



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.22.17.48-TDI

**DETECÇÃO DE ALVOS NO MAR EM IMAGENS SAR  
EXPLORANDO RECURSOS DA POLARIMETRIA  
COMPACTA EM MODO HÍBRIDO**

Rafael Lemos Paes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. João Antonio Lorenzetti, aprovada em 18 de dezembro de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L83TUB>>

INPE  
São José dos Campos  
2015

## **PUBLICADO POR:**

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) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):**

### **Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **Membros:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.22.17.48-TDI

**DETECÇÃO DE ALVOS NO MAR EM IMAGENS SAR  
EXPLORANDO RECURSOS DA POLARIMETRIA  
COMPACTA EM MODO HÍBRIDO**

Rafael Lemos Paes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. João Antonio Lorenzetti, aprovada em 18 de dezembro de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L83TUB>>

INPE  
São José dos Campos  
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Paes, Rafael Lemos.

P139d Detecção de alvos no mar em imagens SAR explorando recursos da polarimetria compacta em modo híbrido / Rafael Lemos Paes. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxii + 113 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.22.17.48-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientador : Dr. João Antonio Lorenzetti.

1. SAR. 2. Polarimetria compacta. 3. Detecção de alvos.  
4. Caracterização polarimétrica. 5. Métricas de desempenho.  
I.Título.

CDU 528.8.044.2

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

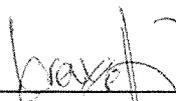
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Rafael Lemos Paes**

Título: "DETECÇÃO DE ALVOS NO MAR EM IMAGENS SAR EXPLORANDO RECURSOS DA POLARIMETRIA COMPACTA EM MODO HÍBRIDO".

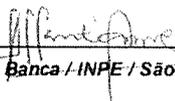
Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Doutor(a)** em  
**Sensoriamento Remoto**

Dr. João Antonio Lorenzetti



Presidente / Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Sidnei João Siqueira Sant'Anna



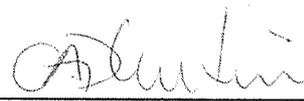
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Douglas Francisco Marcolino  
Gherardi



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Carlos Alexandre Domingos Lentini



Convidado(a) / UFBA / Salvador - BA

Dr. David Fernandes



Convidado(a) / ITA / SJCampos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(  ) unanimidade

São José dos Campos, 18 de dezembro de 2015



*“A única coisa necessária para o triunfo do mal é que os homens de bem nada façam.”*

*Edmund Burke – Filósofo e político irlandês*



*À memória de minha querida avó Tida, dedico esta tese como símbolo da  
minha gratidão por todo amor e abnegação dispensados. Sois única!*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente a Deus por tudo de bom que tem ocorrido em minha vida e pela oportunidade de ter uma bela família e de crescer pessoal e profissionalmente.

Agradeço imensamente a toda minha família pelo apoio e por acreditarem em mim e no sucesso desta missão. Agradeço a minha esposa Camila por estar sempre ao meu lado, motivando-me e fazendo-me acreditar no sucesso desta tese. As minhas filhas Helenna e Cecilia, agradeço-as pela bondade de seus corações em haver paciência comigo. Pela primeira vez na vida delas, me verão em condição diferente de estudante! Muito obrigado aos meus sogros pelo desprendimento, coragem e carinho que nos deram todos estes anos em suas vindas a São José dos Campos. A meus pais e a minha irmã, pelo apoio incondicional e sem medir esforços. Muito especialmente agradeço, a sua memória, a minha querida avó Tida que após seus 100 anos de vida seguiu para o plano superior, mas nos deixou um legado de trabalho, de bondade e de humildade. Obrigado à Sara, tão querida babá de nossas meninas!

Agradeço ao meu orientador, o Professor João Antonio Lorenzetti por toda a sua paciência, respeito e confiança desde os tempos do mestrado. As suas orientações foram e serão ainda muito importantes de agora em diante. As portas que se abriram diante de mim nesta área de pesquisa foram seguramente, em sua maior parte, devido à credibilidade de ser aluno de alguém com conhecimento profissional e caráter reconhecidos internacionalmente.

