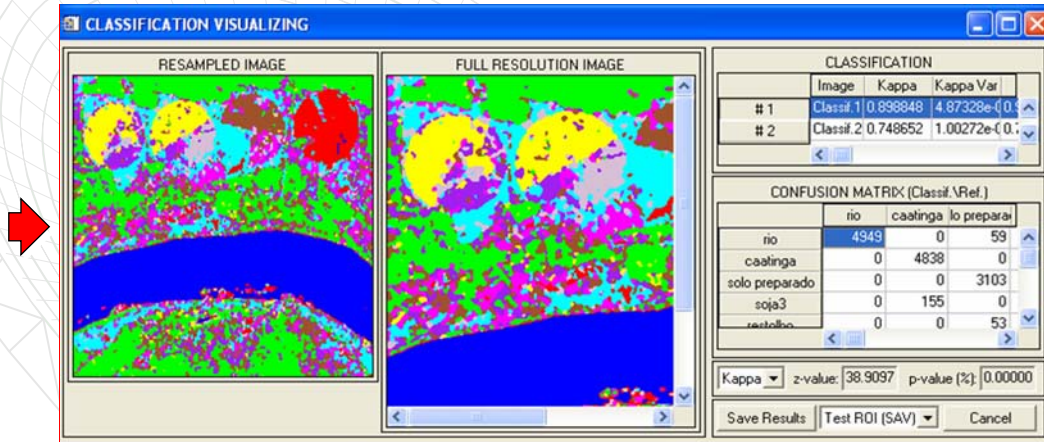


Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

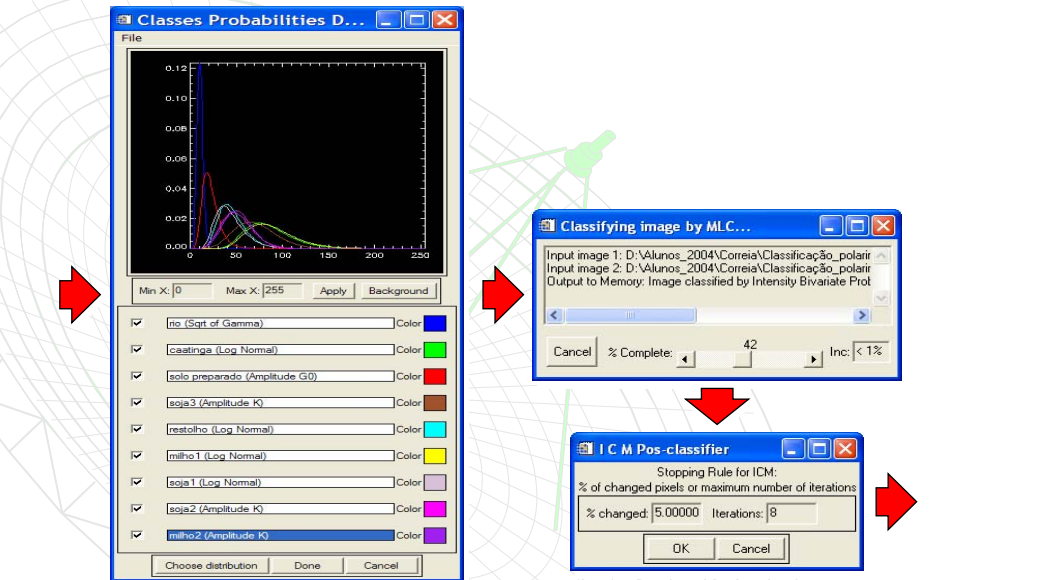
8




## CLASSIFICADOR MONOESPECTRAL EM AMPLITUDE




## CLASSIFICADOR MONOESPECTRAL EM AMPLITUDE







## CLASSIFICADOR POLARIMÉTRICO UNIVARIADO E BIVARIADO



**Polarimetric SAR Classi...**

SELECT THE MAXVER/ICM CLASSIFIER  
Option: Pair of Intensity Images Create Covar

---

SELECT INPUT IMAGES  
File Format: ENVI Open ENVI MetaFile Create ENVI MetaFile

1st Intensity Image (S1): E:\Correia\Classificacao\_polarime  
2nd Intensity Image (S2):

---

SELECT TRAINING SAMPLES  
Restore ROI (ASCII) ROI Name: E:\Correia\Classificacao\_p

CLASS	SAMPLES	COLOR
rio	4949	Blue
caatinga	5177	Green
solo preparado	3221	Red


---

EQUIVALENT NUMBER OF LOOKS (ENL)  
ENL (S1): ENL (S2): Mean ENL: 2.9749  
Estimate ENL

Classification Confusion Matrix Cancel


Ratio of Intensity Images  
Phase Difference Image  
Pair of Intensity Images  
Pair Intensity-Phase Difference Images

➔




Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

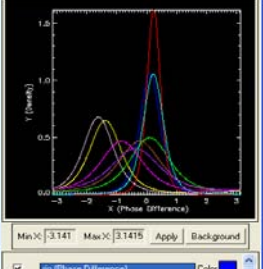
11



## CLASSIFICADOR POLARIMÉTRICO UNIVARIADO E BIVARIADO



**Classes Probabilities Density Fun...**

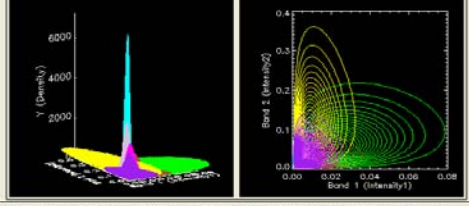


Min x: 3.1417 Max x: 3.1415 Apply Background

- rio (Phase Difference) Color: Blue
- caatinga (Phase Difference) Color: Green
- solo preparado (Phase Difference) Color: Red
- coxa1 (Phase Difference) Color: Brown
- castanho (Phase Difference) Color: Cyan
- milho1 (Phase Difference) Color: Yellow
- coxa2 (Phase Difference) Color: Grey
- coxa3 (Phase Difference) Color: Purple

View Histogram Classification Cancel

**Classes Probabilities Density Functions**




Plot x: 15 Plot z: 30 Max x: 0.08 Max y: 0.4 Max z: 7235.6 NLevels: 20 Apply Background

- rio (Intensity Bivariate) Color: Blue
- caatinga (Intensity Bivariate) Color: Green
- solo preparado (Intensity Bivariate) Color: Red
- coxa3 (Intensity Bivariate) Color: Brown
- castanho (Intensity Bivariate) Color: Cyan
- milho1 (Intensity Bivariate) Color: Yellow
- coxa1 (Intensity Bivariate) Color: Grey
- coxa2 (Intensity Bivariate) Color: Purple
- milho2 (Intensity Bivariate) Color: Purple

View Histogram Classification Cancel

➔



Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

12

**CLASSIFICADOR POLARIMÉTRICO UNIVARIADO E BIVARIADO**

Image	Kappa	Kappa Var
# 1	Classif.1 0.898848	4.87328e-01
# 2	Classif.2 0.748652	1.00272e-01

	rio	caatinga	lo preparado
rio	4949	0	59
caatinga	0	4838	0
solo preparado	0	0	3103
soja3	0	155	0
total	0	0	53

Kappa: [dropdown] z-value: 38.9097 p-value (%): 0.00000

Buttons: Save Results, Test ROI (SAV), Cancel

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

**CLASSIFICADOR POLARIMÉTRICO MULTIVARIADO**

Option: Full Multipolarimetric Images

File Format: ENVI

CLASS	SAMPLES	COLOR
rio	4949	Blue
caatinga	5177	Green
solo preparado	3221	Red

Mean ENL: 2.9749

Buttons: Classification, Confusion Matrix, Cancel

Reciprocal Medium (Shv=Svh?): Yes

Enter with Number of Band: 1

Enter with Name of Band (example:L-C-X): L

Introdução ao Processamento de Imagens de Radar

**CLASSIFICADOR POLARIMÉTRICO MULTIVARIADO**

**XIBSR** Introdução ao Processamento de Imagens de Radar **DPI** 15

**CLASSIFICADOR POLARIMÉTRICO MULTIVARIADO**

**XIBSR** Introdução ao Processamento de Imagens de Radar **DPI** 16



## CLASSIFICADOR POLARIMÉTRICO MULTIVARIADO

**CLASSIFICATION**

#	Image	Kappa	Kappa Var
# 1	Classif.1	0.898848	4.87328e-01
# 2	Classif.2	0.748652	1.00272e-01

**CONFUSION MATRIX (Classif.\Ref.)**

	rio	caatinga	lo preparado
rio	4949	0	59
caatinga	0	4838	0
solo preparado	0	0	3103
soja3	0	155	0
matadouro	0	0	53

Kappa:  z-value: 38.9097 p-value (%): 0.00000

Save Results | Test ROI (SAV) | Cancel





## Interferometria de imagens SAR

Tópicos:

### A) Conceitos Básicos

- 1 - Introdução
- 2 - Interferometria SAR (InSAR)
- 3 - Cartografia InSAR
- 4 - Interferometria diferencial
- 5 - Interferometria Polarimétrica

### B) Exemplos de aplicações

- 1 - Projeto São Francisco
- 2 - Experimento Banda P (Flona)
- 3 - Missão SRTM
- 4 - Missão Tandem (ERS1/2)



## Interferometria de imagens SAR

### A) CONCEITOS BÁSICOS

#### 1 - Introdução:

- A interferometria SAR esta baseada na combinação de duas imagens SAR, adquiridas sobre a mesma área, com uma geometria de aquisição ligeiramente diferente uma da outra, para garantir o efeito de interferometria, ou diferença de fase.
- A diferença de fase entre pixels de mesma coordenada nas imagens, esta relacionada à distância entre as duas trajetórias durante as aquisições, linha-base, e a altitude correspondente no solo.

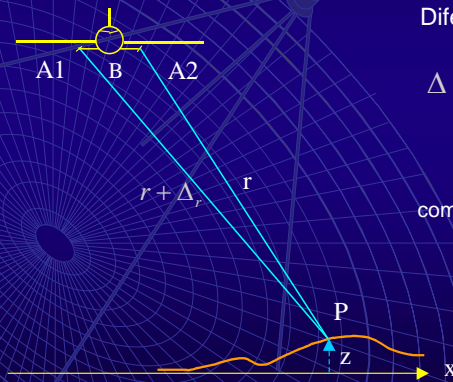




## Interferometria de imagens SAR

### 2 - Conceitos básicos da Interferometria SAR (InSAR)

- Modos de Aquisição: uma passagem



Diferença de fase

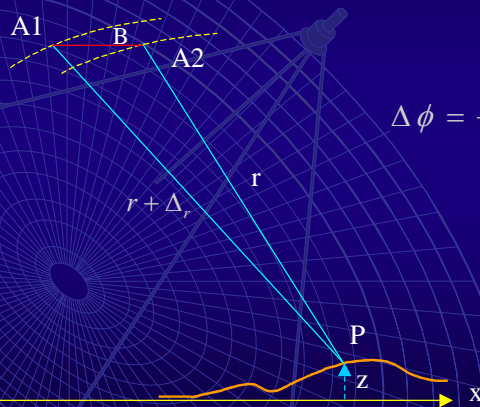
$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda_T}$$

comprimento de onda



## Interferometria de imagens SAR

- Modos de Aquisição: duas passagens



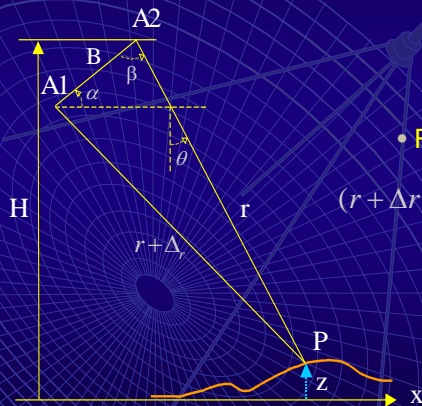
$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta r}{\lambda_T}$$





## Interferometria de imagens SAR

### Equacionamento InSAR básico



- Diferença de fase

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta r}{\lambda_T}$$

- Relações trigonométrica

$$(r + \Delta r)^2 = r^2 + B^2 - 2rB \sin(\alpha - \theta)$$

$$r = \frac{B^2 - \Delta r^2}{2(\Delta r + B \sin(\alpha - \theta))}$$

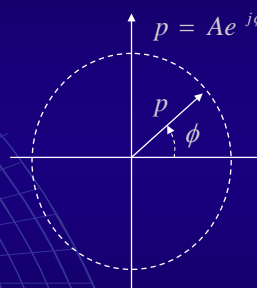
- Cálculo da elevação

$$z(r, \theta) = H - r \cos \theta$$



## Interferometria de imagens SAR

### Diferença de fase



Representação polar



## Interferometria de imagens SAR

### Registro das imagens

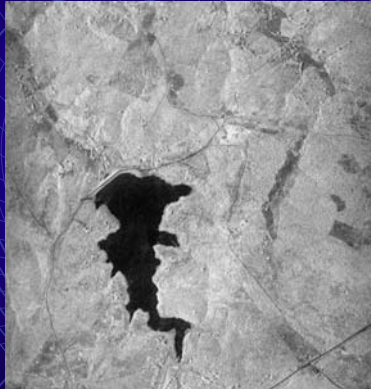


Imagem 1



Imagem 2



## Interferometria de imagens SAR

### Métodos de registro das imagens

- Como em geral existe uma alta correlação entre as duas imagens, métodos automáticos podem ser empregados.
- a) Registro grosseiro
  - Utiliza-se os dados de efemérides da plataforma (velocidade e posição) para um primeiro registro das imagens.
- b) Registro fino
  - Consiste em aplicar um registro da ordem de sub-píxel para que todas as distorções das imagens sejam corrigidas, para se obter um interferograma com um baixo nível de ruído.

