

# Polarimetria SAR: Conceitos básicos e aplicações no monitoramento oceânico

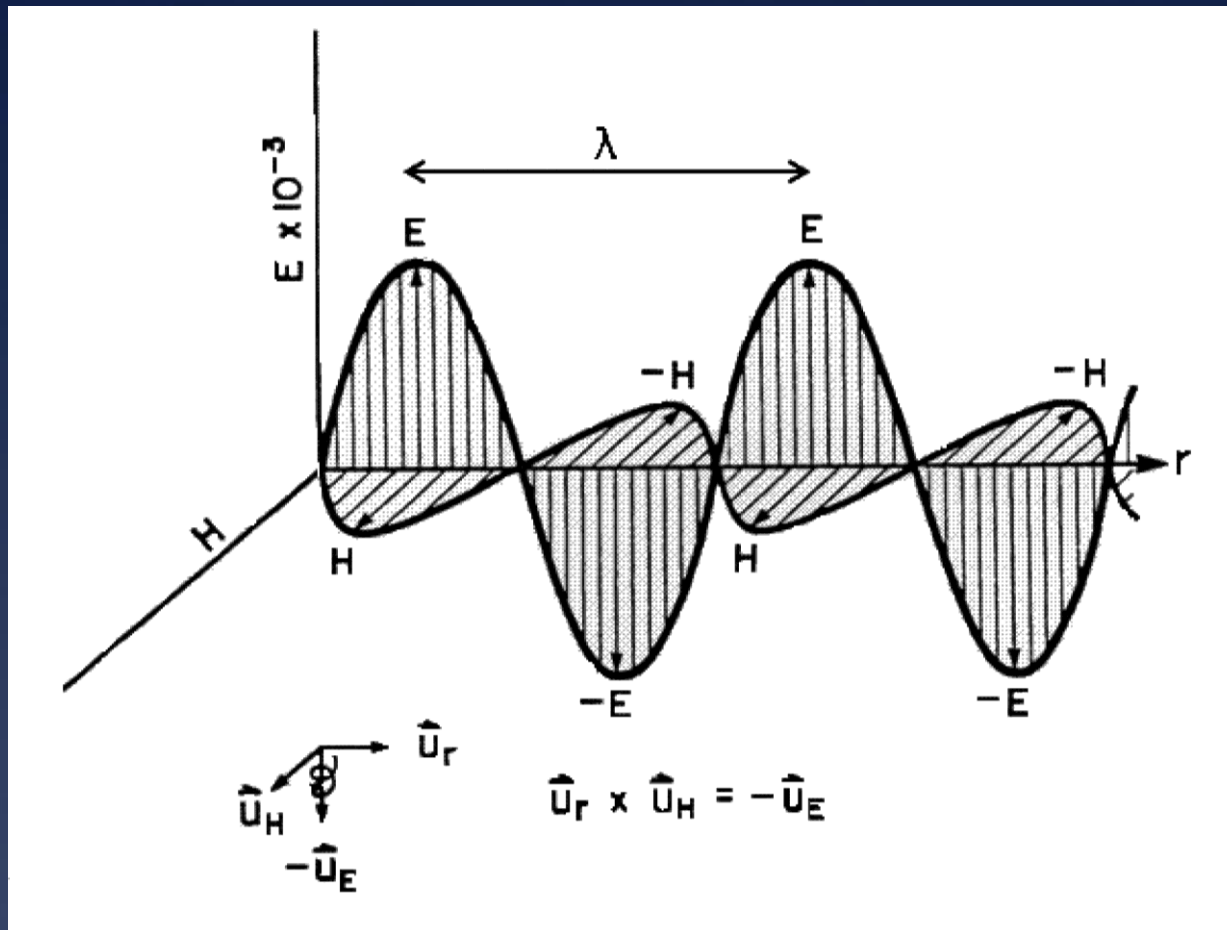
*João A. Lorenzetti*

*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE*

*MCTIC*

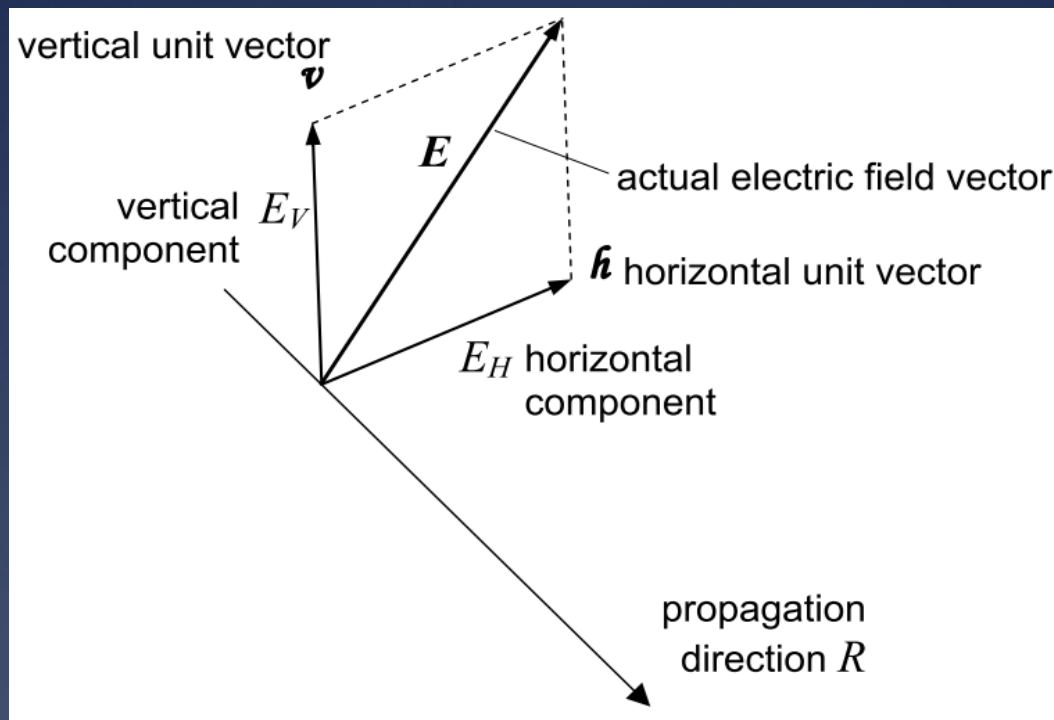
*São José dos Campos, SP*

# Representação esquemática de uma Onda Eletromagnética



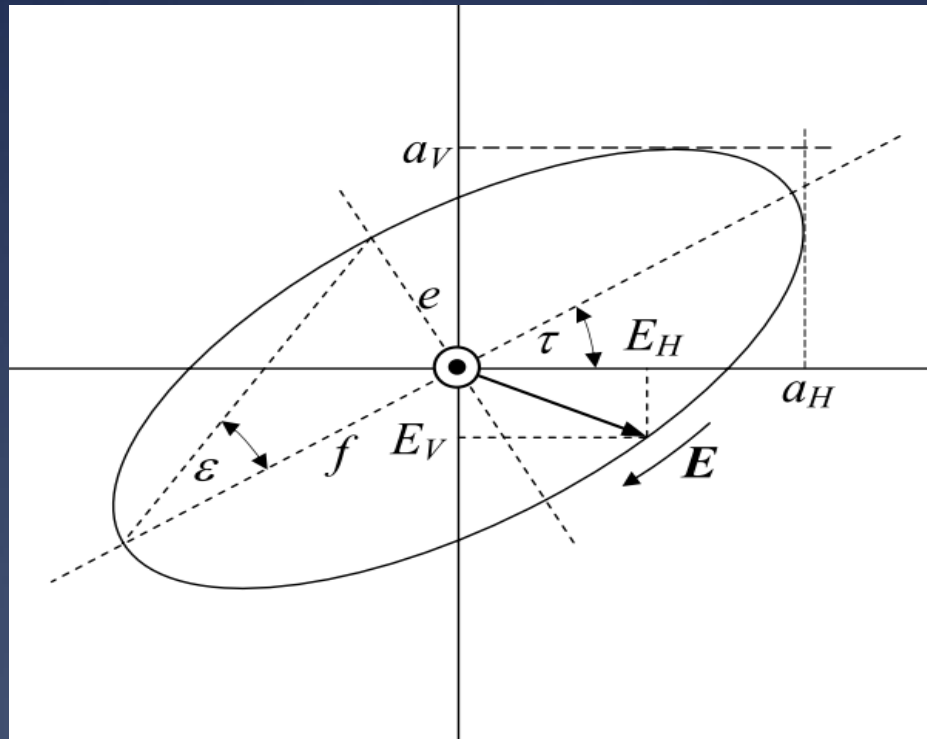
# A polarização de uma Onda Eletromagnética - OEM

Se nos concentrarmos no Campo Elétrico ( $\mathbf{E}$ ) de uma OEM plana, num dado instante de tempo, ele pode ser representado por um vetor que apresentará uma orientação num plano perpendicular ao vetor de propagação, e que pode ser decomposto em duas componentes ortogonais entre si, p.ex. horizontal e vertical:



# A polarização de uma Onda Eletromagnética - OEM

Da maneira mais geral, à medida que a OEM propaga, a ponta do vetor  $\mathbf{E}$  traça uma elipse num plano perpendicular à direção de propagação. A polarização da OEM é totalmente descrita pelos parâmetros da elipse de polarização:  $\tau$  = o **ângulo de orientação** de polarização;  $\varepsilon = e/f$  a **elipticidade**, e,  $A = (a_V^2 + a_H^2)^{1/2}$  a **intensidade** da onda.