Agradeço a todos os companheiros de IEAv, em especial aos colegas de EGI. Minha convivência com vocês e todas as atividades desenvolvidas proporcionaram-me um crescimento profissional e pessoal necessários para que chegasse à conclusão de um estudo como este. Agradeço à chefia da Divisão e à Direção pelas oportunidades de realizar este doutorado por autorizarem meu estágio de pesquisa no exterior, além de todo respaldo e confiança depositados. Agradeço em especial ao Ten Cel Eng Marcus Vinicius Teixeira Monteiro pela compreensão das dificuldades encontradas e pelo suporte prestado, assim como pelas diversas horas de discussões sobre o processamento SAR. Aprendi muito.

Agradeço ao INPE por ser a Instituição de excelência que é e por haver toda a infraestrutura necessária para apoiar seus pesquisadores e alunos. Em particular, agradeço ao serviço de pós-graduação do Sensoriamento Remoto e a todos os coordenadores que por ali passaram neste período de curso. Ao Dr.

Flavio Ponzoni e à Vera Fontes agradeço de coração toda a compreensão e auxílio quanto às diversas questões profissionais específicas de minha parte que foram necessárias contornar. Agradeço ao Dr. Douglas Gherardi pelas produtivas discussões sobre o pensamento científico e ao Dr. Sidnei Sant'anna pelas discussões sobre SAR e sobre como é difícil gerenciar um doutorado mais a família e mais o trabalho. Muito obrigado também aos caros colegas do Laboratório de Guerra Eletrônica do ITA por toda confiança, amizade e oportunidades de contribuir com meus conhecimentos em suas pesquisas e atividades. Obrigado ao Professor David Fernandes pelos conselhos e pela confiança.

Por último, e não menos importante, agradeço aos amigos que fiz nos anos que passei em Nápoles (Itália), Gianluca Morra e esposa, Luca Levantino e esposa, Pasquale Palumbo e esposa, Antonio Altieri e Salvatore Orlando. Um obrigado muito especial ao Professor Maurizio Migliaccio que acreditou em meu potencial e aceitou minha proposta de trabalho como pesquisador visitante na *Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*. Obrigado aos amigos do *Laboratorio di Telerilevamento*: Ferdinando Nunziata, Andrea Buono, Antonio Montuori, Flavia Lenti, Valeria Corcione, Lucio Mascolo, Domenico Schiavulli, Angelo Gifuni e Antonio Sorrentino. Um grande abraço aos caríssimos colegas Michele, Gianfranco, Giampaolo, Fabio, Roberto e Angel. *Grazie, raggà! Siete stati Sempre!*

Agradeço ao CNPq pelo apoio através do projeto N° 560190/2010-7 - Edital AEB 33/2010 – Detecção de alvos em imagens orbitais.

## RESUMO

No presente estudo, a detecção de alvos metálicos no mar através de imagens SAR orbitais será estudada através de novos recursos polarimétricos. A Polarimetria Compacta consiste na transmissão de uma única onda com polarização diferente dos sentidos horizontal e vertical e na recepção em duas bases ortogonais e coerentes. A principal vantagem deste modo de imageamento é que permite que uma área maior em superfície seja coberta, porém proporcionando praticamente as mesmas informações obtidas em um modo *full-pol*, o qual apresenta a restrição de cobrir pequenas áreas. Assim, a exploração desta tecnologia em atividades de monitoramento de grandes áreas como as oceânicas são de grande interesse para a comunidade científica. Este estudo mostrará como algumas arquiteturas em Polarimetria Compacta poderão ser emuladas a partir de dados *full-polarimétricos*, além da geração de parâmetros polarimétricos. A arquitetura Modo Híbrido será explorada e analisada. Através da detecção destes alvos por meio da técnica de limiarização global mostrar-se-á a robustez de tais parâmetros para tal propósito. Adicionalmente, demonstrar-se-á como é possível combinar as informações destes parâmetros, caracterizando os alvos através de suas respostas polarimétricas. A arquitetura HP e seus parâmetros não são construídos como pseudo assinaturas *full-pol*, pois são interpretados como dados HP reais e a partir de tais parâmetros inferem-se propriedades de espalhamento de uma cena. A superfície do mar é investigada em função das condições ambientais e das características dos alvos. Para tanto, técnicas que usam limiares globais e adaptativos (ex.: CFAR) foram implementados. A avaliação de desempenho é feita através de métricas como Figura-de-Mérito (FoM) e também novas métricas que avaliam a sensibilidade dos parâmetros no Modo Híbrido dadas as variações do fundo oceânico, assim como também a influência das características dos alvos para as detecções (DoST). Métricas objetivas para avaliar a influência relativa ao estado do mar (RSPoIF) sobre os diversos parâmetros polarimétricos e canais intensidade são apresentados e associados à escala de Beaufort e à escala de estado de mar. Os resultados experimentais demonstram que os parâmetros do Modo Híbrido são capazes de distinguir alvos do fundo oceânico apenas com limiares globais. Estes parâmetros fornecem informações polarimétricas complementares e permitem a caracterização destes alvos quando combinados, por exemplo, quanto ao tipo de rebatimento da onda retroespalhada e quanto à rugosidade da superfície, entre outras informações.