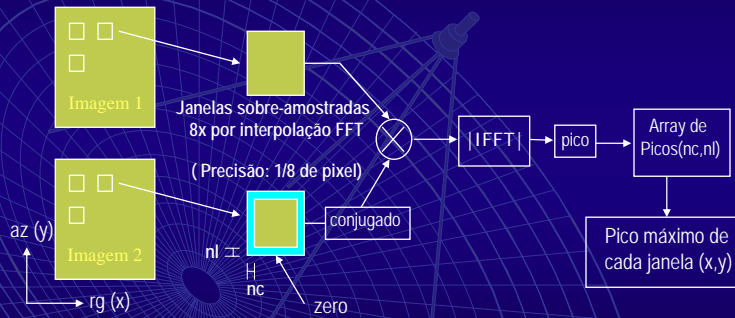






## Interferometria de imagens SAR

### Registro fino das imagens – Método do espectro máximo



- Cria polinômios de deformação nas direções x e y, a partir dos picos máximos de cada janela
- Reamostra a imagem 2 na direção de range, utilizando o polinômio em x
- Reamostra a imagem 2 na direção de azimute, utilizando o polinômio em y



## Interferometria de imagens SAR

### Geração do interferograma

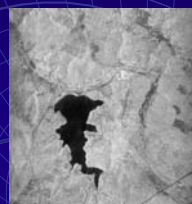


Imagem 1

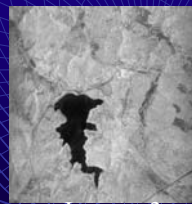
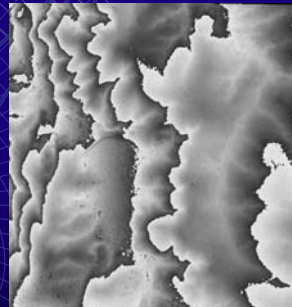


Imagem 2



$$p_{\text{int}} = p_1 \cdot p_2^* = A_1 \cdot A_2 e^{j(\phi_1 - \phi_2)}$$

$$\Delta\phi_P = \arg \cdot p_{\text{int}} = \phi_1 - \phi_2$$

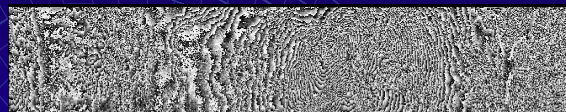


Interferograma (fase módulo  $2\pi$ )

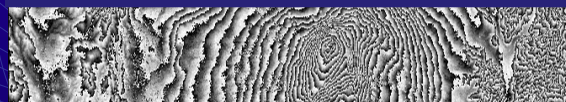


## Interferometria de imagens SAR

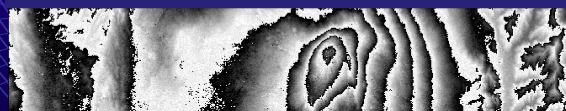
### Interferograma e a banda utilizada



Banda X ( $\lambda \cong 3 \text{ cm}$ )



Banda C ( $\lambda \cong 5 \text{ cm}$ )



Banda L ( $\lambda \cong 23 \text{ cm}$ )

A frequência espacial das franjas do interferograma depende do comprimento de onda utilizado.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta r}{\lambda_T}$$



## Interferometria de imagens SAR

### Coerência interferométrica

- Fornece a medida da qualidade do interferograma através do coeficiente de correlação complexo:

$$\tilde{\gamma} = \frac{E\{p_1 p_2^*\}}{\sqrt{E\{|p_1|^2\} \cdot E\{|p_2|^2\}}} = |\tilde{\gamma}| e^{j\phi} \quad \dots \text{ Fase interferométrica}$$

$$\phi = \arg\{\tilde{\gamma}\}$$

$$\gamma = |\tilde{\gamma}| \quad \dots \text{ Coeficiente de correlação normalizado } 0 \leq \gamma \leq 1$$

$$\text{Contribuições na decorrelação: } \gamma = \gamma_{\text{Temporal}} \gamma_{\text{SRN}} \gamma_{\text{espacial}}$$

$\gamma_{\text{Temporal}}$  ... Decorrelação temporal (interferometria de duas passagens)

$\gamma_{\text{SRN}}$  ... Decorrelação por ruídos (baixo sinal de retorno)

$\gamma_{\text{espacial}}$  ... Decorrelação geométrica (causada pela linha-base)





## Interferometria de imagens SAR

### Coerência interferométrica: estimador

- Assumindo estacionaridade e cena homogênea:

$$\tilde{\gamma} = \frac{|\langle\langle p_1 p_2^* \rangle\rangle|}{\sqrt{\langle\langle |p_1|^2 \rangle\rangle \cdot \langle\langle |p_2|^2 \rangle\rangle}} \quad \text{onde: } \langle\langle p_1 \rangle\rangle = \sum_{i=0}^{N_1} p_{1i} \quad (\text{Média espacial})$$

Um número grande de amostras permite uma estimativa não tendenciosa, mas acarreta perda de resolução espacial

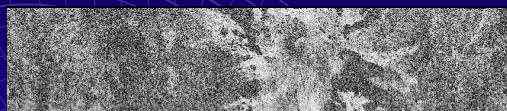
### Imagem de coerência

(módulo do coeficiente de correlação complexo)



## Interferometria de imagens SAR

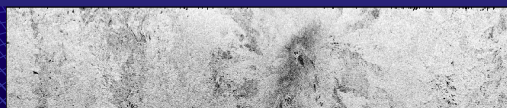
### Variação da Coerência com a banda utilizada



Banda X ( $\lambda \cong 3 \text{ cm}$ )



Banda C ( $\lambda \cong 5 \text{ cm}$ )



Banda L ( $\lambda \cong 23 \text{ cm}$ )

O grau de coerência varia de acordo com a relação sinal/ruído do sinal recebido, que é função do comprimento de onda utilizado.





## Interferometria de imagens SAR

### Ruídos na fase interferométrica

O interferograma é composto pela fase induzida pela topografia e o ruído de fase.

Fontes de ruído de fase:

- Descorrelação temporal
- Descorrelação devido a baseline (diferente ângulo de aquisição)
- Erro no registro das imagens
- Ruído térmico
- Ruído Speckle
- Erros na geração das imagens (processamento SAR)



## Interferometria de imagens SAR

### Filtros de fase

-O estimador ótimo para o interferograma, no sentido da máxima verossimilhança, é obtido através da média espacial das componentes complexas do sinal.

-Esta média, para reduzir a variação estatística do ruído, é também conhecida como "multi-look"

-O ruído de fase pode ser estimado a partir da coerência e do número de "looks"

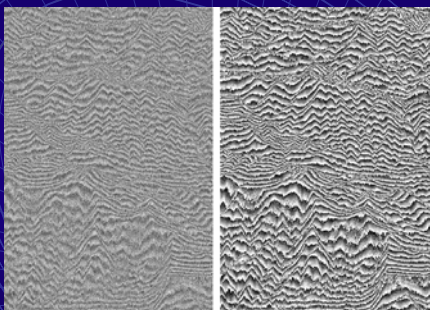
$$\sigma_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{2} N_{looks}} \frac{\sqrt{1 - |\gamma|}}{|\gamma|}$$





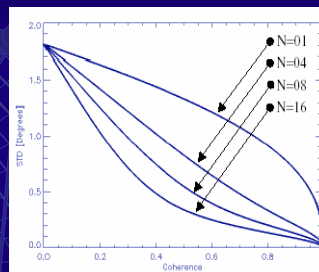
## Interferometria de imagens SAR

### Filtros de fase: exemplo de "multi-look"



Interferograma de 1 "look"

10 "looks"



Desvio padrão da fase em função da coerência e do número de "looks"

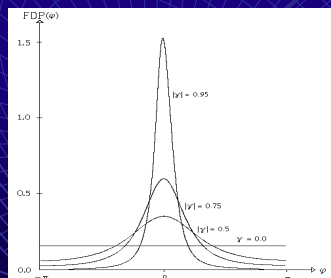


## Interferometria de imagens SAR

### Estatística do ruído de fase: 1 look

-O ruído de fase, para interferograma de 1 "look", pode ser modelado pela seguinte função densidade de probabilidade: (Bamler)

$$f_{dP}(\phi) = \frac{1-|\gamma|^2}{2\pi} \frac{1}{1-|\gamma|^2 \cos^2(\phi-\phi_0)} \left\{ 1 + \frac{|\gamma| \cos(\phi-\phi_0) \arccos[-|\gamma| \cos(\phi-\phi_0)]}{[1-|\gamma|^2 \cos^2(\phi-\phi_0)]^{3/2}} \right\}$$



A variância do ruído de fase esta diretamente ligada ao coeficiente de correlação (coerência) entre as imagens .

Valor médio:  $E\{\phi\} = \phi_0$

Variância:  
 $\sigma_\phi^2 = E\{(\phi - \phi_0)^2\} = \int_{-\pi}^{\pi} \phi^2 f_{dP}(\phi + \phi_0) d\phi$



## Interferometria de imagens SAR

### Estadística do ruído de fase: Multi-look

-O ruído de fase, para interferograma de N "looks", pode ser modelado pela seguinte função densidade de probabilidade:

$$f_{dp}(\phi) = \frac{\Gamma(N+0.5)(1-\gamma^2)^N \gamma \cos(\phi-\phi_0)}{2\sqrt{\pi}\Gamma(N)[1-\gamma^2 \cos^2(\phi-\phi_0)]^{N+0.5}} \frac{(1-\gamma^2)^N}{2\pi} F(N,1|0.5|[\gamma \cos(\phi-\phi_0)]^2)$$

Onde: N é o número de amostras independentes (número de "looks")

$\phi_0 = E\{\phi\}$  Valor médio da fase (informação da topografia)

$F(\dots)$  Função hipergeométrica de Gauss

$\Gamma(\dots)$  Função Gamma

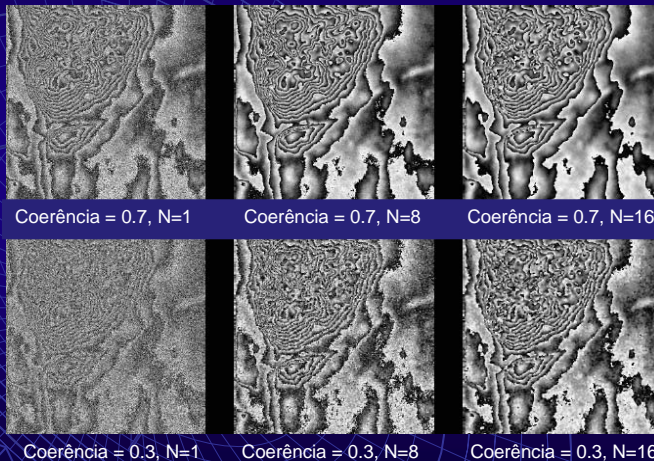
$\sigma_\phi^2 = E\{(\phi-\phi_0)^2\} = \int_{-\pi}^{\pi} \phi^2 f_{dp}(\phi+\phi_0) d\phi$  Variância