# A polarização de uma Onda Eletromagnética - OEM

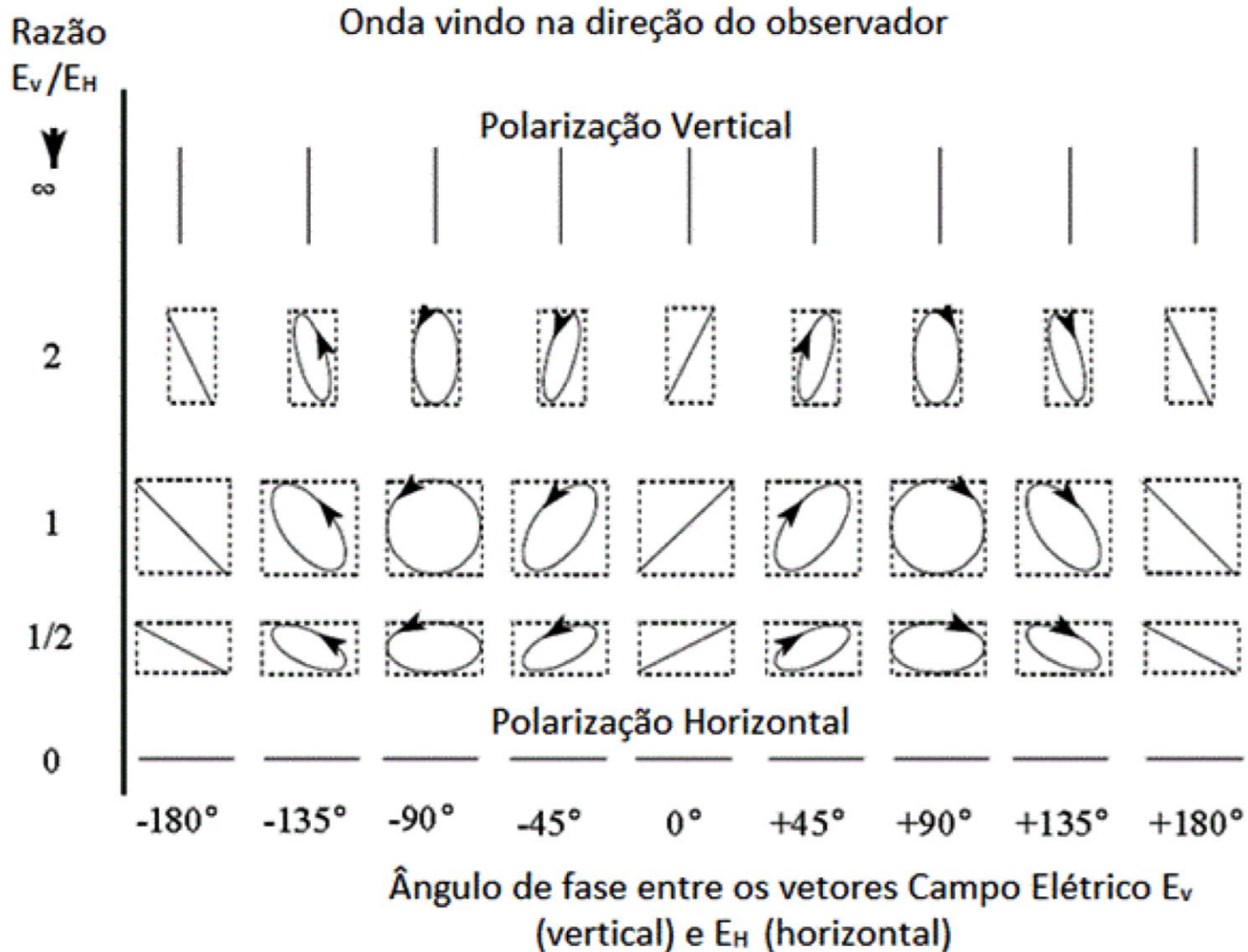
Se a OEM estiver propagando na direção-z , então podemos escrever:

$$\vec{E}(z, t) = \begin{bmatrix} a_x \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ a_y \cos(\omega t - kz + \delta_y) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Onde  $\mathbf{a}_x$  e  $\mathbf{a}_y$  são as **magnitudes** de  $\mathbf{E}$  nas direções x e y, respectivamente.  $\omega = 2\pi/T$  é a **frequência angular** da onda (rad/s) e T seu período (s).  $k = 2\pi/\lambda$  é o **número de onda** (rad/m), e  $\lambda$  o comprimento de onda (m).  $\delta_x$  e  $\delta_y$  são as fases das componentes da onda.

Dependendo dos valores de  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $\delta_x$  and  $\delta_y$  podemos ter todos os possíveis estados de polarização. Em termos de  $\delta = \delta_y - \delta_x$  Podemos ter **polarização linear** (se  $\delta=0$  or  $180^\circ$ ), **circular** (se  $\delta = \pm\pi/2$  e  $a_x=a_y$ ). Se a polarização não é nem linear nem circular, ela será **elíptica** (a menos que seja totalmente não-polarizada).

# A polarização de uma Onda Eletromagnética - OEM



# A Matriz de Espalhamento - $\mathbf{S}$

Agora, para qualquer polarização, se quisermos relacionar o campo elétrico retro-espalhado ( $E^b = (E_H^b, E_V^b)$ ) ao campo incidente sobre um alvo ( $E^i = (E_H^i, E_V^i)$ ), isto pode ser feito por meio da matriz de espalhamento  $\mathbf{S}$ ;

$$\begin{bmatrix} E_H^b \\ E_V^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} \quad \text{OU} \quad E^b = \mathbf{S}E^i$$

Para um sistema SAR polarimétrico, os elementos de  $\mathbf{S}$  são números complexos, i.e. eles possuem magnitude e fase.

Pode ser mostrado que os termos de  $\mathbf{S}$  estão relacionados com a Seção Reta de Radar Normalizada ( $\sigma_{pq}^o$ ), por

$$\sigma_{pq}^o = \frac{4\pi}{r_a r_g} \left| \mathbf{S}_{pq} \right|^2$$

Onde  $r_a$  e  $r_g$  são as resoluções SAR em azimute e range no terreno.

# O Vetor Alvo - $\mathbf{k}$ ou $\mathbf{k}_p$

Uma forma mais conveniente de descrever as propriedades polarimétricas de um pixel numa imagem SAR Pol é via uma vetorização da *matriz*  $\mathbf{S}$ . Uma forma possível é:

$$\mathbf{k} = [S_{HH} \quad S_{HV} \quad S_{VH} \quad S_{VV}]^T$$

Onde T é a operação de transposição de matrizes e  $\mathbf{k}$  é chamado de vetor alvo(em base lexicográfica).

Para retro-espalhamento, normalmente se assume que  $S_{HV} = S_{VH}$  e  $\mathbf{k}$  é normalmente re-escrito como:

$$\mathbf{k} = [S_{HH} \quad \sqrt{2}S_{HV} \quad S_{VV}]^T$$

One  $(2)^{1/2}$  foi introduzido para preservar a norma de  $\mathbf{k}$ . Outra possibilidade é a assim chamada de vectorização de Pauli , na qual:

$$\mathbf{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T$$



# Matrizes de Covariância e Coerência

Uma forma frequentemente usada para representar as propriedades polarimétricas de uma área é feita usando-se as matrizes de covariância  $\mathbf{C}$ , ou coerência  $\mathbf{T}$ , e o **valor esperado** (uma média espacial ou um multilook) dos produtos internos de  $\mathbf{k}$  e  $\mathbf{k}_p$

$$\mathbf{C} = E(\mathbf{k} \cdot \mathbf{k}^{*T})$$

e

$$\mathbf{T} = E(\mathbf{k}_p \cdot \mathbf{k}_p^{*T})$$

Onde  $E(\ )$  representa o valor esperado estatístico.

# A decomposição polarimétrica de Cloude-Pottier

Essa é uma decomposição da matriz de coerência  $\mathbf{T}$  por autovetores e autovalores, proposta por Cloude-Pottier, que é baseada numa decomposição de similaridade de  $\mathbf{T}$ : i.e., uma matriz diagonal contendo seus autovalores ( $\lambda_i$ ) e uma matriz  $U_3$  (3x3) com os autovetores como colunas:

$$\langle |T| \rangle = [U_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U_3]^*{}^T$$

Ou

$$T = \sum_{i=1}^3 \lambda_i u_i u_i^{*T}$$

Onde os  $u_i$  são os auto-vetores de  $\mathbf{T}$ .