Palavras-chave: SAR. Polarimetria compacta. Detecção de alvos.

Caracterização polarimétrica. Métricas de desempenho.



# **SAR SEA TARGET DETECTION EXPLOITING FEATURES OF HYBRID-POLARITY ARCHITECTURE ON COMPACT POLARIMETRY**

## **ABSTRACT**

In this study, target at sea detection is addressed using Hybrid Polarity (HP) Synthetic Aperture Radar (SAR) architecture. Wave polarimetry concepts are used to define HP features that are used to observe targets at sea. The sensitivity of HP features to both targets and the surrounding environment is analyzed through the novel objective norm, namely the Relative Sensitivity for Polarimetric Features (RSPoIF) index. Detection performance is evaluated by the novel Dependency of Sea state and Target surface characteristics (DoST) metric, and by the well-known Figure-of-Merit (FoM). Experiments undertaken on HP measurements emulated from Radarsat-2 and ALOS-PALSAR full-polarimetric actual SAR data demonstrate the effectiveness of the proposed HP approach and the different sensitivity of HP features to targets and background sea characteristics. Following those results, a ranking the HP features performance is proposed which mainly highlights that HP features complement each other in the detection process. Finally, a Constant False Alarm Rate (CFAR) approach is proposed to exploit two HP features for target detection in an unsupervised way. A useful way to characterize sea and metallic targets can be achieved by means of PCA. Main HP features can be selected, analyzing the first PC, and the characterization is done according some polarimetric behaviors.

Keywords: SAR. Compact.polarimetry. Target detection. Polarimetric characterization. Performance metrics.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Resposta polarimétrica de canais copolarizados para uma superfície marinha ligeiramente rugosa.....	28
Figura 3.1 – Esquema geral da metodologia adotada.....	39
Figura 3.2 – Esquema de blocos com os procedimentos para o cálculo do RSPoIF.....	41
Figura 3.3 – Cálculo da norma local sobre o gradiente do parâmetro $H_w$ .....	43
Figura 3.4 – Explicação visual dos parâmetros Me e LB.....	44
Figura 3.5 – Definição de um limiar que separe duas classes de valores com distribuições estatísticas diferentes. ....	47
Figura 3.6 – Esquema de algoritmos de detecção baseados em limiar global e em CFAR.....	48
Figura 4.1 – Imagem ALOS PALSAR ALPSRP179000580 e seus relativos parâmetros polarimétricos. ....	56
Figura 4.2 – Exemplo de limiares globais aplicados com base nos comportamentos esperados para os parâmetros HP para um alvo significativo da cena. ....	60
Figura 4.3 – Influência da agitação da superfície do mar sobre o parâmetro $ \mu_{hv} $ . ....	61
Figura 4.4 – Análise das influencias do ambiente sobre o desempenho de $\mu_c$ na imagem ALPSRP179000580.....	63
Figura 4.5 – Efeito das características do alvo sobre o desempenho da detecção. ....	64
Figura 4.6 – Independência de $\delta_{hv}$ às dimensões dos alvos metálicos.....	66
Figura 4.7 – Capacidade de $ \mu_{hv} $ em perceber pequenos alvos.....	67
Figura 4.8 – Comparação entre respostas polarimétricas copolarizadas de alvo e mar. ....	68
Figura 4.9 – Análise do desempenho de $ \mu_{hv} $ conforme FoM para cada imagem SAR. ....	71