Nota-se que a  $f_{dp}(\phi)$  depende apenas de  $\gamma$  e  $N$



## Interferometria de imagens SAR

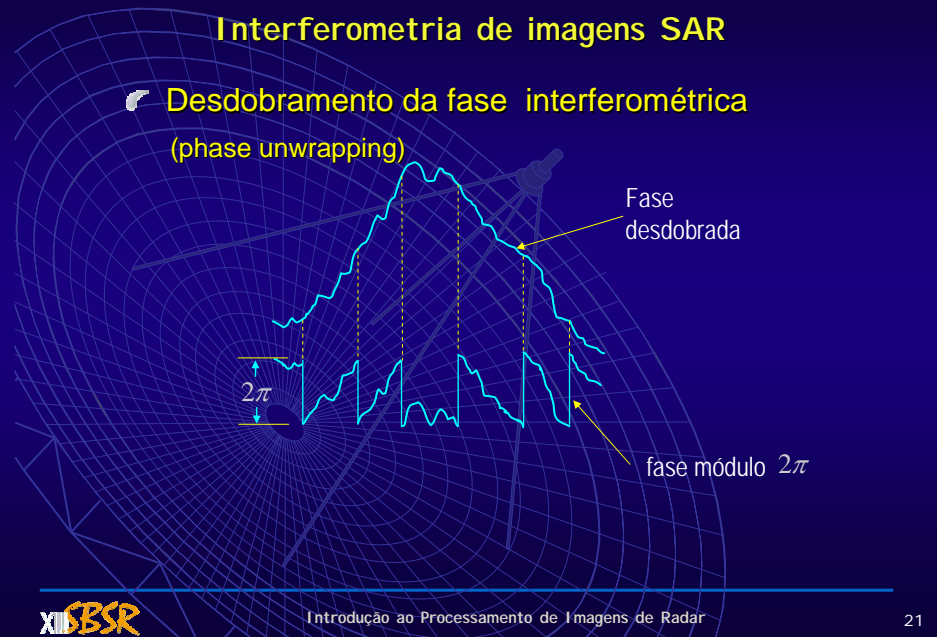
### Ruído de fase e números de looks





## Interferometria de imagens SAR

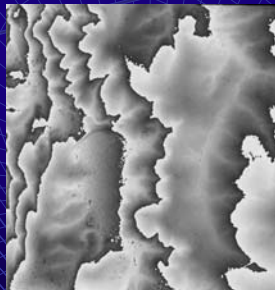
### Desdobramento da fase interferométrica (phase unwrapping)



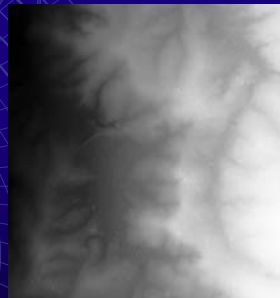
## Interferometria de imagens SAR

### Desdobramento da fase interferométrica (phase unwrapping)

- Métodos locais: resíduos, crescimento de regiões
- Métodos globais: busca minimizar o erro global (mínimos quadrados, técnicas de multi-resolução)



Interferograma



Fase desdobrada



## Interferometria de imagens SAR

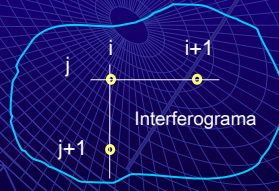
### Desdobramento da fase interferométrica : Gradiente de fase

Considerando um interferograma como uma grade de pontos de tamanho  $N \times M$ , define-se um operador  $W\{\}$ , que coloca seu argumento na faixa de  $-\pi$  a  $\pi$  pela adição ou subtração de um número inteiro de  $2\pi$  em seu argumento.

Por exemplo:  $\phi = 5.3\pi \Rightarrow W\{\phi\} = 5.3\pi - 3 \cdot 2\pi = -0.7\pi$   
 $\phi = -3.2\pi \Rightarrow W\{\phi\} = -3.2\pi + 2 \cdot 2\pi = 0.8\pi$

A diferença de fase entre pontos adjacentes deve ser menor ou igual a  $\pi$  (critério de Niquist), quando os dados estão corretamente amostrados, ou seja, sem ruído local ou problema de sombra ou inversão nas imagens.

Denota-se a diferença de fase ou gradiente de fase entre as amostras por:



$$\Delta_{ij}^x = W\{\phi_{(i+1,j)} - \phi_{(i,j)}\}$$

$$\Delta_{ij}^y = W\{\phi_{(i,j+1)} - \phi_{(i,j)}\}$$

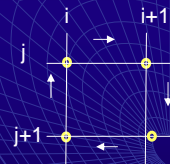


## Interferometria de imagens SAR

### Desdobramento da fase interferométrica: Método Local

#### - Método dos resíduos:

O método dos resíduos baseia-se na localização de pontos de inconsistência de fase (resíduos). A localização destes pontos é feita através da integração ao redor de um caminho fechado, em 4 pixels vizinhos, computando os gradientes de fase no sentido horário, ou seja:



$$\tau = (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{i,j+1}^x) + (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{i+1,j}^y)$$

Cálculo do resíduo no interferograma

Se :  $\left\{ \begin{array}{l} \tau > \pi \Rightarrow \text{resíduo positivo} \\ \tau < \pi \Rightarrow \text{resíduo negativo} \\ \tau = 0 \Rightarrow \text{fase consistente} \end{array} \right.$





## Interferometria de imagens SAR

### Desdobramento da fase interferométrica

#### - Método Local: Método dos resíduos

Após a determinação dos pontos de resíduos, conecta-se os resíduos de cargas opostas, formando uma barreira chamada de "linha de corte", para evitar que durante o processo de desdobramento de fase, estes pontos sejam levados em conta.



Identifica e isola os pontos onde há inconsistência da fase (resíduos), para evitar a propagação de erro durante o processo de desdobramento da fase.

Fase desdobrada

Linha de corte feita através dos resíduos



## Interferometria de imagens SAR

### Desdobramento da fase interferométrica

#### - Método Global: Método dos mínimos quadrados

Um interferograma é uma grade de pontos de tamanho  $N \times M$ , com valores de fase  $\varphi(i, j)$ , módulo  $2\pi$ . Deseja-se determinar para cada ponto o valor da fase desdobrada,  $\Psi(i, j)$ , de tal maneira que o gradiente de fase em  $\varphi$  concorda com a diferença da fase desdobrada em  $\Psi$ , no sentido dos mínimos quadrados.

A solução da condição acima é a solução que minimiza a equação abaixo, no sentido dos mínimos quadrados:

$$\sum_{i=0}^{M-2N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left[ (\psi_{i+1, j} - \psi_{i, j}) - \Delta_{i, j}^x \right]^2 + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} \left[ (\psi_{i, j+1} - \psi_{i, j}) - \Delta_{i, j}^y \right]^2$$





## Interferometria de imagens SAR

### Desdobramento da fase interferométrica

#### - Método Global: Método dos mínimos quadrados

Derivando a equação anterior em relação a  $\Psi(i,j)$ , e igualando o resultado a zero, chega-se na seguinte equação:

$$(\Psi_{i,j+1} - 2\Psi_{i,j} + \Psi_{i,j-1}) + (\Psi_{i+1,j} - 2\Psi_{i,j} + \Psi_{i-1,j}) = \rho_{i,j}$$

onde  $\rho_{i,j}$  é o Laplaciano da fase, definido por:

$$\rho_{i,j} = (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{i,j-1}^x) + (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{i-1,j}^y)$$

- Solução da equação acima pode ser obtida por métodos iterativos, como por exemplo, o método de relaxação de Gauss-Seidel

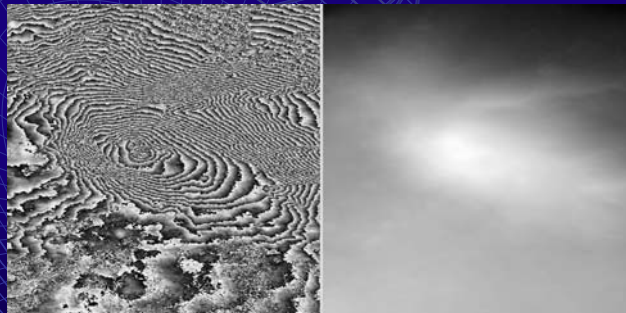


## Interferometria de imagens SAR

### Desdobramento da fase interferométrica

#### - Método Global: Método dos mínimos quadrados

Exemplo: Monte Etna (imagens do SIR-C, banda L)



Interferograma

Fase desdobrada

OBS. Este método mascara os erros locais



## Interferometria de imagens SAR

### Ângulo de inclinação limite

Uma das limitações do sistema interferométrico SAR, é a máxima inclinação da superfície que o sistema consegue medir sem ambigüidade.

A maior variação de fase que o sistema pode medir, sem ambigüidade, entre duas amostras é  $\pi$ .

Quando se tem uma rampa muito inclinada na superfície, essa diferença é maior que  $\pi$ , caracterizando uma sub-amostragem na fase.

A máxima inclinação de superfície que o sistema suporta e dada por:

$$\beta_{\text{lim}} = \arctan \left( \frac{\lambda r \text{sen } \theta}{4 S_p B_n} \right)$$

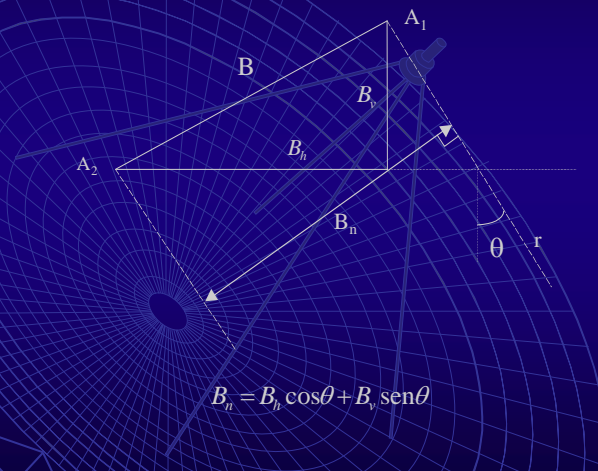
Espaçamento entre pixels

Linha-base normal



## Interferometria de imagens SAR

### Linha-base Normal



$$B_n = B \cos \theta + B_v \text{sen } \theta$$





## Interferometria de imagens SAR

- Exemplo de um Sistema Interferométrico SAR com múltiplas linha-base



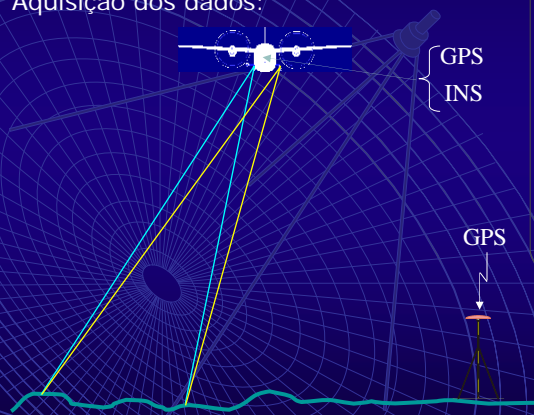
Sistema InSAR OrbiSAR-1  
(Empresa Orbisat da Amazônia)



## Interferometria de imagens SAR

### 3 - Cartografia InSAR

Aquisição dos dados:



Dados de Navegação  
(DGPS+INS)  
↓  
Vetor de estado da plataforma  
( $\vec{v}$ ,  $\vec{P}$ )





## Interferometria de imagens SAR

### • Aplicação em Cartografia

Fluxo de processamento :



## Interferometria de imagens SAR

### • Cartografia InSAR: "Offset" de fase

• O "offset" de fase é a principal fonte de erro na geração do Modelo de Elevação do Terreno:

• Fontes do "offset" de fase:

- Comprimento de onda do sinal emitido normalmente é bem menor que a célula de resolução

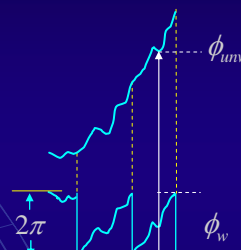
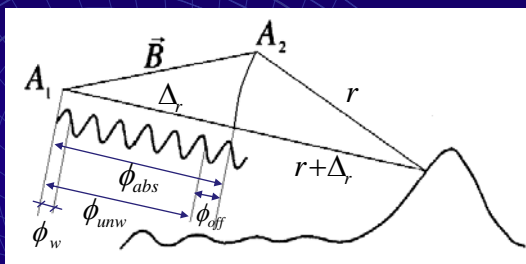
- Processo de desdobramento de fase

- Incerteza na medida do "range delay": (desvio na frequência do relógio do radar, desvio na amostragem dos dados, mudança na ionosfera)



## Interferometria de imagens SAR

- Componentes da fase interferometrica:



$\phi_w$ : Interferograma ( $-\pi$  a  $\pi$ ) (phase wrapped)

$\phi_{unw}$ : Fase desdobrada (phase unwrapped)  $= \Delta\phi + 2\pi K_{unw}$

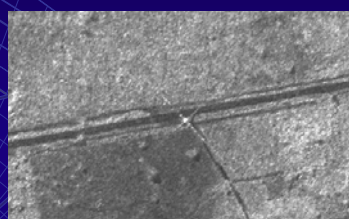
$\phi_{off}$ : Offset de fase

$\phi_{abs} = \phi_{unw} + \phi_{off}$ : Fase absoluta (devido somente a topografia)



## Interferometria de imagens SAR

• Calibração de fase e geração da fase absoluta



Ponto conhecido na imagem

$(l_p, c_p)$

• Localização do ponto medido por GPS:  $(p_x, p_y, p_z)$

• Cálculo do valor de "offset" de fase:  $\phi_{off} = \phi_{abs(p)} - \phi_{unw(l_p, c_p)}$

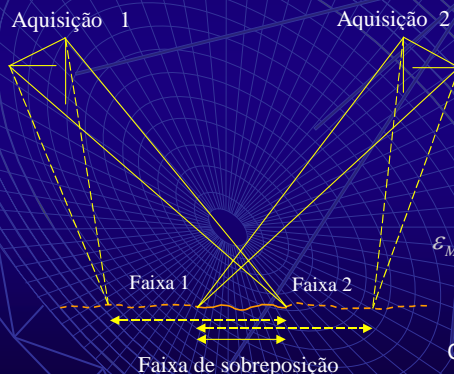
• Fase absoluta:  $\phi_{abs(l, c)} = \phi_{unw(l, c)} + \phi_{off}$    
 Calculada por geocodificação inversa



## Interferometria de imagens SAR

### • Calibração de fase: Método da minimização de erro entre METs

- Objetivo: achar os valores de "offset" de fase das duas aquisições de tal maneira que o erro entre os METs na área de sobreposição seja mínimo.