# A decomposição polarimétrica de Cloude-Pottier

A partir dessa decomposição de **T** Lee & Pottier (2009) propuseram as seguintes métricas:

a) **Entropia (H)**: 
$$H = -\sum_{i=1}^3 p_i \log_3 p_i, \quad p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i} \quad (0 \leq H \leq 1)$$

Quando  $H \rightarrow 0$ , a região imageada é caracterizada por um mecanismo dominante de espalhamento,  $\lambda_1 \neq 0$ ,  $\lambda_2$  e  $\lambda_3 \approx 0$ . Segundo Migliaccio et al. (2007): H baixo  $\rightarrow$  sup. mar limpa/ assemelhados a óleo com baixo amortecimento radar;

Quando  $H \rightarrow 1$ ,  $\lambda_1 \cong \lambda_2 \cong \lambda_3$  a cena é caracterizada por espalhamento completamente despolarizante, e três mecanismos de espalhamento, Segundo Migliaccio et al. (2007): H alto  $\rightarrow$  sup. do mar com cobertura de óleo.

# A decomposição polarimétrica de Cloude-Pottier

A partir dessa decomposição de **T** Lee & Pottier (2009) propuseram as seguintes métricas:

b) **Anisotropia (A):** 
$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (0 \leq A \leq 1)$$

O coeficiente de anisotropia (A), é complementar à H, e descreve o peso relativo dos dois menores autovalores.

c) **Ângulo médio de espalhamento ( $\bar{\alpha}$ ):**

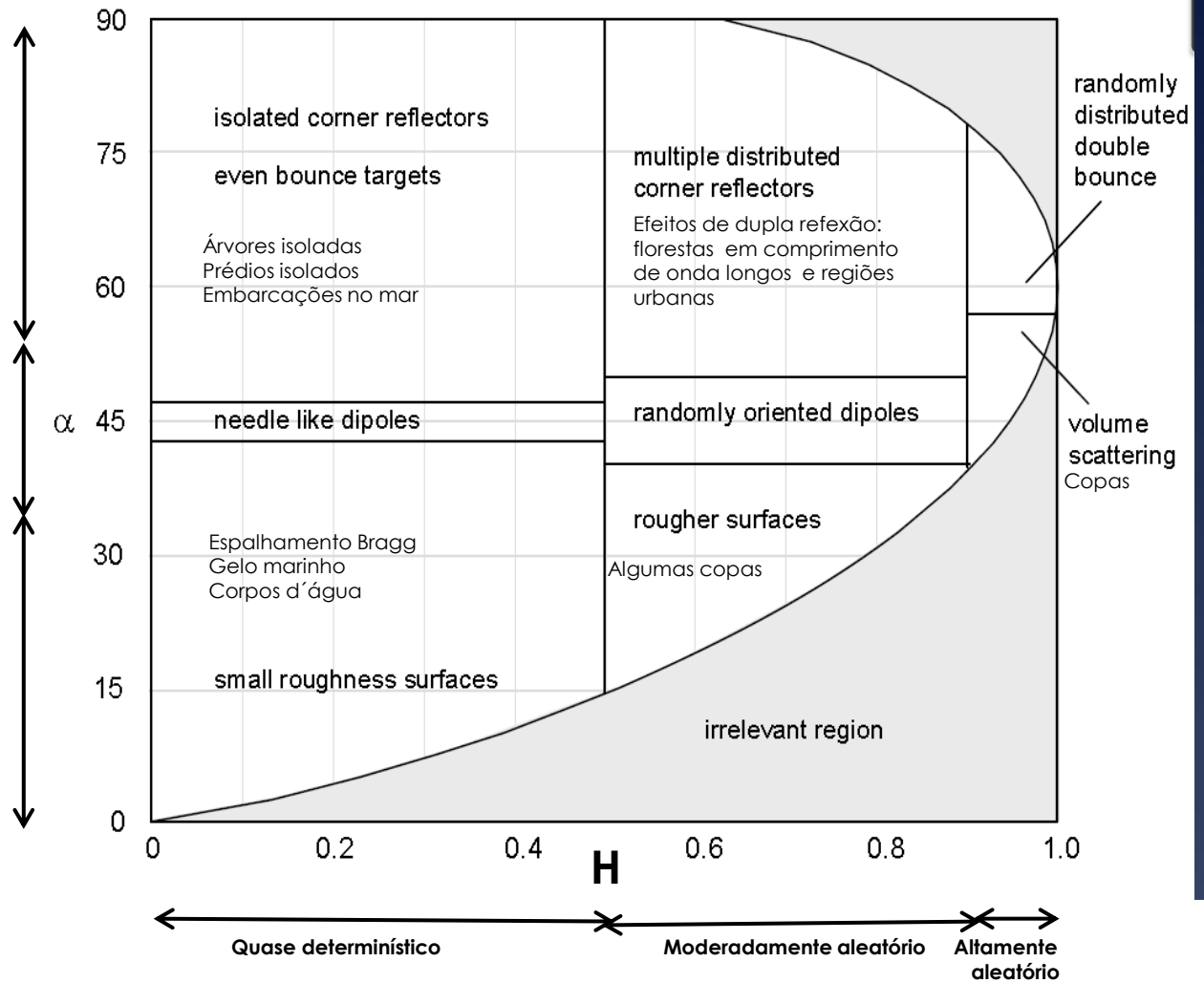
$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad \text{onde } 0^\circ \leq \alpha_i = \cos^{-1}(|u_i(1)|) \leq 90^\circ$$

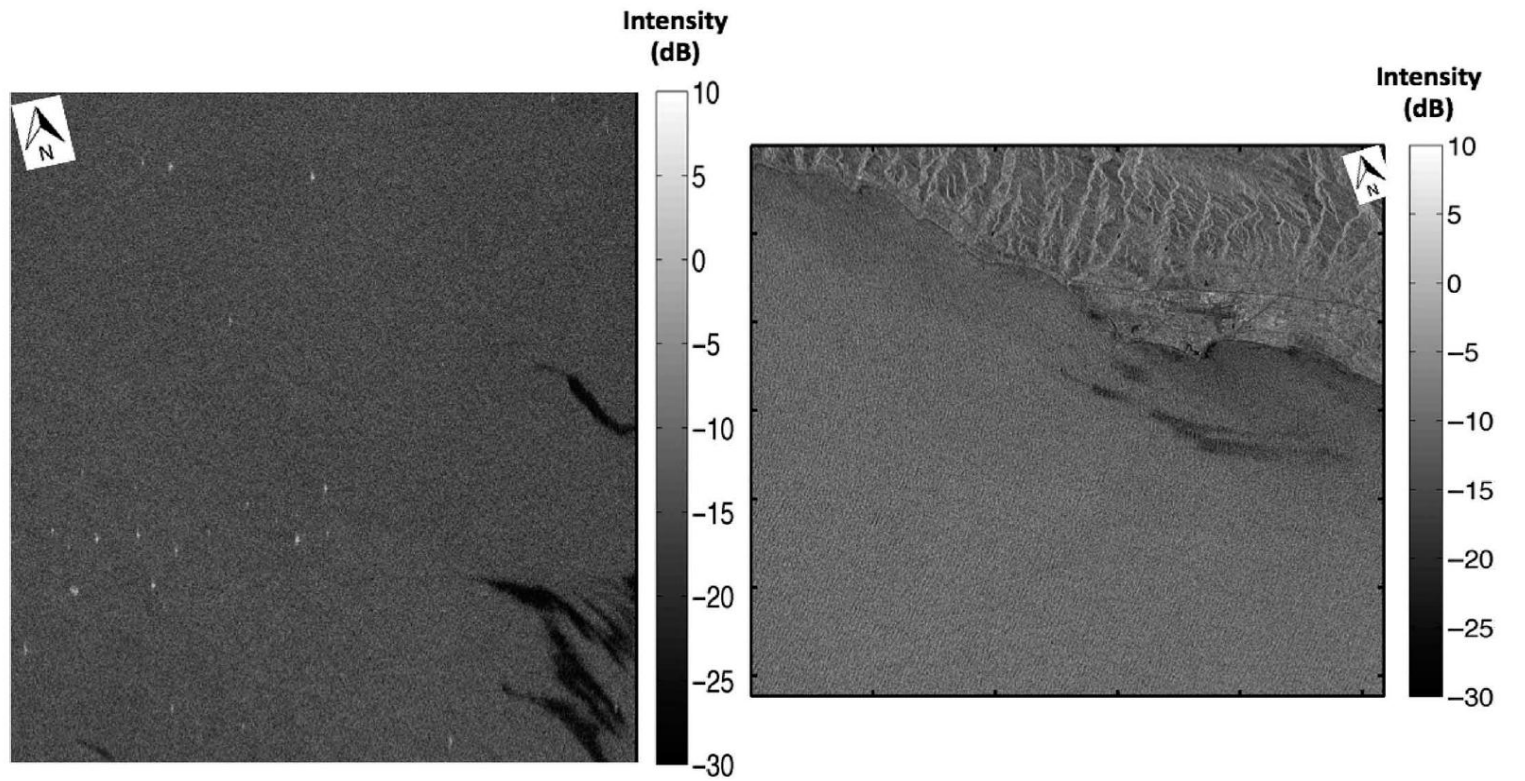
$\bar{\alpha}$  é normalmente usado em conjunto com H e A em polarimetria SAR para propósitos de classificação. Por exemplo: a superfície do oceano sem óleo é associada a valores de  $\bar{\alpha}$  inferiores a  $45^\circ$ , enquanto maiores valores são esperados em áreas com óleo.