Figura 4.10 - Análise do desempenho de $\mu c$ conforme FoM para cada imagem SAR. ....	72
Figura 4.11 – Análise do desempenho de $ \mu hv $ conforme DoST para cada imagem SAR. ....	73
Figura 4.12 - Análise do desempenho de $\mu c$ conforme DoST para cada imagem SAR. ....	74
Figura 4.13 – RISAT 1: Imagem SAR RH intensidade e demais parâmetros HP. ....	80
Figura 4.14 – Resultados da limiarização global na imagem RISAT-1.....	83
Figura 4.15 – Navio SANCO EUROPE – verdade de campo.....	86
Figura 4.16 – Caracterização do navio conforme os pares de parâmetros polarimétricos $\mu c$ , $p$ e $\delta hv$ .....	87
Figura B.1 – Caracterização polarimétrica do navio SAMCO EUROPE.....	107
Figura B.2 – Caracterização polarimétrica do navio BUDAPEST BRIDGE ....	108
Figura B.3 – Caracterização polarimétrica do navio ERNEST SHACKLETON .....	109

## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 2.1 – Valores relativos ao comportamento esperado de cada parâmetro polarimétrico HP/CP.....	31
Tabela 3.1 – Descrição das imagens SAR e das características ambientais relacionadas.....	36
Tabela 3.2 - Parâmetros HP emulados e utilizados .....	40
Tabela 3.3 – Escala de índices RSPoIF .....	45
Tabela 4.1 - Imagens ALOS PALSAR. Resultados dos desempenhos com limiarização global e conforme RSPoIF e as métricas DoST e FoM....	53
Tabela 4.2 - Imagens Radarsat-2. Resultados dos desempenhos com limiarização global e conforme RSPoIF e as métricas DoST e FoM....	54
Tabela 4.3 – Imagem ALOS PALSAR ALPSRP179000580. Resultados dos desempenhos com limiarização global e conforme RSPoIF e as métricas DoST e FoM.....	58
Tabela 4.4 – Imagem ALOS PALSAR ALPSRP179000580. Intervalo de valores esperados, valores médios e limiares globais aplicados .....	59
Tabela 4.5 - Imagens ALOS PALSAR e Radarsat-2. Resultados dos desempenhos com CFAR e conforme RSPoIF e as métricas DoST e FoM .....	70
Tabela 4.6 - Associação dos índices RSPoIF às escalas de estado do mar e de Beaufort.....	76
Tabela 4.7 - Associação dos índices RSPoIF à escala de Beaufort.....	77
Tabela 4.8 – Correlação entre a primeira PC e os parâmetros HP. ....	85
Tabela 4.9 – Dados descritivos dos navios encontrados na imagem RISAT-1.	86
Tabela B.1 – Descrição do navio SAMCO EUROPE .....	107
Tabela B.2 – Descrição do navio BUDAPEST BRIDGE.....	108
Tabela B.3 – Descrição do navio ERNEST SHACKLETON.....	109



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CP	Compact Polarimetry
HP	Hybrid Polarity
RSPoIF	Relative Sensitivity of Polarimetric Features
FA	Falsos Alarmes
AP	Alvos Perdidos
CFAR	Constant False Alarm Rate
DoST	Dependency of Sea State and Targets characteristics
DSS	Dependency of Sea State
DTSC	Dependency of Target Surface Characteristics



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Hipótese.....	5
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Organização do trabalho.....	6
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>7</b>
2.1. Estado-da-arte.....	7
2.2. Polarimetria.....	13
2.3. Conceitos de polarimetria de onda.....	19
2.3.1. Matriz de polarização.....	19
2.3.2. Grau de polarização da onda.....	21
2.3.3. Entropia da onda.....	23
2.3.4. Polarimetria compacta.....	23
2.3.4.1. A arquitetura $\pi/4$ (Linear).....	24
2.3.4.2. A arquitetura Circular-Circular (CC).....	25
2.3.4.3. A arquitetura Polaridade Híbrida (HP).....	26
2.3.5. Razão de polarização circular.....	26
2.3.6. Comportamento esperado dos parâmetros polarimétricos.....	28
<b>3 MATERIAIS E METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
3.1. Imagens SAR, dados complementares e verdades de campo.....	33
3.1.1. Satélite SAR Radarsat-2.....	36
3.1.2. Satélite SAR ALOS PALSAR.....	37
3.1.3. O satélite SAR RISAT-1.....	38
3.2. Metodologia.....	38
3.2.1. Análise de sensibilidade dos parâmetros polarimétricos HP à variação oceânica.....	40
3.2.2. Detecção de alvos sobre cada imagem parâmetro HP e implementação de métodos de detecção global e adaptativo.....	46
3.2.3. Análise do desempenho das detecções usando métricas objetivas....	49