• Algoritmo: Minimização da função de erro:

$$\varepsilon_{MNT} = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} [MET_1(i,j) - MET_2(i,j)]^2}{N_{janela}}}$$

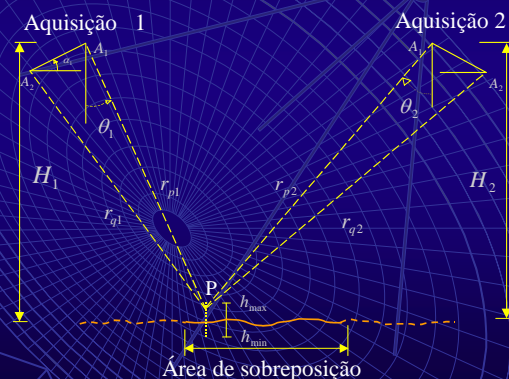
Característica: custo computacional grande



## Interferometria de imagens SAR

### • Calibração de fase: Método das funções de "offset" de fase

- Objetivo: achar os valores de "offset" de fase das duas aquisições, de tal maneira que o erro entre os METs, na área de sobreposição, seja mínimo.



Característica: baixo custo computacional

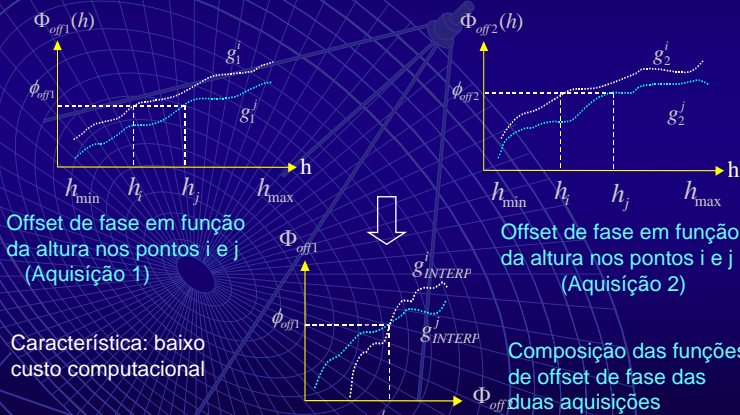




## Interferometria de imagens SAR

- **Calibração de fase: Método das funções de "offset" de fase**

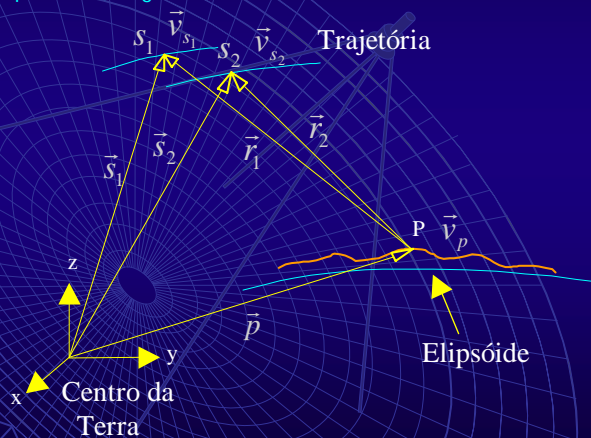
- Dado dois pontos em "range" distintos,  $i$  e  $j$ , na região de sobreposição



## Interferometria de imagens SAR

- **Geocodificação InSAR**

Representação gráfica:







## Interferometria de imagens SAR

### • Geocodificação InSAR: Formulação "range-Doppler"

- Determinação das coordenadas do ponto P (Px, Py, Pz) no Sistema Cartesiano :

Antena 1

Equação de "range"

$$r_1 = |\vec{r}_1| = |\vec{P} - \vec{S}_1|$$

Equação Doppler

$$f_{D_1} = \frac{(\vec{P} - \vec{S}_1) \cdot \vec{V}_{s_1}}{r_1} \frac{2}{\lambda}$$

Antena 2

Equação de "range"

$$r_2 = r_1 + \Delta_r = r_1 + \frac{\lambda \phi_{abs}}{4\pi}$$

Equação Doppler

$$f_{D_2} = \frac{(\vec{P} - \vec{S}_2) \cdot \vec{V}_{s_2}}{r_2} \frac{2}{\lambda}$$

Os vetores de estado,  $\vec{S}$  e  $\vec{V}$ , das plataformas são conhecidos, bem como as frequências de Doppler  $f_{D_1}$  e  $f_{D_2}$  central de cada imagem.

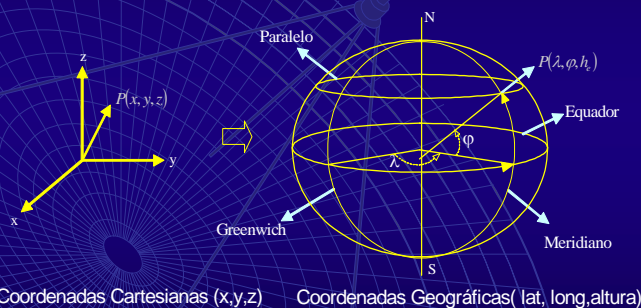
- As quatro equações formam um sistema de equações não lineares, cuja solução pode ser obtida por método numérico iterativo, tal como o método de Newton, por exemplo.



## Interferometria de imagens SAR

### • Geocodificação InSAR: Transformação de coordenadas

- Projecção do ponto P(x,y,z) para um elipsóide de referência :  $P(x, y, z) \Rightarrow P(\lambda, \alpha, h_{WGS-84})$



Coordenadas Cartesianas (x,y,z)

Coordenadas Geográficas (lat, long, altura)

$$\frac{p_x^2 + p_y^2}{(a+h)^2} + \frac{p_z^2}{(b+h_e)^2} - 1 = 0$$

$a$  e  $b$  representam os valores dos semi-eixos maior e menor do elipsóide e  $h$  a altura do ponto em relação ao elipsóide





## Interferometria de imagens SAR

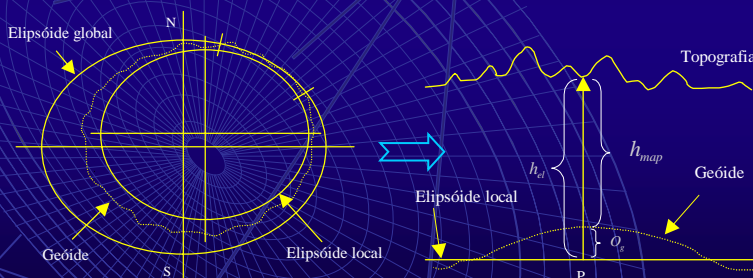
### • Geocodificação InSAR: Transformação de coordenadas

Transformação:  
( elipsóide global para local )

$$P(\lambda, \alpha, h_{WGS-84}) \Rightarrow P(\lambda', \alpha', h_{el})$$

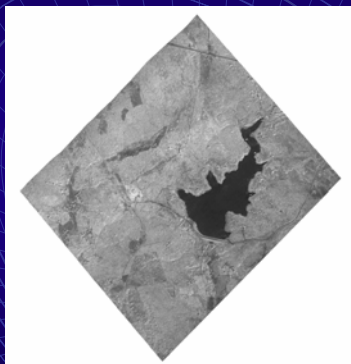
Transformação:  
(ortogonalização)

$$P(\lambda', \alpha', h_{el}) \Rightarrow P(\lambda', \alpha', h_{map})$$

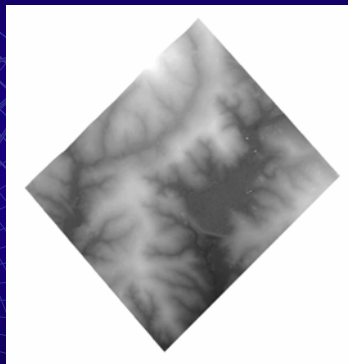


## Interferometria de imagens SAR

### • Geocodificação InSAR: Exemplo de orto-imagem e MET



Orto-imagem



Modelo de Elevação de Terreno



## Interferometria de imagens SAR

- Cartografia InSAR: Exemplo de uma Carta-imagem SAR



## Interferometria de imagens SAR

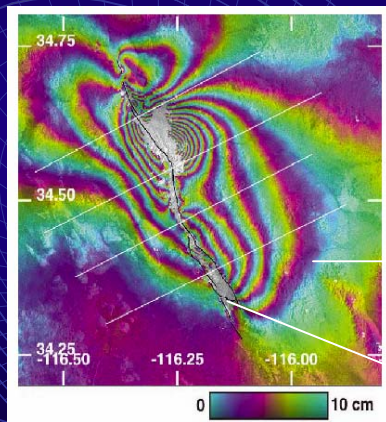
### 4 - Interferometria Diferencial

- Devido ao baixo comprimento de onda utilizado por satélites que operam na banda C (~ 5 cm ), é possível detectar pequenos movimentos da crosta terrestre, provocados por terremoto, através da diferença de fase interferométrica
- **Técnicas:**
  - a) Através da diferença de interferogramas adquiridos antes e após algum evento sísmico. A diferença de fase residual é devido as pequenas variações na topografia, ocasionadas pelo movimento da crosta terrestre.
  - b) Através do Modelo de Elevação conhecido e de um interferograma adquirido após um evento sísmico. Simula-se um interferograma através do Modelo de Elevação, e calcula a diferença entre os interferogramas.
  - c) Através do Modelo de Elevação conhecido e de um interferograma construído com imagens adquiridas antes e após algum evento sísmico, gera-se um interferograma através do Modelo de Elevação conhecido, retira-se do interferograma SAR a componente de fase relacionada a topografia do terreno e obtém-se a diferença de fase residual, devido as variações na topografia.



## Interferometria de imagens SAR

- Exemplo utilizando imagens do satélite ERS 2 (California- 1999)



### Exemplo da técnica c)

Intervalo entre as aquisições = 35 dias

Baseline = 25 m

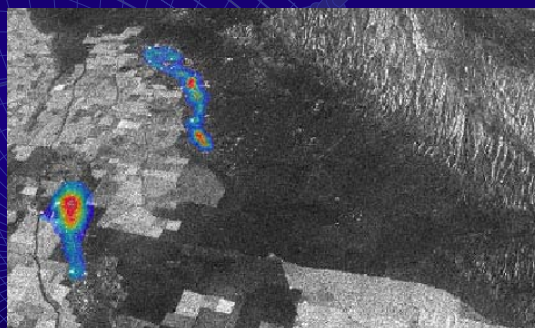
Fase módulo  $2\pi$  (um ciclo de cor) representando a medida do movimento da crosta terrestre

Região de baixa coerência devido ao terremoto



## Interferometria de imagens SAR

### Interferometria Diferencial: Exemplo



Exemplo de subsidência





## Interferometria de imagens SAR

### 5- Interferometria SAR Polarimétrica

- Historicamente Polarimetria e Interferometria SAR tem sido tratadas como tópicos separados.
- O mecanismo de “scatterer”, devido a forma, orientação, propriedades dos materiais e volume, é influenciado pela polarização das ondas eletromagnéticas.
- A polarização influencia na localização do “scatterer”, interferindo com isto na fase interferométrica do sinal.
- O tratamento conjunto de ambos os tópicos permite uma investigação tridimensional do “volume scattering”.



## Interferometria de imagens SAR

### B) Exemplos de aplicações

#### 1 - Projeto São Francisco

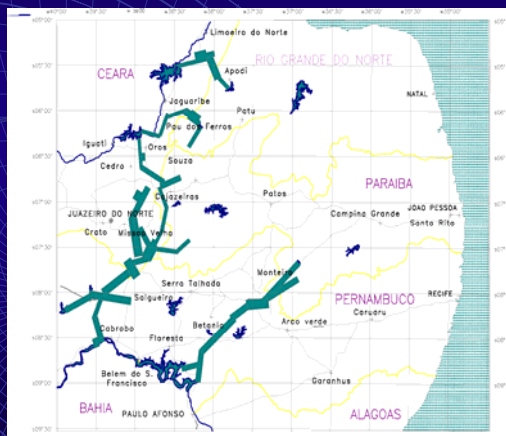
Objetivo: Geração de cartas topográficas nas escalas de 1:5000 e 1:25000, com o objetivo de servir de apoio na definição dos traçados dos canais, para o projeto de Transposição de águas do Rio São Francisco.

A escolha da técnica de interferometria SAR para fazer o mapeamento, deveu-se principalmente a rapidez na aquisição dos dados, tempo de processamento e custo.