Espalhamento de duplo rebatimento

Difusão volumétrica

Espalhamento de superfície





A

A) Porção de imagem Radarsat-2 (16 km x 11 km) VV (intensidade em dB) Data: 15/05/2010  
Local: Costa Louisiana, Golfo do México.

Alguns alvos metálicos (plataformas) e alguns derrames de óleo (oil slicks)

B

B) Porção de imagem Radarsat-2 (29 km x 12 km) VV (Intensidade em dB) Data: 14/12/2009  
Local: Costa da Califórnia

Assemblado de fraco amortecimento causado por descarte de água de produção de uma plataforma



Imagem entropia (H) da Figura A slide anterior

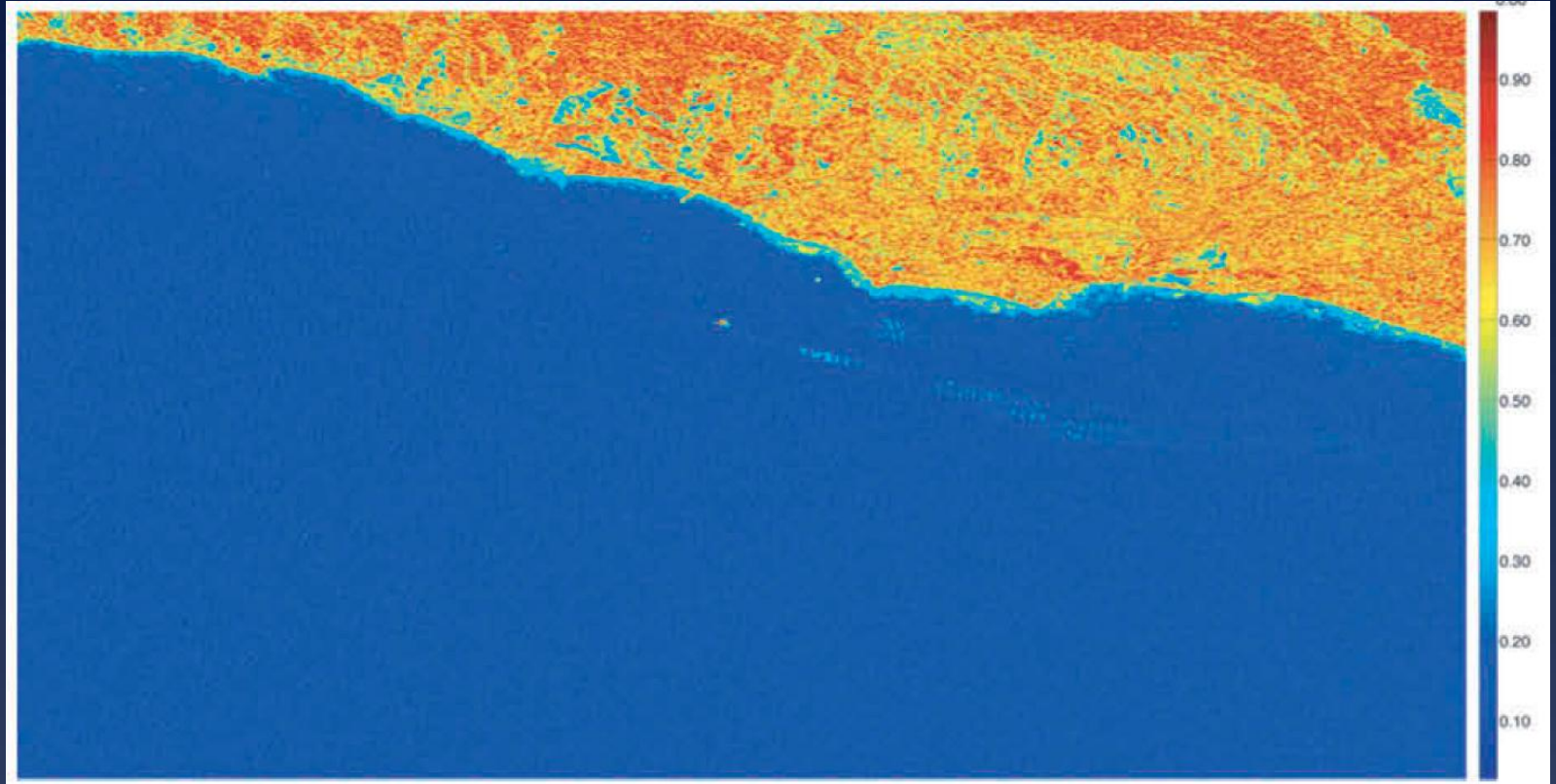
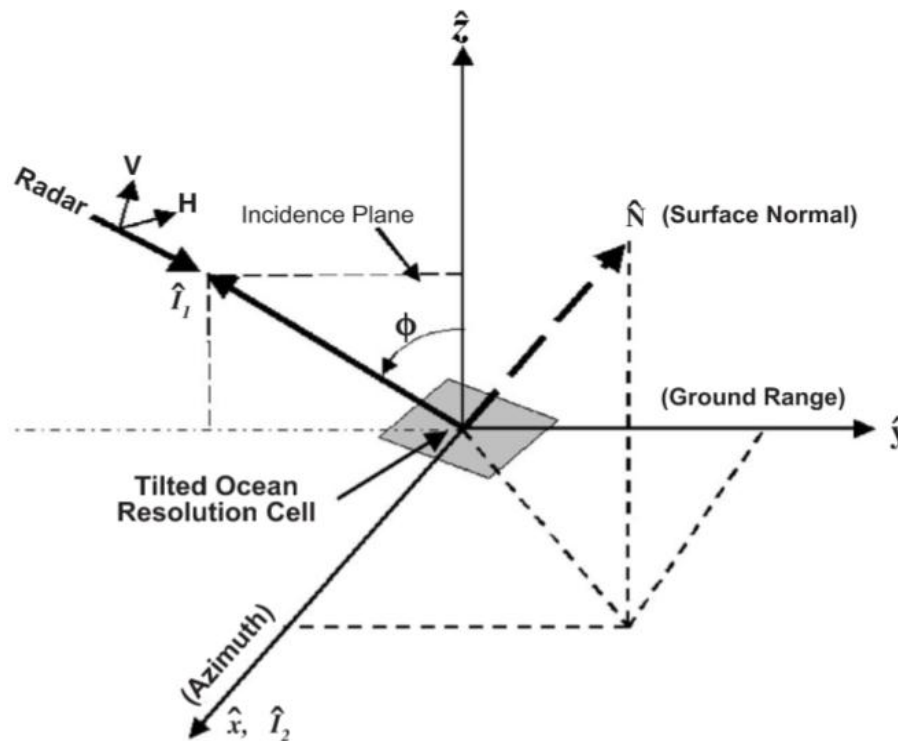


Imagem entropia (H) da Figura B slide anterior



## Relacionando o ângulo de orientação ( $\tau$ ) à inclinações azimutais

Uma inclinação  $\theta$  de uma porção da superfície do mar no plano perpendicular ao plano de incidência do feixe radar (inclinação azimutal), introduzirá modificações na matriz original de espalhamento  $\mathbf{S}$ , que é derivada assumindo-se uma superfície levemente rugosa, mas horizontal.



Essa inclinação é equivalente a uma rotação de  $\theta$  graus na matriz  $\mathbf{S}$  ao longo do eixo de incidência.

# Relacionando o ângulo de orientação ( $\tau$ ) à inclinações azimutais

A "nova" matriz  $S$  é matematicamente dada por

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

Obviamente, essa rotação modificará as matrizes Covariância e Coerência. Assumindo que o espalhamento Bragg é o mecanismo dominante, os termos fora da diagonal principal de  $S$  original podem ser considerados zero. Com essa simplificação, é possível se mostrar que

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix}$$

Também, se prova que  $\theta$  é a mudança do ângulo de orientação em relação a  $\tau = 90^\circ$ , a máxima resposta na assinatura Bragg copolarizada da superfície oceânica.

# O parâmetro de as inclinações range

Assumindo que Bragg é o mecanismo de retro-espalhamento, é possível se mostrar que

$$\tan \alpha = \frac{S_{VV} - S_{HH}}{S_{VV} + S_{HH}}$$

As componentes de espalhamento Bragg da matriz **S** para valores da constante dielétrica da água do mar para frequências de micro-ondas (~80), podem ser aproximadas por

$$S_{VV} = 1 + \sin^2 \phi_i \quad \text{and} \quad S_{HH} = \cos^2 \phi_i, \quad \phi_i = \text{ang. incidência}$$

Que resulta em

$$\tan \alpha = \sin^2 \phi_i$$

Assim, se plotarmos alfa como função do ângulo de incidência e subtrairmos a relação teórica acima (ou uma função polinomial adequada), os desvios representam perturbações de inclinações range.

# Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

## 1) Dados usados:

### 1.1 Dados de satélite:

#### **ALOS/PALSAR**

Mode: Polarimetric SLC (L1.1)

Aquisição: 13-abril-2009 01:56Z

Órbita: Ascendente

Visada: Direita

Resolução: 3.58m x 22.89m (Az x Rg)

Ângulos Incidência:  $23.02^\circ$  -  $25.23^\circ$

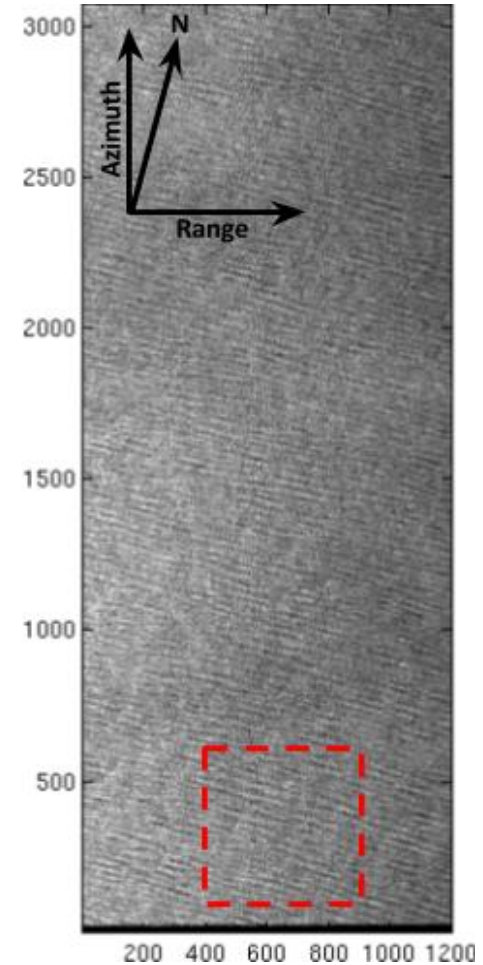
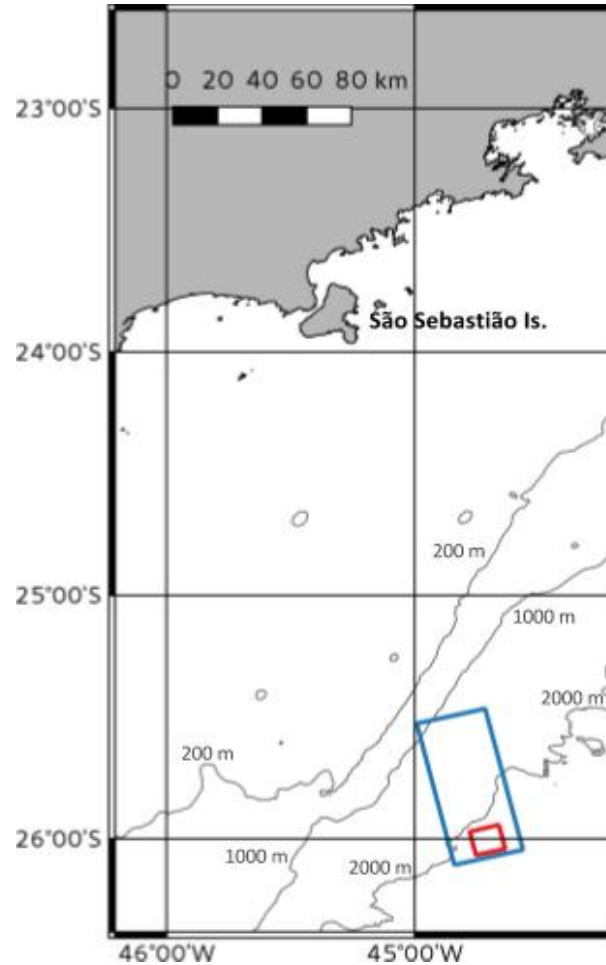
id *ALPSRP171396670*

# Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

## 1) Data

### 1.1 Satellite data:

ALOS  
PALSAR  
13-april-2009  
01:56Z



# Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

## 1) Dados

### 1.2 Resultados de modelagem de ondas:

**Modelo:** WaveWatch, com parameterização dos termos fonte ST4

- **domínio:** global,
- **resolução:** 0.5 graus na direção N&S
- **número de pontos:** 720 X 315
- **resolução espectral:** 25 frequências, com  $f_1 = 0.04177$  Hz,  $f_2 = f_1 * 1.1$ , etc.  
 $f(n+1)=f(n)*1.1$
- **resolução direcional :** 24 direções, cada 15 graus

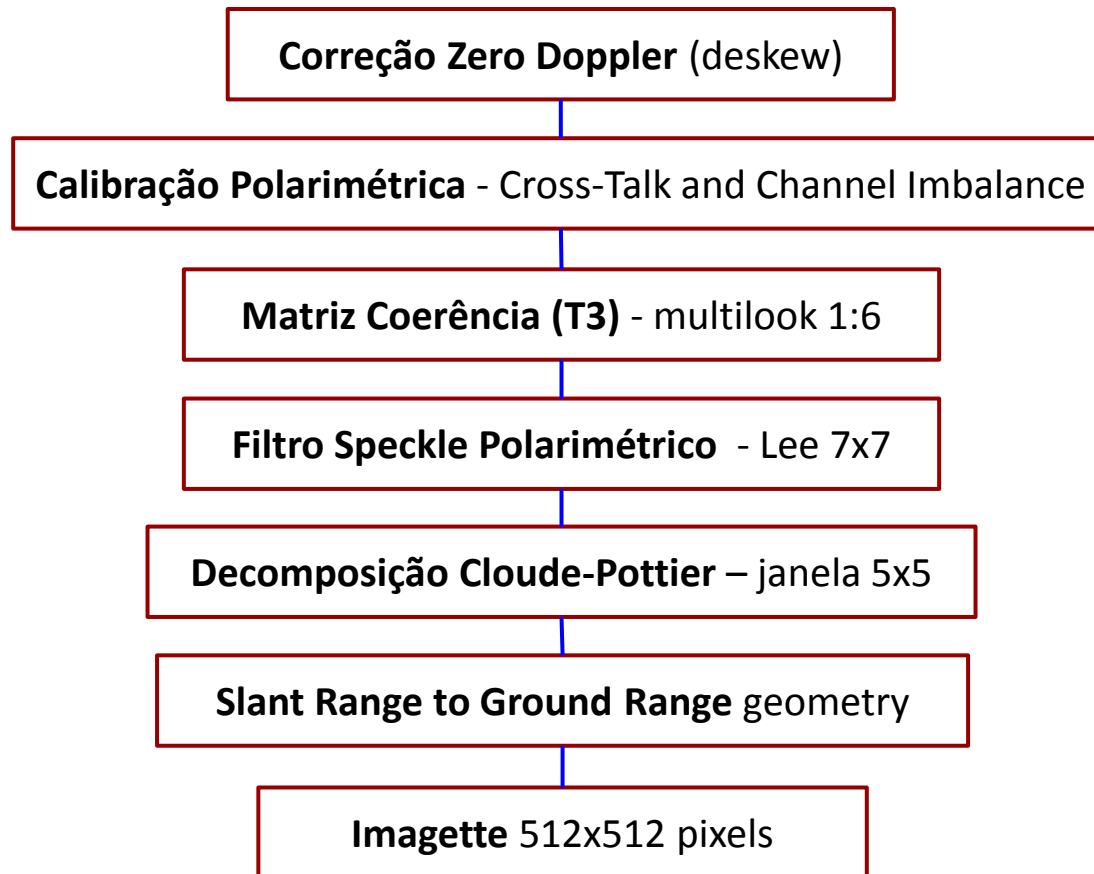
### Ventos

- NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) ventos à 10-m, disponíveis para 1979 - 2010,
- resolução espacial ~ 38 km
- disponível cada uma hora

# Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

## 2) Metodologia

### 2.1 Passos do processamento das imagens

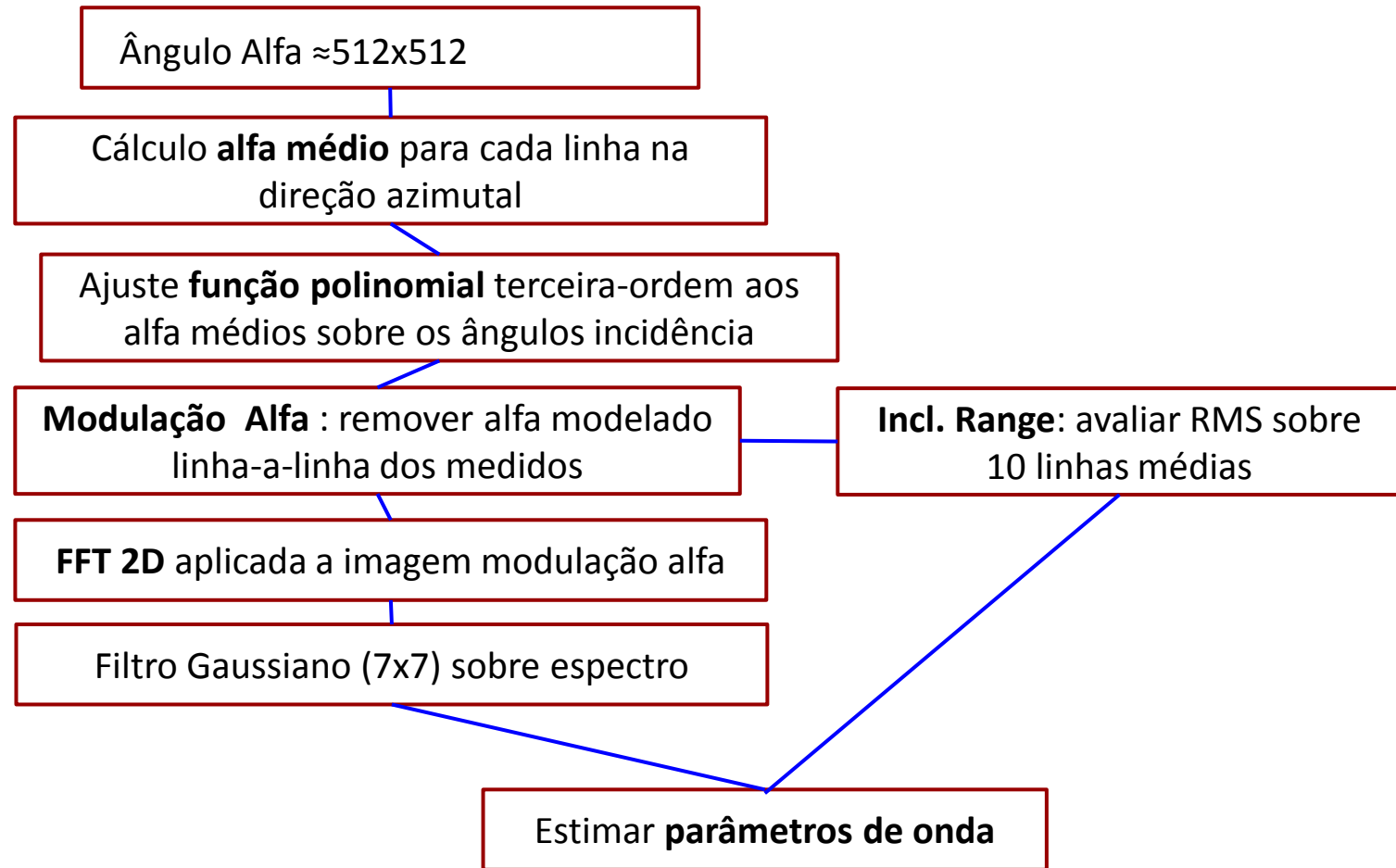


# Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

## 2) Metodologia

### 2.2 Processamento polarimétrico para estimação de parâmetros de onda

Abordagem Cloude-Pottier

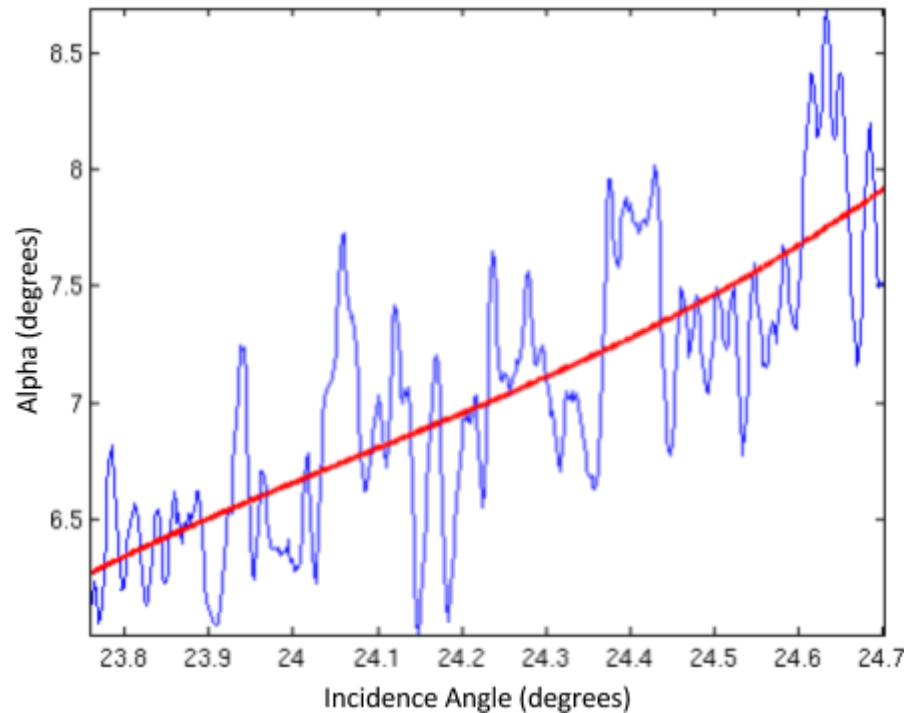




# Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

## 2) Resultados

### 2.3 Resultados do Processamento Polarimétrico

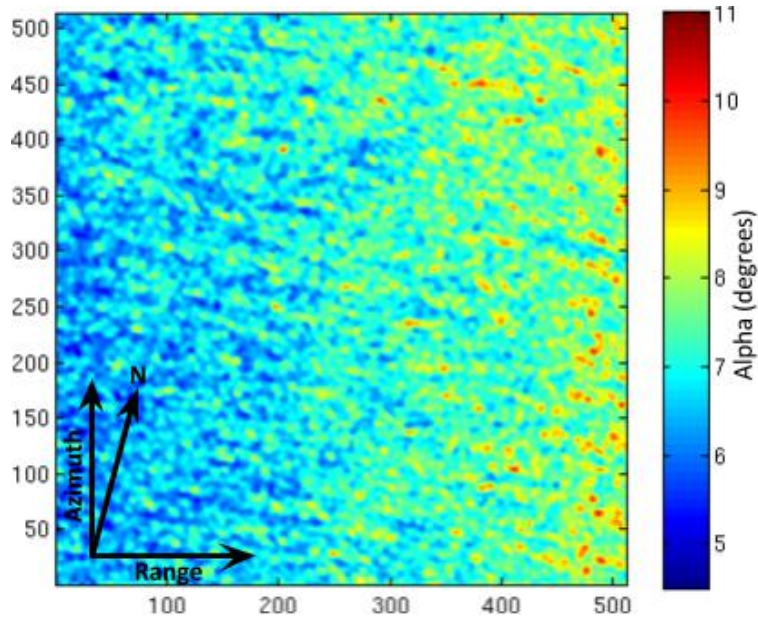


Ângulos Alfa como função do ângulo de incidência e ajuste polinomial 3ª ordem usada no cálculo das modulações ângulo alfa

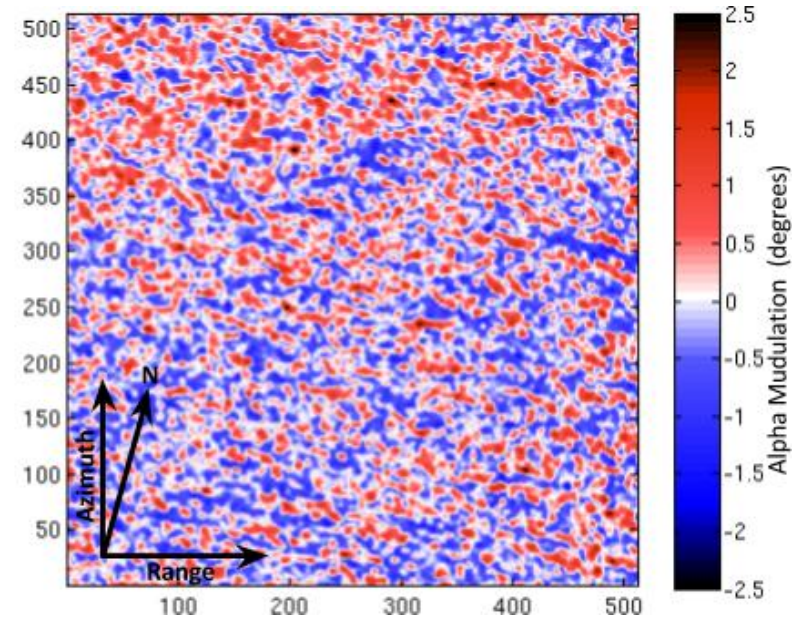
# Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