3.2.4. Análise de Principais Componentes (APC) para seleção de atributos e para caracterização polarimétrica de alvos .....	50
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>53</b>
4.1. Limiarização global .....	59
4.2. Limiarização adaptativa .....	68
4.3. Associação dos índices RSPoIF às escalas de estado do mar e de Beaufort .....	74
4.4. Imagens SAR HP reais do satélite RISAT-1: limiarização global.....	79
4.5. Caracterização de alvos .....	84
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>89</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE A - ARTIGO CIENTIFICO DO TIPO COMPLETO PUBLICADO NO IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING.....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE B- RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES POLARIMÉTRICAS PARA OS NAVIOS ENCONTRADOS NA IMAGEM RISAT-1 .....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXO A – ESCALA DE BEAUFORT PARA FORÇA DO VENTO .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXO B – ESCALA DE DOUGLAS PARA O ESTADO DO MAR .....</b>	<b>113</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um SAR (do inglês, *Synthetic Aperture Radar*) é um sistema de sensoriamento remoto imageador ativo atuando na faixa das micro-ondas, o qual realiza observações independentemente da iluminação solar e, praticamente, sua imagem não é afetada pelas condições meteorológicas. Basicamente, os sinais retroespalhados por alvos no mar são muito mais intensos do que os sinais retroespalhados pelo próprio mar, devido às suas grandes estruturas metálicas em relação ao comprimento da onda eletromagnética, resultando em pontos mais brilhantes no plano da imagem SAR. Contudo, fatores internos e externos podem aumentar o ruído do fundo oceânico (*clutter background*), como, por exemplo, condições ambientais (ventos de superfície, correntes, células de chuva, etc.), e como fatores internos podem-se citar características do radar como resolução espacial, frequência, polarização, ângulo de incidência, direção da visada radar, etc. Assim, a informação provida por um SAR de polarização simples (*single-polarization* ou *single-pol.*) pode não ser sempre suficiente para observá-los efetivamente.

Alvos não-naturais na superfície do mar podem ser encontrados em diversas formas, mas não somente em termos de tamanho. O material de que são constituídos e a estrutura sobre sua superfície (ex., convés de embarcações) contribuem, sobremaneira, para o retroespalhamento do sinal radar transmitido e, conseqüentemente, para intensidade com que este retornará. De fato, referindo-se a navios, tem-se como aplicação imediata a vigilância marítima por meio de satélites SAR, a qual serve para a segurança da navegação, para ações antipirataria, monitoramento de campos petrolíferos, e o controle do tráfego marítimo. Em outros casos, o monitoramento de alvos não-naturais pode se referir à observação de plataformas de petróleo, alertando às autoridades ao menor sinal de vazamento para que se iniciem as ações de contingenciamento e redução dos impactos ambientais. Estruturas portuárias, como píer; quebra-mares; atracadouros; além de traços de ocupação costeira, são outros exemplos de alvos que podem ser monitorados por meio desta tecnologia.

Durante quase vinte anos de pesquisas científicas sobre detecção de navios, foram desenvolvidas diversas técnicas de limiarização, isto é, baseadas em encontrar valores que delimitem o escopo de intensidades de pixels referentes ao retroespalhamento oceânico dos pixels referentes aos alvos (navios). Encontram-se metodologias que partem da simplicidade de um valor limiar global (ou *threshold* global), o qual se aplica a toda imagem ignorando flutuações locais devido à agitação do mar, aos sofisticados métodos de limiares adaptativos. Entre estes últimos, estão aqueles baseados na eficiência da Taxa Constante de Falso Alarme – CFAR (do inglês, *Constant False Alarm Ratio*), sendo muito utilizado até os tempos presentes (CRISP, 2004; PAES, 2009; EL-DARYMLI et al., 2013; PAES; NUNZIATA; MIGLIACCIO, 2015).

A consciência situacional fornecida por um esquema de vigilância orbital é imprescindível ao controle sistemático do tráfego marítimo e também das demais atividades e recursos costeiros (VAN DEN BROEK et al., 2012). O ponto principal de uma vigilância satelital não está apenas relacionado à cobertura espacial de uma área, mas também ao tempo de revisita. Atualmente, a fusão de informações entre dados de radar de vigilância costeira, dados do Sistema de Informações Automáticas – AIS (do inglês, *Automatic Information System*), e imagens SAR orbitais são uma realidade das agências de monitoramento costeiro (ex.: *European Maritime Safety Agency – EMSA*) (YANG et al., 2013; MAZZARELLA; VESPE; SANTAMARIA, 2015).