## Interferometria de imagens SAR

- Área de abrangência do projeto



## Interferometria de imagens SAR

- Sistema InSAR aerotransportado (uma passagem)



Sistema AeS-1 (Aerosensing)

### - Dados da missão

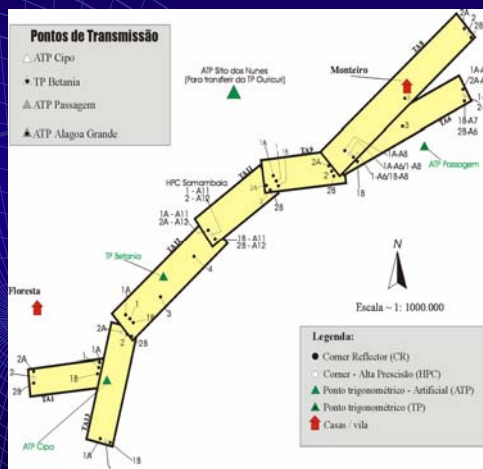
Frequência de operação: 9,35-9,75 GHz (Banda X)  
Largura de faixa imageada: 2 Km  
Resolução espacial das imagens: 0,5 x 0,5 m  
Resolução radiométrica: 1,8 dB  
Precisão altimétrica: ~0,5 m  
Número de "looks" das imagens: 4  
Altitude de voo: 4.200 m

Volume de dados brutos gerados: 2.400 Gbytes  
Número de fitas DLT (digital linear tape): 110  
Tempo de mapeamento de 10.000 Km<sup>2</sup> = 14 dias



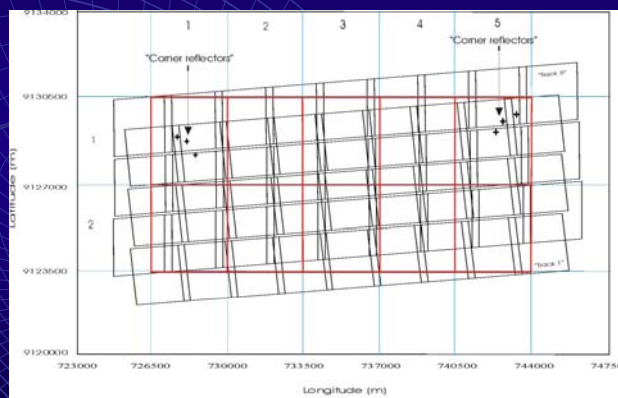
## Interferometria de imagens SAR

- Exemplo: Pontos de transmissão DGPS e de "corner reflectors"



## Interferometria de imagens SAR

- Exemplo de mapeamento sistemático: linhas de voo



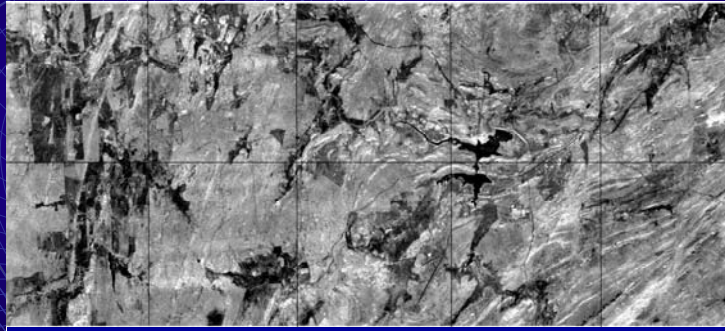
Linhas de voo e definição das cartas (em vermelho)





## Interferometria de imagens SAR

- Exemplo de mapeamento sistemático: orto-imagens

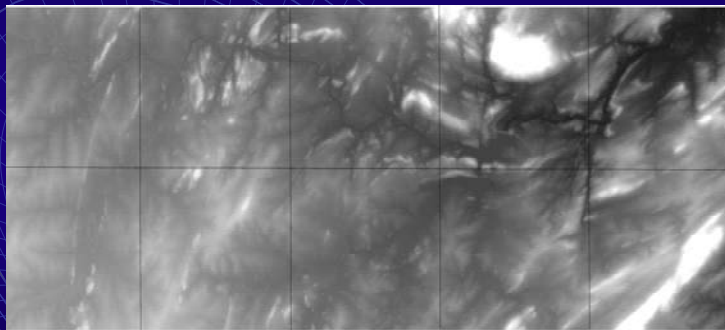


Mosaico de orto-imagens



## Interferometria de imagens SAR

- Exemplo de mapeamento sistemático: Modelos de Elevação



Mosaico de Modelos de elevação





## Interferometria de imagens SAR

### 2 - Experimento Banda P (Flona)

#### - Motivação:

- Analisar os dados Interferométricos e Polarimétricos de baixa frequência (350 – 450 MHz) e de alta frequência (9 GHz) combinados, em áreas de Floresta Tropical, visando aplicações em Cartografia, em Inventário Florestal, na estimativa de Biomassa, etc...

#### - Características:

- A Banda P caracteriza-se pelo alto valor do comprimento de onda, da ordem de 73 cm, o que permite um alto grau de penetração do sinal na cobertura vegetal
- A Banda X devido ao baixo valor do comprimento de onda, da ordem de 3 cm, possui um grau de penetração do sinal muito baixo em áreas de cobertura vegetal
- A combinação destas duas frequências mostrou-se bastante útil, quando se combina os Modelos de Elevação X e P, em áreas de Floresta.



## Interferometria de imagens SAR

### Área do Experimento





## Interferometria de imagens SAR

### Dados da Missão

- Área imageada : ~1300 Km<sup>2</sup>
- Tempo de vôo da missão: 15 dias
- Frequências utilizadas: Banda P e Banda X
- ⊗ Polarização na Banda X, HH;
- ⊗ Polarizações na Banda P: HH, HV, VH, VV
- Volume de dados:
  - ⊗ 1 Terabyte
  - ⊗ 100 fitas DLT
- Mapeamento na escala 1:25.000
  - ⊗ Ortoimagens nas bandas X e P:  
resolução espacial: 2.5 x 2.5 metros
  - ⊗ Modelos de Elevação, bandas X e P:  
resolução espacial: 2.5 x 2.5 metros  
resolução altimétrica: 0.5 metro



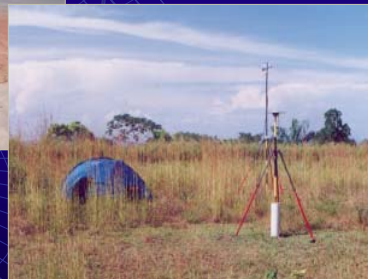
## Interferometria de imagens SAR

### Sinalização para o mapeamento



Sinalizador (refletor de canto)

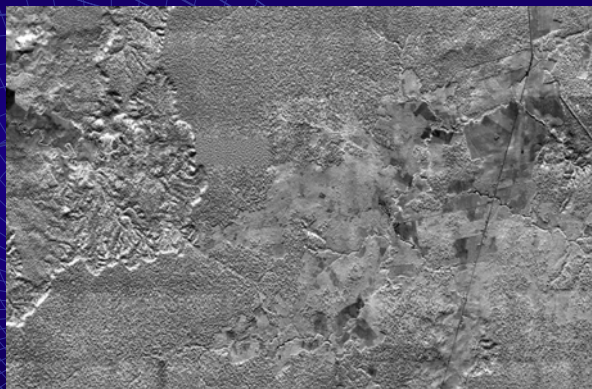
GPS Diferencial e link





## Interferometria de imagens SAR

Aplicação em Cartografia: Mosaico de imagens da banda X

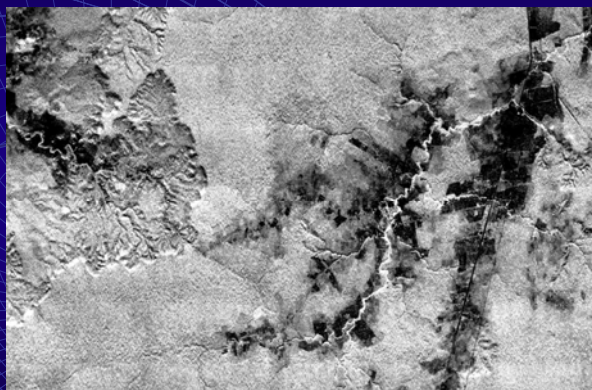


Mosaico de orto-imagens X : escala 1:25000



## Interferometria de imagens SAR

Aplicação em Cartografia: Mosaico de imagens da banda P

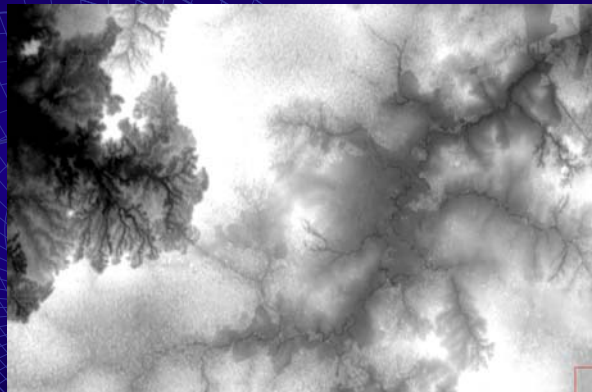


Mosaico de orto-imagens P : escala 1:25000



## Interferometria de imagens SAR

Aplicação em Cartografia: Mosaico de METs da banda X

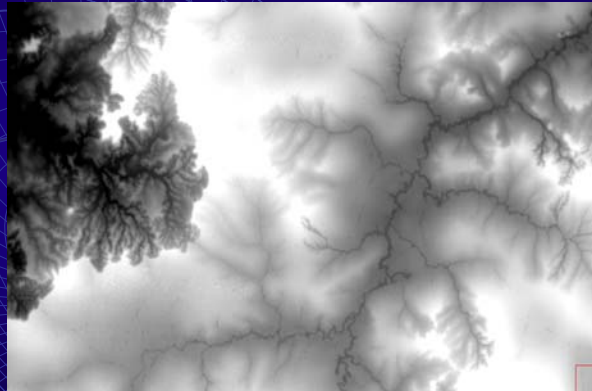


Mosaico de METs X : escala 1:25000



## Interferometria de imagens SAR

Aplicação em Cartografia: Mosaico de METs da banda P



Mosaico de METs P : escala 1:25000





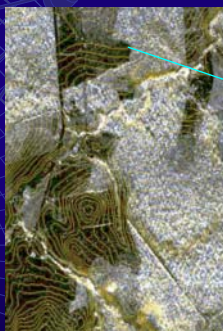
## Interferometria de imagens SAR

### Aplicação em Cartografia:

- Grande potencial em cartografia devido a não influência da cobertura vegetal, na medida de elevação do terreno.



Orto-imagem X com curvas de nível de 5m



Orto-imagem P com curvas de nível de 5m

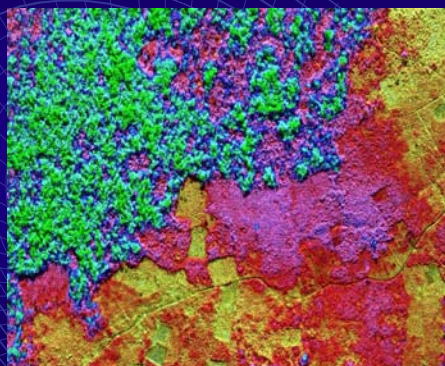
#### OBS:

As curvas de nível não são interrompidas nas bordas de floresta



## Interferometria de imagens SAR

- Aplicação em Floresta: Estimativa da cobertura vegetal



#### Representação IHS

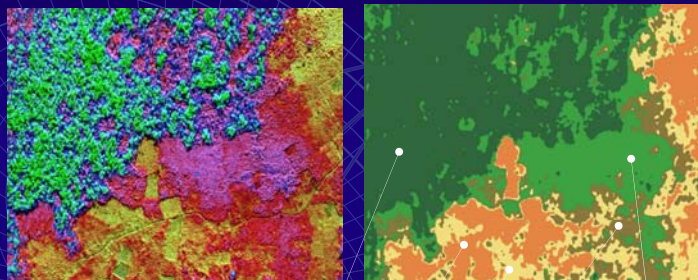
- Intensidade = Imagem da banda X
- Matiz = Diferença entre os Modelos de Elevação X e P
- Saturação = constante

Diferença entre os Modelos de Elevação X e P (em cores), composto com a imagem X



## Interferometria de imagens SAR

- Aplicação em Floresta: Classificação da cobertura vegetal



Diferença entre os Modelos de elevação e imagem X

Floresta Primária  
Agricultura

Past  
Pasto sujo

Floresta secundária

Classificação utilizando segmentação baseado no crescimento de regiões



## Interferometria de imagens SAR

### 3 - Missão SRTM (Shuttle Radar Topographic Mapping)

- Sistema Orbital e Interferometria de uma passagem

- **Objetivo:**

- Mapeamento global utilizando Interferometria SAR nas bandas X e C

- **Características dos Modelos de Elevação**

- Banda C: resolução espacial = 30 m  
resolução altimétrica = 15 m  
precisão horizontal absoluta = 20 m  
precisão vertical absoluta = 16 m