## 2) Resultados

### 2.3 Resultados Processamento Polarimétrico



Ângulos Alfa para imagem escolhida

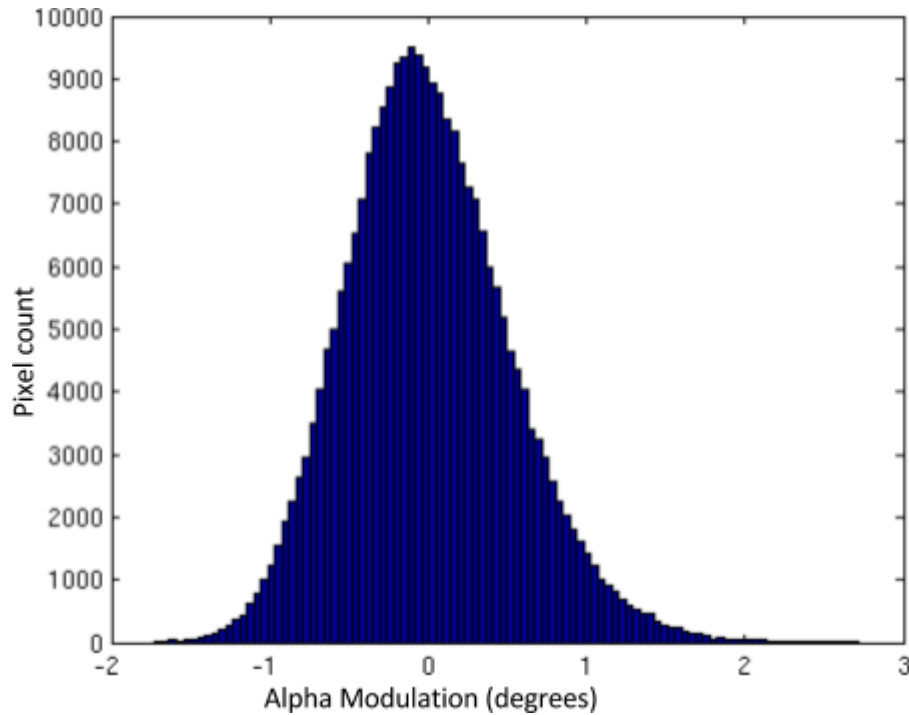


Modulações ângulo Alfa

# Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

## 2) Resultados

### 2.3 Resultados Processamento Polarimétrico

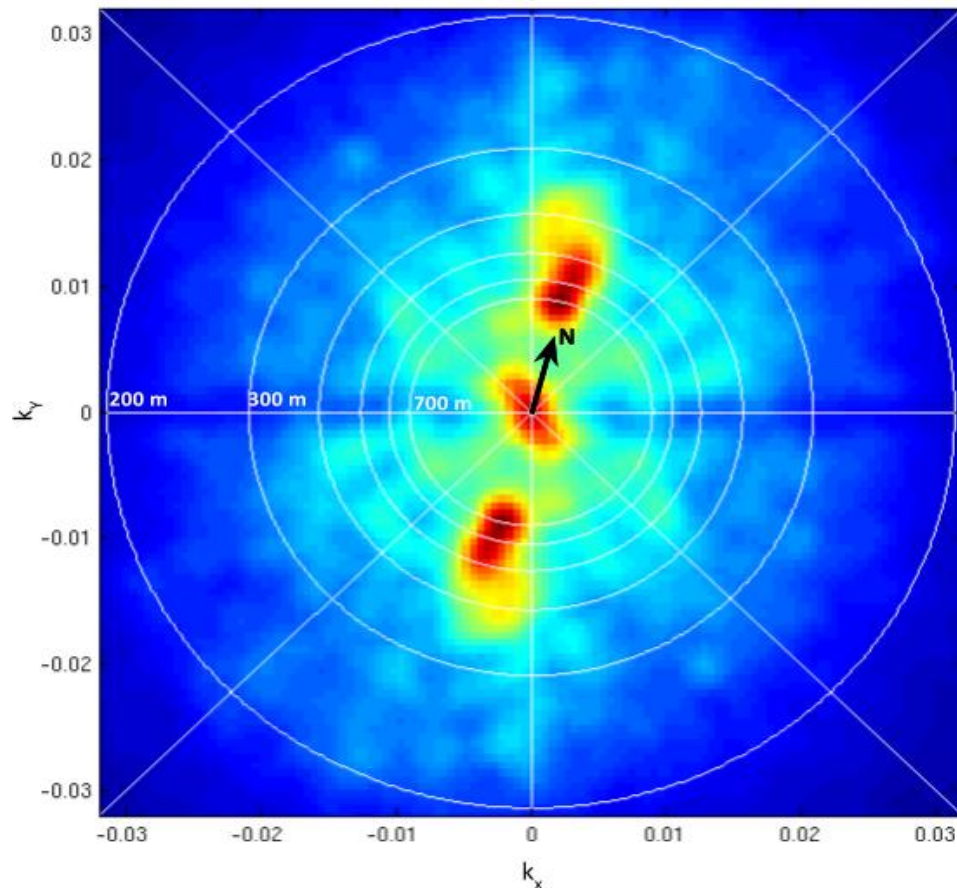


Histograma das Alpha angle

# Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

## 2) Resultados

### 2.3 Resultados Processamento Polarimétrico

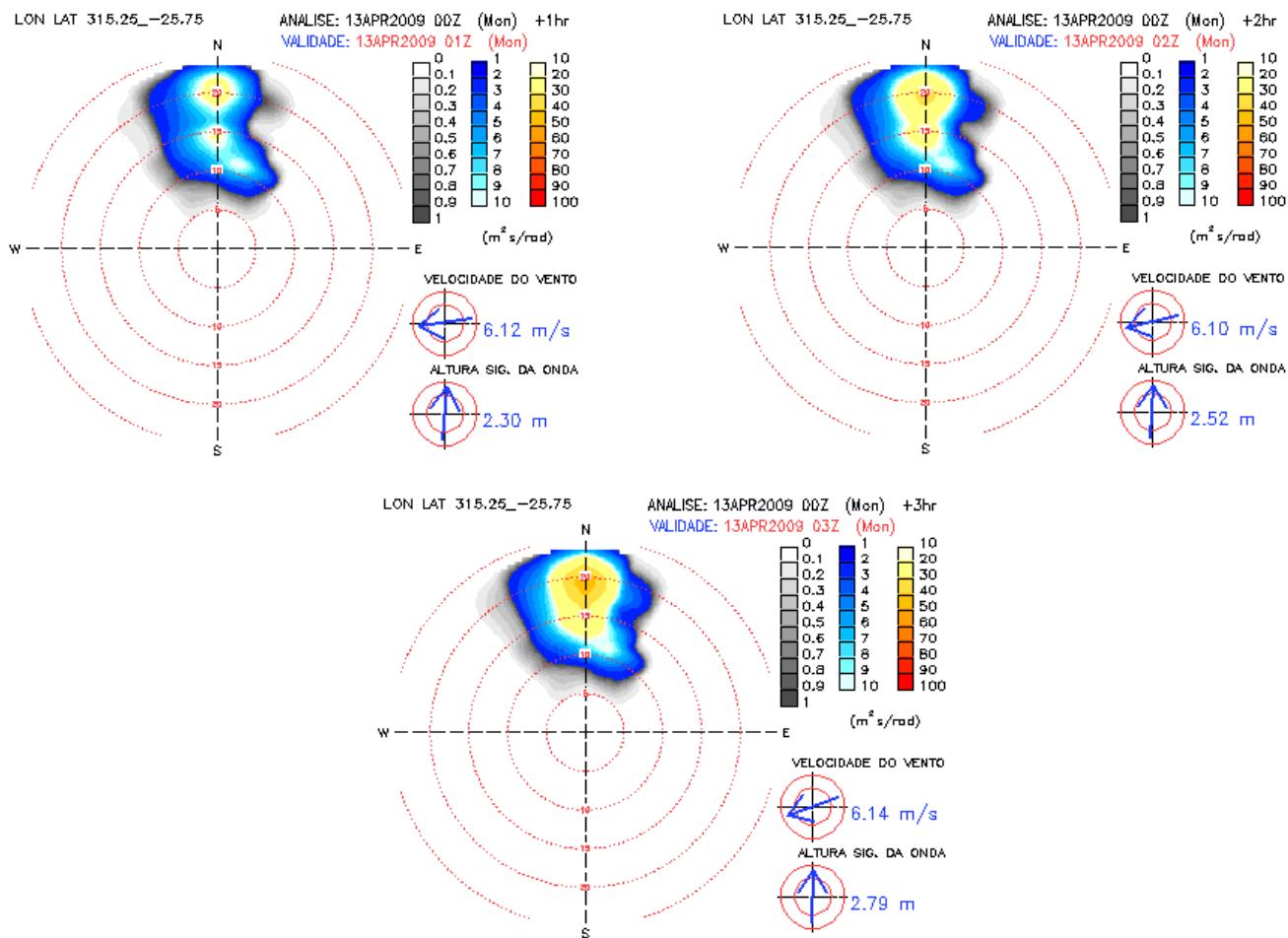


Espectro direcional filtrado Gaussiano FFT das modulações ângulo Alfa

# Some preliminary results for SE coast of Brazil

## 2) Results

### 2.4 Wave Watch modelling results



Wave Watch directional frequency spectra for -1, 0, +1 h and center position of ALOS imagette