No Brasil, o monitoramento aéreo das Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB) é uma atividade desenvolvida pela Força Aérea Brasileira (FAB) em apoio à Marinha do Brasil (MB). O objetivo é garantir a soberania nacional, além de cumprir tratados, leis, normas, etc., nacionais e internacionais relacionados à segurança da navegação marítima e aérea. Porém, esta vigilância refere-se a mais de 8000 km de costa e de uma área de aproximadamente 3,6 milhões km<sup>2</sup>, denominada de Amazônia Azul. Este fato demandaria uma quantidade de meios aeronavais incompatíveis com a realidade econômica nacional. Este contexto permite, entretanto, a proposição de uma metodologia de vigilância/monitoramento das AJB que considere o uso de satélites de sensoriamento remoto como parte deste sistema. Assim, o patrulhamento marítimo iniciaria do

espaço, isto é, observando extensas áreas (o macrocenário). Os meios aeronavais atuam em situações pontuais, perscrutando áreas menores (o microcenário) dada a consciência situacional provida pelo segmento orbital (PAES; LORENZZETTI; GHERARDI, 2007). O estudo feito por Costa et al. (2015) demonstra como o uso de imagens SAR orbitais pode melhorar o desempenho da vigilância marítima feita por aeronaves de patrulha da Força Aérea Brasileira, reduzindo o tempo de voo e aumentando o número de navios identificados dada a autonomia daqueles meios aéreos.

A recente criação do Centro de Operações Espaciais (COPE), ligado ao Comando da Aeronáutica e ao Ministério da Defesa, como também do Programa Estratégico de Sistemas Espaciais – PESE (BRASIL, 2012a), baseado na Estratégia Nacional de Defesa – END (BRASIL, 2008), além do Programa Nacional de Atividades Espaciais – PNAE (BRASIL, 2012b), reforçam a importância deste estudo sobre vigilância costeira e marítima. O PESE prevê a implementação de constelações de satélites de sensoriamento remoto, em particular, a constelação SAR denominada Lessônia. Face ao exposto, entre os variados aspectos a serem observados, escolheu-se o monitoramento de tráfego marítimo como um caso desafiador por caracterizar-se como um sistema de alvos não-cooperativos, isto é, são alvos inicialmente desconhecidos e que se encontram em constante movimento.

No presente estudo, os dados SAR *Hybrid-Pol* (HP) são emulados para explorar a detecção e a caracterização de alvos metálicos no mar dado seu comportamento de espalhamento polarimétrico. A emulação da arquitetura HP é feita a partir dos dados SAR *Full-Pol* (FP) reais para replicar a transmissão circularmente polarizada e a recepção coerente em uma base  $h - v$ . A arquitetura HP e seus parâmetros não são construídos como pseudo assinaturas FP, pois são interpretados como dados HP reais e a partir de tais parâmetros inferem-se propriedades de espalhamento de uma cena.

Deste modo, a fim de analisar a capacidade dos parâmetros HP em observar alvos metálicos na superfície do mar será investigada em função das condições ambientais e das características dos alvos. Para tanto, técnicas que usam

limiares globais e adaptativos (ex.: CFAR) foram implementados. A avaliação de desempenho é feita através de métricas como Figura-de-Mérito – FoM (do inglês, *Figure-of-Merit*) e também novas métricas que avaliam a sensibilidade dos parâmetros HP dadas as variações do fundo oceânico, assim como também a influência das características dos alvos para as detecções.