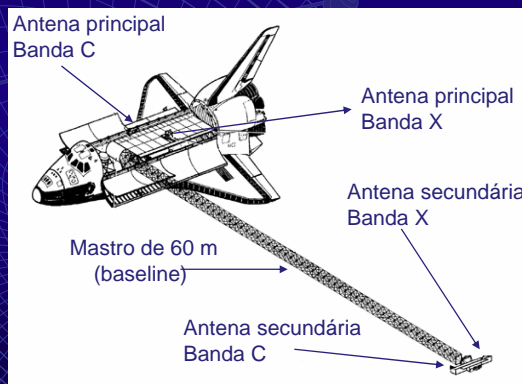
- Banda X: resolução espacial = 1 m  
resolução altimétrica = 1 m  
precisão horizontal absoluta = 20 m  
precisão vertical absoluta = 16 m





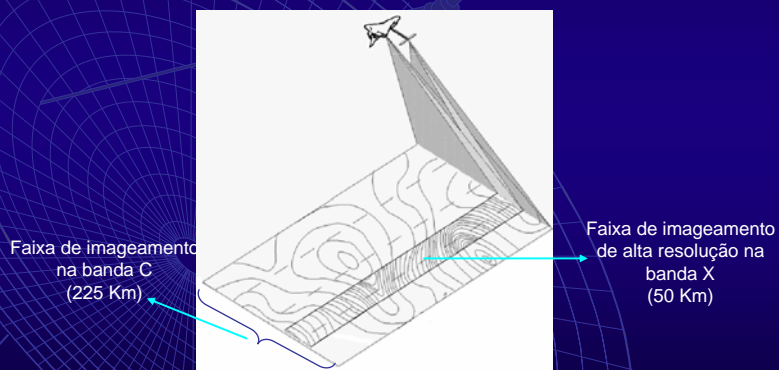
## Interferometria de imagens SAR

- Sistema Orbital
- Missão SRTM (Shuttle Radar Topographic Mapping)



## Interferometria de imagens SAR

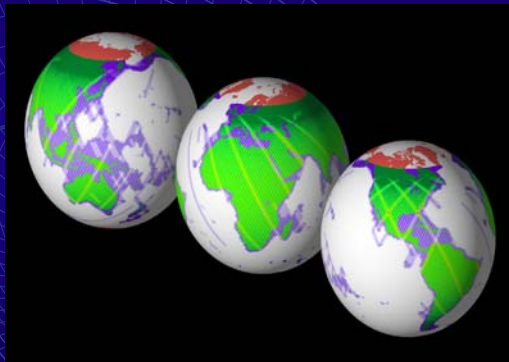
- Missão SRTM: Modos de operação





## Interferometria de imagens SAR

- Missão SRTM: Cobertura



Cobertura de  
-60 a 60 graus  
de latitude.

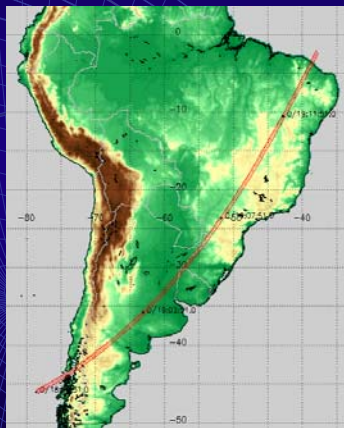
Aproximadamente  
de 80% da superfície  
da Terra, utilizando a  
a banda C

Distribuição dos produtos: United States Geological Survey's



## Interferometria de imagens SAR

- Missão SRTM: mapeamento sobre o Brasil







## Interferometria de imagens SAR

- Missão SRTM: Resultados ( Região de El Salvador )



Modelo de Elevação obtido através da banda C



## Interferometria de imagens SAR

- 4 – Missão Tandem (ERS1/2)

Interferometria de duas passagens orbital, utilizando os satélites ERS-1 e ERS-2, banda C, com um intervalo entre as aquisições de 1 dia.

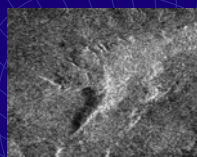


Imagem do ERS1

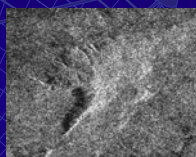
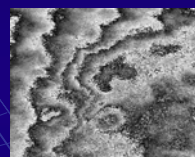
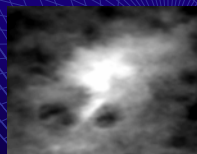


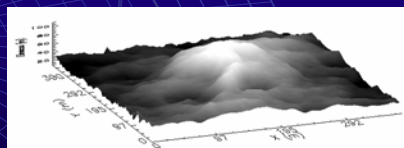
Imagem do ERS2



Interferograma



Modelo de elevação



representação 3D (área de Curaçá – Bahia)





## Interferometria de imagens SAR

- Missão Tandem (ERS1/2)

Segmentação da imagem de coerência na floresta de Tapajós



Imagem TM

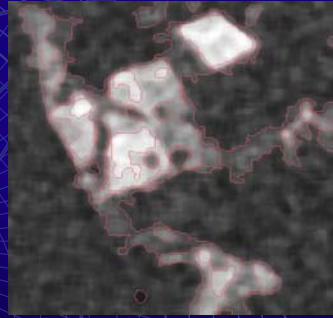


Imagem de coerência segmentada

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramowitz, M; Stegun, I. **Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables**. New York: Dover, 1965. 1046p.
- Alberga, V. Comparison of polarimetric methods in image classification and SAR interferometry applications. (Ph.D. thesis) - Tech. Univ. Chemnitz, 2004. 171p. Disponível em: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2004/0125> (acesso em Maio 2005).
- Ahern, F.J. **Basic concepts of imaging radar**: a intensive course. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, out. 1994 (Notas de curso).
- Amaral, S.; Shimabukuro, Y.E. Sensoriamento remoto por radar (SAR): pré-processamento de imagens RADARSAT ("Fine Mode") na região da Floresta Nacional de Tapajós. In: **Primeras Jornadas Latinoamericanas de Percepción Remota por Radar**: Técnicas de Procesamiento de Imágenes, Buenos Aires, dec. 1996. Paris, ESA, 1997, p. 37-42. (ESA SP 407).
- Ballester-Berman, J.D.; Lopez-Sanchez, J.M.; Fortuny-Guasch, J. Retrieval of biophysical parameters of agricultural crops using polarimetric SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 4, p. 683-694, April 2005.
- Barmetller, A.; Meier, E.; Nüesch, D. **SAR preprocessing: flight tracks reconstruction using GPS and INS**. University of Zurich: Remote Sensing Laboratory. 1998.
- Batlivala, P.P.; Ulaby, F.T. **Feasibility of monitoring soil moisture using active microwave remote sensing**. Lawrence, KS, University of Kansas Center for Research, 1977. (RSL Technical Report 264-12).
- Besag, J. On the statistical analysis of dirty pictures (with discussion). **Journal of the Royal Statistical Society B**, 48(3):259-302, 1986.
- Besag, J. Towards Bayesian image analysis. **Journal Applied on Statistic**, 16(3):395-407, 1989.
- Borgeaud, M.; Shin, R. T; Kong, J. A. Theoretical models for polarimetric radar clutter. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, v. 1, n. 1, p. 67-86, Jan. 1987.
- Brakke, T.W.; Kanemasu, E.T.; Steiner, J.L.; Ulaby, F.T.; Wilson, E. Microwave radar response to canopy moisture leaf-area index, and dry weight of wheat, corn, and sorghum. **Remote Sensing of Environment**, 11(3):207-220, July 1981.
- Brandfass M., Hofmann C., Mura J. C., Moreira, J. R., Papathanasiou, K. P., Estimation of Rain Forest Vegetation via Polarimetric Radar Interferometric Data, 8th. International Symposium on Remote Sensing, SPIE, Tolouse, September 2001.
- Brisco, B.; Brown, R.J.; Pultz, T.J. The effects of free canopy water on SAR crop separability. In: **Remote sensing: an economic tool for the nineties**. Canada, IEEE, 1989. v. 2, p. 424-429. IGARSS'89, Canadian Symposium on Remote Sensing, 12., Vancouver, July 10-14, 1989.
- Bush, T.F.; Ulaby, F.T. An evaluation of radar as a crop classifier. **Remote Sensing of Environment**, 7(1):15-36, 1978.

- Cameron, W. L.; Leung, L. K. Feature motivated polarization scattering matrix decomposition. In: International Radar Conference. Arlington, May 7-10, 1990. **Proceedings**. New York: IEEE. p. 549-557.
- Candeias, A. L. B.; Mura, J. C.; Dutra, L. V.; Moreira J. R. Interferogram phase noise reduction using morphological and modified median filters. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Florence, 1995. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v.1, p. 166-168.
- Chen, Y.; Dougherty, E.R. Gray-scale morphological granulometric texture classification. **Optical Engineering**, 33(8):2713-2722, 1994.
- Chen, C. T.; Chen, K. S.; Lee, J. S. The use of fully polarimetric information for the fuzzy neural classification of SAR images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 9, p. 2089-2100, Sept. 2003.
- Chen, C. T.; Chen, K. S.; Lee, J. S. Using complete polarimetric information in Fuzzy neural classification of SAR image based on complex Gaussian distribution. In: 21<sup>st</sup> Asian Conference on Remote Sensing. Taipei, Dec. 4-8, 2000. **Proceedings**. Disponível em: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts9/imgp0005.shtml> (acesso em Maio de 2005).
- Cloude, S. R. **Uniqueness of Target Decomposition Theorem in Radar Polarimetry**. In: W. M. Boerner et al. (eds.) Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p. 267-298, 1992.
- Cloude, S.R.; Pottier, E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 2, p. 498-518, March 1996.
- Cloude, S. R.; Pottier, E. An entropy based classification scheme for land application of polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 1, p. 68-78, Jan. 1997.
- Cloude, S.R.; Papathanassiou, K.P. Polarimetric SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 1551-1565, Sept. 1998.
- Cloude, S.R.; Papathanassiou, K.P.; Reigber, A.; Boerner, W.M. Multi-frequency polarimetric SAR interferometry for vegetation structure extraction. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Hawaii, July 24-28, 2000. **Proceedings**. New York: IEEE. v. 1, p. 129-131.
- Cloude S.R , Woodhouse I.H., Papathanassiou K.P., Zimmermann R. Polarimetric interferometry in forestry applications: a review. 2003. Disponível em: <http://hawk.iszf.irk.ru/URSI2002/GAabstracts/papers/p0589.pdf> (acesso em Maio de 2005).
- Colin, E.; Titin-Schnaider, C.; Tabbara, W., Investigation on different interferometric coherence optimization methods, In: PolInSAR 2003. Frascati, Jan. 14-16, 2003a. **Proceedings**.
- Colin, E.; Titin-Schnaider, C.; Tabbara, W. A new parameter for IFPOL coherence optimization methods. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, July 21-25, 2003a. **Proceedings**. New York: IEEE. v. 6, p. 3979-3981.



- Cook, R.; McConnell, I.; Oliver, C.J. MUM (Merge Using Moments) segmentation for SAR images. In: **Proceedings of SPIE**, 2316, 92-103, 1994.
- Correia, A.H. **Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR polarimétricas**. São José dos Campos. 275p. (INPE-7178-TDI/679). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1998.
- Dallemand, J.F.; Lichtenegger, J.; Raney, R.K.; Schumann, R. **Radar imagery: theory and interpretation: lecture notes**. Rome, FAO/ESA, 1993. (RSC Series 67).
- Davidson, G. W.; Bamler, R. Robust 2-D phase unwrapping based on multiresolution. In: International Society for Optical Engineering. **Microwave Sensing and Synthetic Aperture Radar**. Bellingham. Wash.:SPIE, 1996. p. 226-237. (SPIE Proceeding, v. 2958).
- Di Cenzo, A. **Synthetic aperture radar and digital processing: an introduction**. Pasadena, CA, JPL, Feb. 1981 (JPL Publication).
- Du, L. J.; Lee, J. S. Polarimetric SAR image classification based on target decomposition theorem and complex Wishart distribution. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Lincoln, May 27–31, 1996. **Proceeding**. New York: IEEE. v.1, p.439–441.
- Dutra, L.V.; Frery, A.C.; Krug, T.; Mascarenhas, N.D.A.; Sant'Anna, S.J.S.; Yanasse, C.C.F. **Alguns aspectos de modelagem estatística de dados de sensoriamento remoto**. Curitiba, INPE/SBC, maio 1993. Notas de curso do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7. 25p.
- Elachi, C. **Spaceborne radar remote sensing: application and techniques**. IEEE Press, 1988.
- Evans, D.L.; Farr, T.G.; Ford, J.P.; Thompson, T.W.; Werner, C.L. Multipolarization radar images for geologic mapping and vegetation discrimination. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-24(2):246-256, Mar. 1986.
- Fernandes, D.; Waller, G.; Moreira, J. R. Registration of SAR images using the chirp scaling algorithm. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Singapore, Aug. 4-8, 1997 1997. **Proceeding**. New York: IEEE. v. 1, p. 799-801.
- Fernandes, D. **Formação de imagens de radar de abertura sintética e modelos da relação “speckle”-textura**. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1993.
- Fischer, J.A.; Mussakowski, R.S. Preliminary evaluation of multi-date SAR data for identification of agricultural crops in Southern Ontario. In: **Remote sensing: an economic tool for the nineties**. Canada, IEEE, 1989. v. 2, p. 430-433. IGARSS'89; Canadian Symposium on Remote Sensing, 12., Vancouver, July 10-14, 1989.
- Ferro-Famil, L.; Pottier, E.; Lee, J. S. Unsupervised classification and analysis of natural scenes from polarimetric interferometric SAR data. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sidney, July 9-13, 2001a. **Proceeding**. New York: IEEE. v. 6, p. 2715-2717.
- Ferro-Famil, L.; Pottier, E.; Lee, J. S. Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 11, p. 2332–2342, Nov. 2001b.