# Some preliminary results for SE coast of Brazil

## 2) Results

### 2.5 Comparing PolSAR with Wave Watch modelling results

Using the deep water dispersion relation to convert from frequency to wavelength and vice-versa, the following results were obtained:

	Wave watch	ALOS PolSAR
Peak frequency	20 s	21 s
Peak wavelength	624 m	690 m
Propagation direction	180°	183°
$H_{1/3}$	2.52 m	
$H_{rms}$		2.2 m
Alfa slope rms		0.363°

$$H_{rms} = \tan \alpha_{rms} \times \frac{\lambda}{2}$$

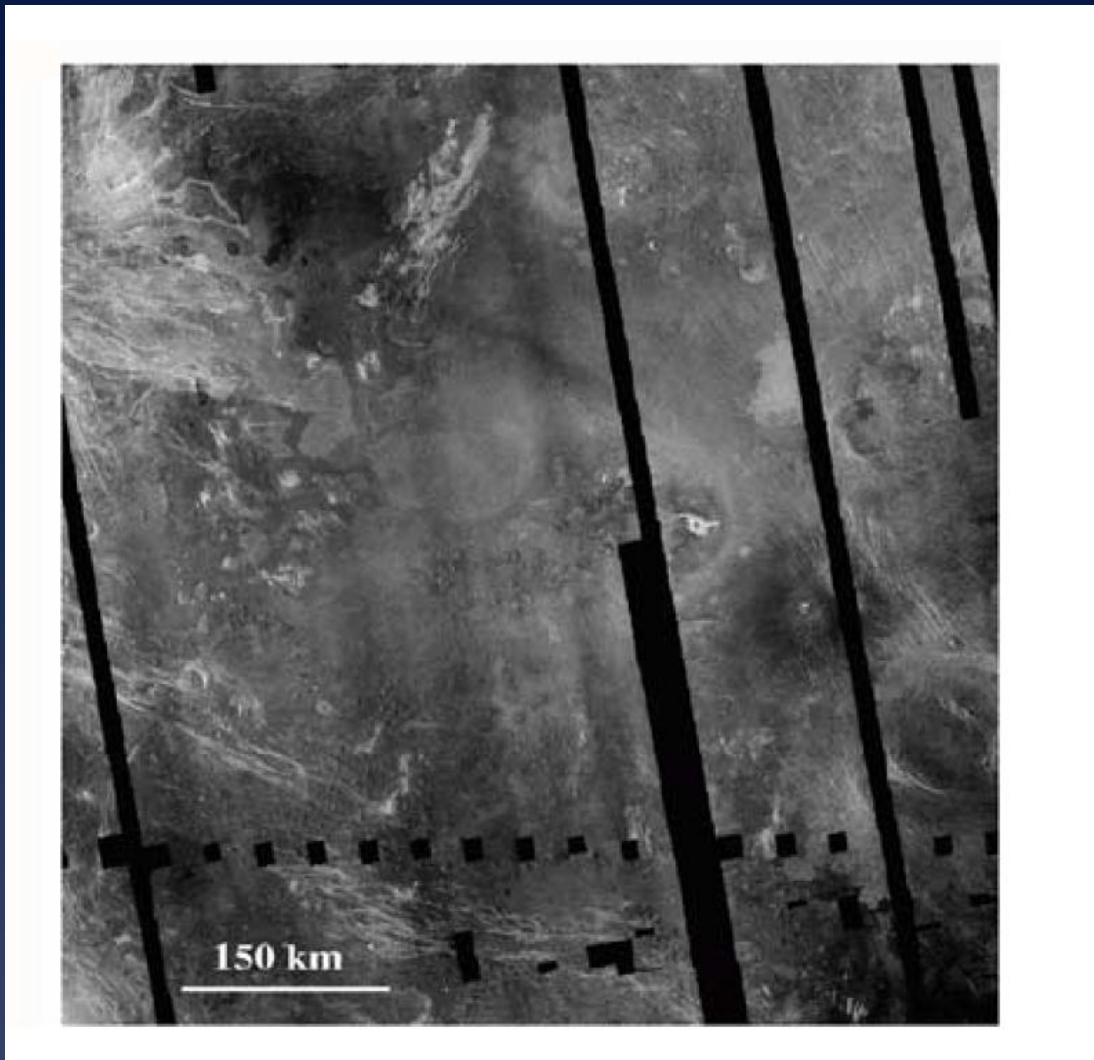


Fig. 1. Image on the left maps the *degree of linear polarization* (0–0.18) associated with the crater Neline on Venus. The Magellan HH-polarized SAR image is shown on the right for comparison. (Reproduced with permission, courtesy L. Carter).

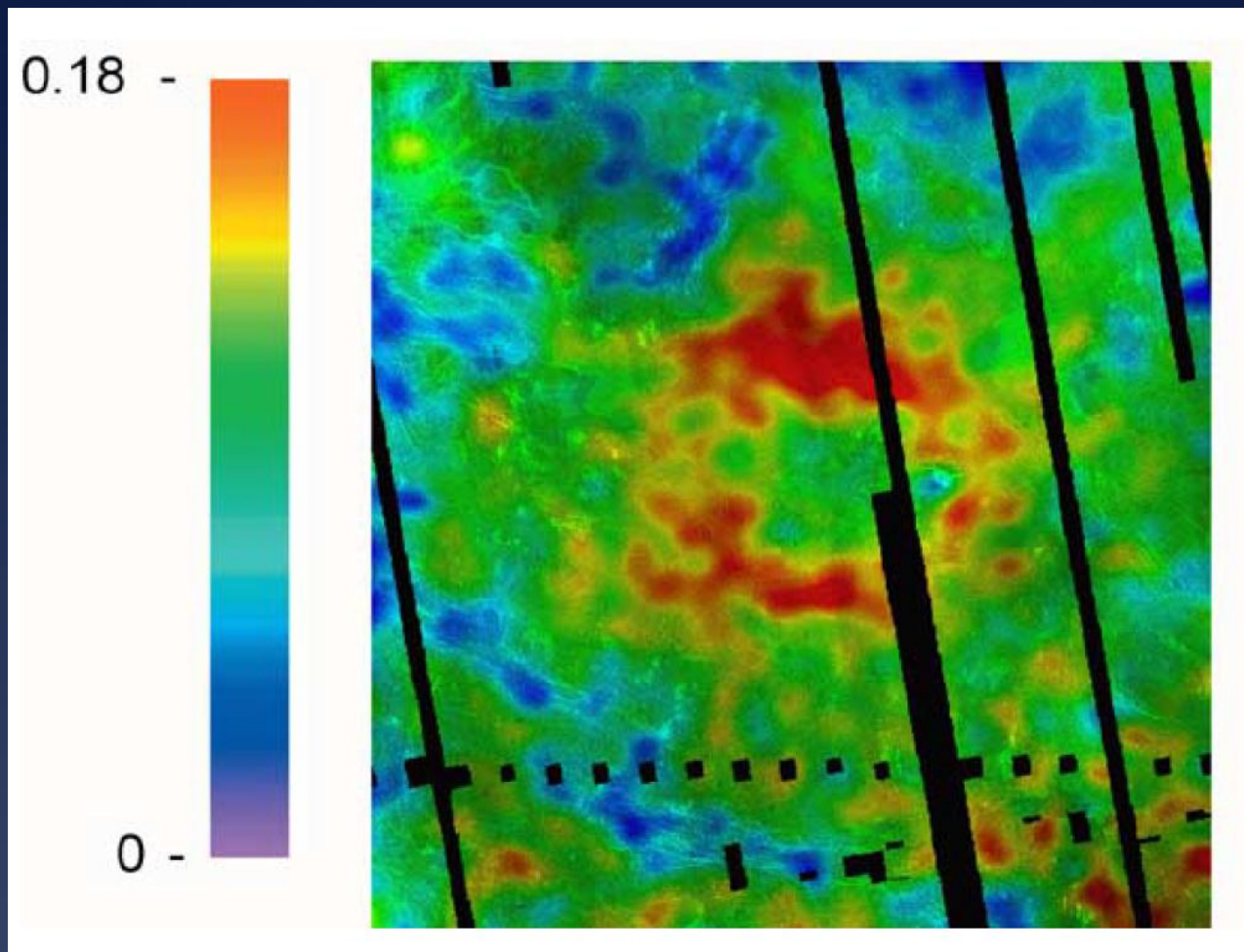


Fig. 1. Image on the left maps the *degree of linear polarization* (0–0.18) associated with the crater Neliike on Venus. The Magellan HH-polarized SAR image is shown on the right for comparison. (Reproduced with permission, courtesy L. Carter).



Obrigado