O conjunto de dados processados compreende imagens SAR FP Radarsat-2 e ALOS PALSAR, os quais foram utilizados para as emulações de dados SAR HP, sendo adquiridas em várias datas e em diferentes localidades, por exemplo, Mar Mediterrâneo e Golfo do México. Imagens SAR HP reais provenientes do satélite RISAT-1 foram adquiridas em dezembro de 2013 durante um experimento multipolarimétrico denominado Projeto Madiba, na costa sudoeste sul-africana. Durante tal experimento, imagens SAR *single-pol* e *dual-pol* do satélite Cosmo-Skymed e imagens SAR *dual-pol* do TerraSAR-X também foram obtidas a fim de comparar seus resultados aos obtidos com o SAR HP real. Variadas condições ambientais e geometrias de imageamento foram registradas para todos os dados adquiridos, por exemplo, ventos de superfície variando de 4 a 18 m/s em diversas direções e ângulos de incidência variando de 20° a 26°. Modelos de ondas globais e dados auxiliares de escaterômetros (Windsat e Quikscat), além de técnicas de estimação de ventos baseadas em imagens SAR, foram usados para inferir o estado do mar.

Os resultados experimentais demonstram que os parâmetros HP são capazes de distinguir facilmente alvos do fundo oceânico apenas com *thresholds* globais. Casos particulares demandam uso de algoritmos adaptativos como o bem conhecido CFAR a fim de melhorar os resultados. Métricas objetivas para avaliar a influência relativa ao estado do mar sobre os diversos parâmetros polarimétricos e imagens intensidade são apresentados. O uso combinado desses parâmetros HP selecionados e analisados segundo critérios baseados na Análise de Principais Componentes – PCA (do inglês, *Principal Components Analysis*) apresentam um modo de caracterizar alvos metálicos.

## 1.1. Hipótese

A arquitetura HP, uma das arquiteturas do modo CP, apresenta-se como uma possível solução tanto para a escassez de informações dos modos *single-pol*, como para limitação de cobertura espacial do modo *full-polarimétrico*. Portanto, nesta pesquisa, verificar-se-á a hipótese:

*Os parâmetros polarimétricos HP são capazes de caracterizar e diferenciar alvos metálicos e oceano, minimizando redundâncias sob variadas condições ambientais e facilitando a detecção destes alvos.*

## 1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar as potencialidades e as limitações da arquitetura HP para a detecção e a caracterização de alvos metálicos na superfície do mar.

A fim de atingir o objetivo geral este trabalho tem como objetivos específicos:

- a) *Implementar técnicas de emulações* para construir a arquitetura HP a partir de dados SAR FP;
- b) *Desenvolver uma métrica* que seja capaz de indicar objetivamente o estado de agitação oceânica em quaisquer tipos de imagens;
- c) *Fazer uso de métricas objetivas que indiquem a performance* de um algoritmo detector e que considere a influência do *clutter* oceânico sobre os resultados;
- d) *Selecionar e analisar os parâmetros HP* que melhor permitam a caracterização de alvos metálicos.

### **1.3. Organização do trabalho**

Esta tese está organizada do modo descrito a seguir. O Capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica para evidenciar o estado-da-arte em detecção de alvos metálicos na superfície do mar; o modelo polarimétrico, isto é, os conceitos em polarimetria utilizados no presente trabalho; e os parâmetros HP derivados dos dados SAR FP. No Capítulo III, os dados SAR são descritos; a sequência de procedimentos; e as técnicas de detecção, suas métricas de desempenho e também a métrica de avaliação da sensibilidade dos parâmetros HP à variabilidade da agitação oceânica são apresentados. O Capítulo IV apresenta os resultados e as discussões e, por fim, no Capítulo V encontram-se as conclusões.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Estado-da-arte

Estudos recentes ainda exploram imagens *single-pol*, aplicando técnicas CFAR. De modo geral, e atualmente, as aplicações referem-se a imagens SAR de alta resolução e a técnicas e estimativas estatísticas mais precisas. Uma técnica CFAR simples é apresentada por (WANG et al., 2014b), os quais exploram o potencial do modo Radarsat-2 Scansar Wide para monitorar amplas áreas marítimas. No entanto, melhores resultados com imagens SAR *single-pol* demandam maior complexidade dos algoritmos e da estimação das estatísticas locais. Zhao et al.(2013) propõem um algoritmo CFAR baseado na estimação de parâmetros estatísticos da distribuição K de modo ainda mais localizado do que nas generalizações feitas em muitos outros trabalhos. Os autores consideram inclusive a alternância de técnica CFAR quando se defrontam regiões homogêneas (ex.: *Cell Average-CFAR* / CA-CFAR) e heterogêneas (ex.: *Order Statistics-CFAR* / OS-CFAR). Wang et al. (2014a) e Tian; Wang; Zhang (2015) desenvolveram técnicas CFAR baseadas na estimação de parâmetros a partir dos *clusters* de alvos (ex.: *kernel density estimation* – KDE). Deste modo, propuseram-se técnicas para o realce do contraste navio-mar, gerando uma nova estatística que evitaria o surgimento de artefatos erroneamente detectáveis pelo CFAR. Também seria possível extrair parâmetros que caracterizem os navios com base na KDE (ex.: razão de aspecto e número de pixels por cluster de alvo).