- Fornaro, G.; Franceschetti, G.; Lanari, R. Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 3, p. 720-727, May 1996.
- Fornaro, G.; Franceschetti, G.; Marzouk, E.S. A new approach for image registration in interferometric processing. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Pasadena, 1994. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. p. 1983-1985.
- Freeman, A.; Durden, S.L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, p. 963-973, May 1998.
- Frei, Urs; Graf K. C.; Meier E. Cartographic Reference System. In: **SAR geocoding: data and systems**. Kalsruhe: Wichmann Verlag, 1993, cap. 10, p. 213-234.
- Freitas, C.C., Correia, A.H.; Frery, A.C.; Sant'Anna, S.J.S. A system for multilook polarimetric SAR image statistical classification. In: **Second Latino-American Seminar on Radar Remote Sensing: Image Processing Techniques**, Santos, sep. 1998. Noordwijk, ESA, 1998, p. 141-148. (ESA SP 434).
- Freitas, C. C.; Frery, A. C.; Correia, A.H. [The Polarimetric G Distribution for SAR Data Analysis](#). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 35(3), 1997.
- Frery, A.C. **Algumas ferramentas estatísticas na síntese, processamento e análise de imagens de radar de abertura sintética**. Tese de Doutorado em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993. (INPE-5548-TDI/534).
- Frery, A.C.; Müller, H.J.; Yanasse, C.C.F.; Sant'Anna, S.J.S. A model for extremely heterogeneous clutter. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 35(3):648-659, 1997a.
- Frery, A.C.; Yanasse, C.C.F.; Sant'Anna, S.J.S. Statistical characterization of SAR data: the multiplicative model and extensions. In: Simposio Latinoamericano de Percepción Remota (SELPER), 7, México, nov. 1995. **Latinoamérica evaluada desde el espacio**. México, s.e., 1995a, p. 502-515.
- Frery, A.C.; Yanasse, C.C.F.; Sant'Anna, S.J.S. Alternative distributions for the multiplicative model in SAR images. In: 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Italy, Jul. 10-14 1995b. **Quantitative remote sensing for science and applications**. Florence, Italy, IEEE, v. 1, p. 169-171.
- Frery, A.C.; Yanasse, C.C.F., Sant'Anna, S.J.S. El modelo multiplicativo para el análisis de imágenes SAR. In: **Primeras Jornadas Latinoamericanas de Percepción Remota por Radar: Técnicas de Procesamiento de Imágenes**, Buenos Aires, dec. 1996. Paris, ESA, 1997b, p. 63-70. (ESA SP 407).
- Frery, A.C.; Yanasse, C.C.F.; Vieira, P.R.; Sant'Anna, S.J.S.; Rennó, C.D. A user-friendly system for synthetic aperture radar image classification based on grayscale distributional properties and context. In: **Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens**, 10., 1997. Los Alamitos, CA, USA, IEEE Computer Society, p. 211-218, 1997c.

- Gens, R. **Quality assessment of SAR interferometric data.** (PhD Thesis) – International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 1998. 141p.
- Geman, D; Geman, S. Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images. **IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence**, PAMI-6(6):721–741, 1984.
- Ghiglia, D. C.; Prit M. **Two-dimensional Phase Unwrapping - Theory, Algorithms and Software**, John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- Ghiglia, D. C.; Romero, L. A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. **Journal Optics Society of American** , v. 11, n. 1, p. 107-117, Jan. 1994.
- Goblirsch, W.; Pasquali, P. Algorithms for calculation of digital surface models from the unwrapped interferometric phase. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Lincoln, 1996. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 1, p. 656-658.
- Goldstein, R. M.; Zebker, H.; Werner, C. L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. **Radio Science**, v. 23, n. 4, p. 713-720, Aug. 1988.
- Gradshteyn, I.S.; Ryzhik, I.M. **Table of integrals, series, and products**. New York Academic Press, 1980. 1160 p.
- Graham, L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. **Proceeding of the IEEE**, v. 62, n. 6, p. 763-768, June 1974.
- Hagberg, J. O.; Ulander, L. M. H. On the optimization of interferometric SAR for topographic mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 1, p. 303-306, Jan. 1993.
- Hajnsek, I.; Cloude, S.R. Pol-InSAR for agricultural vegetation parameter estimation. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Alaska, Sept. 20-24, 2004. **Proceedings**. New York: IEEE. v. 2, p. 1224-1227.
- Haralick, R.M.; Shanmugan, K.; Dinstein, I. Texture features for image classification. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, SMC-3(6):610-621, Nov. 1973.
- Haralick, R.M.; Shapiro, L.G. **Computer and robot vision**. New York, Addison-Wesley, 1992. 672p.
- Hellmann, M. P. SAR Polarimetry Tutorial. <http://www.epsilon.nought.de/>. Acessado em 1/12/2006
- Hellwich, O. Basic principles and current issues of SAR interferometry. 1999. disponível em: <http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/1999/isprs-workshop/cd/pdf-papers/hellwich.pdf>
- Henderson, F. M.; Lewis, A. **J.Principles & Applications of Imagins Radar**. Manual of Remote Sensing. Third Edition. Vol. 2, John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- Kellndorfer, J.; et al. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, n. 3, p. 339-358, Nov. 2004.

- Jain, A.K. **Fundamentals of digital image processing**. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall International Editions, 1989. 569p.
- Jakeman, E.; Pusey, P.N. The statistics of light scattered by a random phase screen. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, 6(L):89-92, 1973.
- Jakeman, E.; Pusey, P.N. A model for non-Rayleigh sea echo. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, AP-24(6):806-814, 1976.
- Jao, J.K. Amplitude distribution of composite terrain radar clutter and the K distribution. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, AP-32:1049-1061, 1984.
- Just, D.; Bamler, R. Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar. **Applied Optics**. v. 33, n. 20, p. 4361-4368, July 1994.
- Kimura, H.; Mizuno, T.; Papathanassiou, K. P.; Hajnsek, I. Improvement of polarimetric SAR calibration based on the Quegan Algorithm. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Alaska, Sept. 20-24, 2004. **Proceedings**. New York: IEEE. v. 1, p. 184-187.
- Kingsley, S.; Quegan, S. **Understanding radar systems**. McGraw Hill, 1992.
- Kostinski, A.B.; Boerner, W. M. On the Foundations of Radar Polarimetry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n 12, p. 1395-1404, Dec. 1986.
- Krogager, E.; Czyż, Z. H Properties of the sphere, diplane, helix decomposition", Proc. 3rd International Workshop on Radar Polarimetry. In: JIPR'95. Nantes, March 21-23, 1995. **Proceeding**. p. 106-114.
- Lee, J.S.; Du, L.; Schuler, D.L.; Grunes, M.R. Statistical analysis and segmentation of multi-look SAR imagery using partial polarimetric data. In: IGARSS'95 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Firenze, July 10-14, 1995. **Quantitative Remote Sensing for Science and Applications**. Piscataway: IEEE, 1995. v.3, p.1422-1424.
- Lee, J.S.; Grunes, M.R. Classification of multi-look polarimetric SAR imagery based on complex Wishart distribution. **International Journal of Remote Sensing**, 15(11):2299-2311, Sept, 1994.
- Lee, J. S.; Grunes, M. R. Feature classification using multi-look polarimetric SAR imagery. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Houston, May 26-29, 1992. **Proceeding**. New York: IEEE. v.1, p.77-79.
- Lee, J. S.; Grunes, M.R.; Ainsworth, T.L.; Li-Jen Du; Schuler, D.L.; Cloude, S.R. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p. 2249-2258, Sept. 1999.
- Lee, J. S; Grunes, M.R.; Pottier, E.; Ferro-Famil, L. Unsupervised terrain classification preserving polarimetric scattering characteristics. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 4, p. 722-731, April 2004.
- Lee, J.S.; Hoppel, K.W.; Mango, S.A.; Miller, A.R. Intensity and phase statistics of multi-look polarimetric and interferometric SAR imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 32(5):1017-1028, Sept, 1994a.



- Lee, J.S.; Miller, A.R.; Hoppel, K.W. Statistics of phase difference and product magnitude of multi-look processed Gaussian signals. **Waves in Random Media**, 4:307-319, 1994b.
- Lee, J. S.; Papathanassiou, K. P.; Ainsworth, T. L.; Grunes, M. R.; Reigber, A. A new technique for noise filtering on SAR interferogram phase images. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Singapore, 1997. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 4, p. 1716-1718.
- Lee, J.S.; Schuler, D.L.; Lang, R.H.; Ranson, K.J. K-distribution for multi-look processed polarimetric SAR imagery. In: IGARSS'94 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, Aug. 8-12, 1994. **Surface and Atmospheric Remote Sensing: technologies, data analysis and interpretation**. Piscataway: IEEE, 1994c. v.4, p.2179-2181.
- Le Toan, T.; Lopes, A.; Huet, M. On the relationships between radar backscattering coefficient and vegetation canopy characteristics. In: Remote sensing: from research towards operational use. Noordwijk, ESA/ESTEC, 1984. v. 1, p. 155-160. (ESA SP-215). **Proceedings of IGARSS'84**, Strasbourg, Aug. 27-30, 1984.
- Li, K. L.; Goldstein, M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 28, n. 1, p. 88-97, Jan. 1990.
- Lin, Q.; Vesecky, J. F.; Zebker, H. A. Registration of interferometric SAR images. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Helsinki, 1991. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. p. 2173-2176.
- Li, X.; Guo, H; Li, Z.; Wang, L. Inversion of vegetation height using SIR-C dual frequency polarimetric SAR interferometry data. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Alaska, Sept. 20-24, 2004. **Proceedings**. New York: IEEE. v. 5, p. 3132-3135.
- Lombardo, P.; Sciotti, M.; Pellizzeri, T.M.; Meloni, M. Optimum model-based segmentation techniques for multifrequency polarimetric SAR images of urban areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 9, p. 1959-1975, Sept. 2003.
- Lopes, A.; Laur, H.; Nezry, E. Statistical distribution and texture in multilook and complex SAR images. In: IGARSS'90 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Washington DC, 1990. Remote Sensing Sciences for the Nineties. New York: IEEE, 1990. v.3, p.2427-2430.
- Lopez-Martinez, C.; Pottier, E. Statistical assessment of eigenvector-based target decomposition theorems in radar polarimetry. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Alaska, Sept. 20-24, 2004. **Proceedings**. New York: IEEE. v. 1, p. 192-195.
- Madsen S.N., Zebker H.A **Imaging Radar Interferometry , Manual of Remote Sensing**, third edition, v2, principles & Applications of Imaging Radar, v2, 1998, p. 359-380.
- Marceau, D.; Howarth, P.J.; Dubois, J.M. Automated texture extraction from high spatial resolution satellite imagery for land-cover classification: concepts and application. In: IGARSS'89 - Canadian Symposium on Remote Sensing, 12., Vancouver, July 10-14, 1989. **Proceedings**, IEEE, 1989. v. 5, p. 2765-2768.

- Mascarenhas, N.D.A.; Velasco, F.R.D. **Processamento digital de imagens**. São Paulo, IME, 1989, Quarta Escola de Computação. 2<sup>a</sup> ed. 373p.
- Meier, E.; Frei, U.; Nüesch, D. Precise Terrain Correct Geocoded Images. In: **SAR geocoding: data and systems**. Karlsruhe: Wichmann Verlag, 1993, cap. 7, p. 173-186.
- Mura, J.C. Algoritmos e metodologia de processamento para síntese de imagens de radar de abertura sintética (SAR). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6, Manaus, 24–29 jun. 1990. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1990, v.1, p. 188-196.
- Mura, J.C. Um sistema de processamento de imagens de radar de abertura sintética (SAR) aerotransportado. In: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 4, São Paulo, 14–17 jul. 1991. **Anais**. p. 95-98.
- Mura, J. C. Performance and interferometric capabilities of the INPE/DLR SAR processor. In: 8<sup>o</sup> Radarsymposium. Neubiberg: Verlag TÜV Rheinland, Sept. 1993, p. 166-171.
- Mura, J. C.; Candeias, A. L. B.; Dutra, L. V.; Moreira J. R. Evaluation of the phase noise reduction filters in SAR interferometry. In: First Latino-American Seminar on Radar Remote Sensing - Image Processing Techniques, Buenos Aires, Fev. 1997. Noordwijk: **ESA**. SP-407, p. 43-46
- Mura, J.C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR**. São José dos Campos. 160 p. (INPE-8209-TDI/764). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.
- Mura, J.C.; Bins, L.S.; Gama F.F.; Freitas, C.C.; Santos, J.R.; Dutra, L.V. Identification of the Tropical Forest in Brazilian Amazon based on the DEM difference from P e X bands interferometric data. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sidney, July 9-13, 2001. **Proceeding**. New York: IEEE. v. 2, p. 789-791.
- Mura, J. C. Otimização da coerência de imagens SAR interferométricas e polarimétricas na banda P em áreas de floresta. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. Goiânia, 16-21 Abril, 2005. **Anais**. São José dos Campos, INPE. CD-ROM. Sessão Técnica de Radar.
- NASA/JPL, ed. **Shuttle imaging radar-C science plan**. Pasadena, CA, 1986. (JPL Publication 86-29).
- Nico, G.; Leva, D.; Fortuny-Guasch, J.; Antonello, G.; Tarchi, D. Generation of digital terrain models with a ground-based SAR system. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 1, p. 45-49, Jan. 2005.
- Oliver, C.; Quegan, S. **Understanding synthetic aperture radar images**. Norwood, MA, Artech House, 1998. 479p.
- Papathanassiou, K. P. **Polarimetric SAR Interferometry**. (PhD thesis) - Technical University of Graz, 1999. 149p
- Papathanassiou, K., P., Cloude, S. R., Phase decomposition in Polarimetric SAR Interferometry. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Saetle, 1998. **IEEE**.

- Paris, J.F. Radar backscattering properties of corn and soybeans at frequencies of 1.6, 4.75, and 13.3 GHz. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-21(3):392-400, July 1983.
- Pasquali, P.; Holecz, F. InSAR phase calibration [online], Ticino, Switzerland: SARMAP S.A., <<http://www.sarmap.ch>>, Jan. 1998.
- Pellizzeri, T. M. Classification of polarimetric SAR images of suburban areas using joint annealed segmentation and "H/A/alpha" polarimetric decomposition. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 58, n. 1-2, p. 55-70, June 2003 .
- Pellizzeri, T.M.; Lombardo, P.L.; Ferriero, P. Polarimetric SAR image processing: Wishart vs. "H/A/alpha" segmentation and classification schemes. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, July 21-25, 2003. **Proceedings**. New York: IEEE. v. 6, p. 3976–3978.
- Polarimetric Decompositions. [http://www.earth.esa.int/polsarpro/Manuals/4\\_Polarimetric\\_Decompositions.pdf](http://www.earth.esa.int/polsarpro/Manuals/4_Polarimetric_Decompositions.pdf). Acessado em 1/12/2006.
- Pottier, E. Unsupervised classification scheme and topography derivation of PolSAR data based on the H/A/ $\alpha$  polarimetric decomposition theorem. In: 4th International Workshop on Radar Polarimetry. Nantes, July 13-17, 1998. **Proceedings**. p. 535-548.
- Pritt, M. D. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 3, p. 728-738, May 1996.
- Pritt, M. D.; Shipman, J. S. Least-Squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 2, p. 706-708, May 1994.
- Qong, M. Coherence optimization using the polarization state conformation in PolInSAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters**. em publicação, 2005.
- Quarzeddine, M. S. **Generation of digital terrain models using polarimetric SAR interferometry**. (Msc Degree) – International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 2002. 64p.
- Quegan, S. A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data – theory and observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 1, p. 89-99, Jan. 1994.
- Reigber, A.; Moreira, J. R. Phase unwrapping by fusion of local and global methods. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Singapore, 1997. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 2, p. 869-871.
- Rennó, C.D. **Avaliação de medidas texturais na discriminação de classes de uso utilizando imagens SIR-C/X-SAR do Perímetro Irrigado de Bebedouro, Petrolina, PE**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.
- Richards, J.A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. Berlin, Springer-Verlag, 1993. 2<sup>a</sup> ed. 340p.

- Rosenqvist, Å. Evaluation of JERS-1, ERS-1 and Almaz SAR backscatter for rubber and oil palm stands in West Malaysia. **International Journal of Remote Sensing**, *17*(16):3219-3231, 1996.
- Ruck, G. T.; Barrick, D. E.; Stuart, W. D.; Krichbaum, C. K. **Radar Cross Section Handbook**. New York: Plenum, 1970. 593p. v 1.
- Sant'Anna, S.J.S. **Avaliação de filtros redutores de speckle em imagens de radar de abertura sintética**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995. (INPE-6125-TDI/586).
- Sant'Anna, S.J.S.; Dutra, L.V. SAR texture discrimination using AR-2D models for Amazonian land use classification. In: Simposio de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota (SELPER), 7, México, nov. 1995. **Latinoamérica evaluada desde el espacio**. México, s.e., 1995, p. 516-523.
- Sant'Anna, S.J.S.; Freitas, C.C.; Rennó, C.D. The use of textural features on the polarimetric SAR image classification. In: **Segunda Jornada Latinoamericana de Sensoriamento Remoto por Radar: Técnicas de Processamento de Imagens**, Santos, set. 1998. Paris, ESA, 1998, p. 99-106. (ESA SP 434)
- Sant'Anna, S.J.S.; Yanasse, C.C.F.; Frery, A.C. Estudo comparativo de alguns classificadores utilizando-se imagens RADARSAT da região de Tapajós. In: **Primeras Jornadas Latinoamericanas de Percepción Remota por Radar: Técnicas de Procesamiento de Imágenes**, Buenos Aires, dez. 1996. Paris, ESA, 1997, p. 187-194. (ESA SP 407)
- Sant'Anna, S.J.S.; Yanasse, C.C.F.; Hernandez Filho, P.; Kuplich, T.M.; Dutra, L.V.; Frery, A.C.; Santos, P.P. Secondary forest age mapping in Amazônia using multi-temporal Landsat/TM imagery. In: IGARSS, Italy, July 10-14 1995, **Quantitative remote sensing for science and applications**. v.1, pages 323-325, Florence, Italy. IEEE
- Sato, K.; Yamada, H.; Yamaguchi, Y.; Polarimetric characteristics of forest at coherent decomposition in polarimetric SAR interferometry. **IEICE Transactions on Electronics**, v. E85-C, n. 12, Dec. 2001.
- Sarabandi, K. Derivations of phase statistics from the Mueller matrix. **Radio Science**, *27*(5):553-560, 1992.
- Seymour, M. S.; Cumming, I. G. Maximum likelihood estimation for SAR interferometry. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Pasadena, 1994. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. p. 2282-2284.
- Small, D.; Pasquali, P.; Fuglistaler, S. A Comparison of phase to height conversion method for SAR interferometry. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Lincoln, 1996. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 1, p. 342-344.
- Soares, J.V.; Rennó, C.D.; Formaggio, A.R.; Yanasse, C.C.F.; Frery, A.C. Evaluation of texture features for crops discrimination using SAR. **Remote Sensing of Environment**, *59*(2): 234-247, 1997.



- Soares, S.M. **Classificação textural de imagens de radar por modelagem estatística autorregressiva**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.
- Srivastava, M.S. On the complex Wishart distribution. **Annals of Mathematical Statistics**, 36(1):313–315, 1963.
- Stilla, U.; Soergel, U.; Thoennessen, U. Potencial and limits of InSAR data for building reconstruction in built-up areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 58, n. 1-2, p.113-123, June 2003.
- Takeuchi, S.; Oguro, Y. A comparative study of coherence patterns in C-band and L-band interferometric SAR from tropical rain forest areas. **Advances in Space Research**, v. 32, n. 11, p. 2305-2310, 2003.
- Trevett, J.W. **Imaging radar for resources surveys**. New York, NY, Chapman and Hall, 1986. 313 p.
- Tur, M.; Chin, K.C.; Goodman, J.W. When is speckle noise multiplicative? **Applied Optics**, v.21, p.1157–1159, 1982.
- Ulaby, F.T. Radar signature of terrain: useful monitors of renewable resources. **Proceedings of IEEE**, 70(12):1410-1428, Dec.1982.
- Ulaby, F.T.; Allen, C.T.; Eger, G.; Kanemasu, E. Relating the microwave *backscattering* coefficient to leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, 14(1-3):113-133, Jan. 1984.
- Ulaby, F.T.; Batlivala, P.P.; Dobson, M.C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture, part I: bare soil. **IEEE Transactions Geoscience and Electronics**, GE-16(4):286-295, Oct. 1978.
- Ulaby, F.T.; Bradley, G.A.; Dobson, M.C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture, part II: vegetation-covered soil. **IEEE Transactions Geoscience and Electronics**, GE-17(2):33-40, Apr. 1979.
- Ulaby, F.T.; Dobson, M.C. **Handbook of radar scattering statistics for terrain**. Norwood, MA, Artech House, 1989. 357p.
- Ulaby, F.T.; Elachi, C. **Radar polarimetry for geoscience applications**. Norwood: Artech House, 1990. 364p.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing - radar remote sensing and surface scattering and emission theory**. v.2. Reading, Addison-Wesley, 1982.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive: radar remote sensing and surface scattering and emission theory**. 2<sup>a</sup>.ed. v.2. Norwood, MA, Artech House, 1986a.
- 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.
- Unser, M. Sum and difference histograms for texture classification. **IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence**, PAMI-8(1):118-125. Jan. 1986.

- Van Zyl, J. J. Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 3, p. 337–348, May 1990.
- Van Zyl, J.J.; Kim, Y. The use of polarimetric and interferometric SAR data in floodplain mapping. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, July 21-25, 2003. **Proceedings**. New York: IEEE. v. 1, p. 443-445.
- Van Zyl, J. J.; Zebker, H. A.; Elachi, C. Imaging radar polarimetric signatures: theory and observation. **Radio Science**, v.22, n.4, p.529–543, July-Aug.1987.
- Vieira, P.R. **Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR**. São José dos Campos. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996. (INPE-6124-TDI/585).
- Vieira, P.R.; Yanasse, C.C.F.; Frery, A.C.; Sant'Anna, S.J.S. Um sistema de análise e classificação estatísticas para imagens SAR. In: **Primeras Jornadas Latinoamericanas de Percepción Remota por Radar: Técnicas de Procesamiento de Imágenes**, Buenos Aires, dec. 1996. Paris, ESA, 1997, p. 170–185. (ESA SP 407)
- Welch, R.M.; Kuo, K.S.; Sengupta, S.K. Cloud and surface textural features in polar regions. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 28(4):520-528. July 1990.
- Weszka, J.S.; Dyer, C.R.; Rosenfeld, A. A comparative study of texture measures for terrain classification. **IEEE Transactions on Systems and Man Cybernetic**, **SMC-6** (4):269-285. Apr. 1976.
- White, R.G. **Low-Level segmentation of noise imagery**. Memorandum 3900, DRA, Royal Signal and Radar Establishment, Works, 1986.
- Xu, W.; Cumming, I. A Region Growing Algorithm for InSAR Phase Unwrapping. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Lincoln, 1996. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 3, p. 2044-2047
- Yahia, M.; Belhadj, Z. Unsupervised classification of polarimetric SAR images using neural networks. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, July 21-25, 2003. **Proceedings**. New York: IEEE. v.1 , p. 203-205.
- Yanasse, C. C. F. **Statistical analysis of synthetic aperture radar images and its applications to system analysis and change detection**. (PhD Thesis) - University of Sheffield, 1991. 298p.
- 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, São José dos Campos, 1995. 31p. (INPE-5630-NTC/318).
- Yanasse, C.C.F.; Sant'Anna, S.J.S.; Frery, A.C.; Rennó, C.D.; Soares, J.V.; Luckman, A.J. Exploratory study of the relationship between tropical forest regeneration stages and SIR-C L and C data. **Remote Sensing of Environment**, 59(2):180–190, 1997.
- Zebker, H.; Goldstein, R. M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. B5, p. 4993-4999, April 1986.

- Zebker, H.A.; Lou, Y. Phase calibration of imaging radar polarimeter Stokes matrices. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 2, p. 246–252, March 1990.
- Zebker, H. A. e Villasenor, J. Decorrelation in interferometric radar echoes, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 950-959, Sep 1992.
- Zebker, H. A.; Werner, C. L.; Rosen, P. A. e Hensley, S. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 4, p. 823-836, July 1994.
- Zhi, Z.; Chao, W.; Hong, Z. A new registration of interferometric SAR: least-squares registration. In: 22<sup>nd</sup> Asian Conference on Remote Sensing. Singapore, Nov. 5-9, 2001. v. 2, p. 1000-1004. Disponível em: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/319liu.pdf> (acesso em Maio de 2005).