Apesar da sofisticação da limiarização adaptativa, processar apenas um canal de intensidade é algo limitante (ex., somente imagens HH ou VV). Afinal, algoritmos baseados em *thresholding* analisam a imagem pixel a pixel, considerando suas similaridades em relação a uma distribuição estatística, isto é, ignoram as relações de vizinhança (ex., entropia, correlação espacial, etc), dimensões e formas do agrupamento de pixels (ou *clusters*), entre outros. Estes fatores de contorno tornam ainda mais complexa a tarefa de detectar alvos na superfície do mar através de imagens SAR. Ainda fazendo uso do CFAR, porém seguindo para uma linha que busca informações

complementares, estão estudos que realizam comparações iterativas entre supostos pixels de alvos com suas vizinhanças, isto é, um processo de otimização que analisa a distribuição estatística local, organiza os pixels do cluster sob investigação e determina o que seria navio e o que seria mar (AN; XIE; YUAN, 2014). CFAR bilateral e CFAR multicamada são exemplos de estudos recentes feitos por (LENG et al., 2015) e (HOU; CHEN; JIAO, 2015), respectivamente. Ambos os casos consideram a importância de explorar não apenas os valores de intensidade dos pixels, mas também as características espaciais as quais referem-se ao modo como tais pixels de alvos estão dispostos na cena SAR e sobre como inter-relacionam-se. Outro exemplo de sofisticação quanto ao uso do CFAR está relacionado ao uso de imagens SAR interferométricas, seja explorando a imagem do coeficiente de correlação (CHEN; YANG; REN, 2013), seja combinando a magnitude do interferograma do mar com a fase para a detecção *along-track* (GAO; WANG; LAI, 2015a, 2015b).

Técnicas baseadas em reconhecimento de padrões também são encontradas na literatura, onde as relações entre pixels e seus posicionamentos na imagem são considerados no processamento (MARQUES; MEDEIROS; USHIZIMA, 2009; OUCHI; HWANG, 2010); Métodos que contemplem a estimação precisa das estatísticas locais fornecem resultados mais precisos, principalmente em áreas não-homogêneas (CUI et al., 2013); A extração de atributos por meio de segmentação dos alvos permite a redução do efeito Doppler e das ambiguidades em azimute (JI et al., 2013); A relação física entre as componentes coerente e a incoerente retroespalhadas medidas através da razão denominada Rice Factor é explorada em Migliaccio et al. (2012) para detecção de pequenos objetos metálicos na superfície do mar. Árvores de Decisão (AD), as quais possuem habilidade para separar agrupamentos de pixels através de discriminantes lineares (PAES; PAGAMISSE, 2011)(YU; WANG; ZHANG, 2009; PAES; MEDEIROS, 2012); Redes Neurais Artificiais (RNA), em virtude de sua variada arquitetura, diferentes atributos e arquiteturas podem ser combinados, visando a detecção ou a classificação de padrões (YU; WANG; ZHANG, 2009; PAES; MEDEIROS, 2012); Sistemas Imunológicos

Artificiais (SIA), cujas arquiteturas flexíveis favorecem à construção de estratégias para reconhecer padrões específicos, adaptando-se às novas entradas de dados e suas variações (MA; SHANG, 2006; YANG et al., 2009, 2011; FENG et al., 2011); entre outras abordagens dentro da área de Inteligência Computacional (IC), como Algoritmos Genéticos (AG) e Otimização baseada em Computação Natural, técnicas que permitem o refinamento das buscas por padrões específicos, especialmente, em meio aos ruídos (HOWARD; SIMON; BRANKIN, 1999; LI; WANG, 2012; AMOON; BOZORGI; REZAI-RAD, 2013).

Todavia, as limitações de tais abordagens são basicamente: a dependência das estatísticas locais, as quais nem sempre proporcionam a melhor caracterização de um padrão, ocorrendo principalmente quando o mar atinge estados elevados de agitação; outra dependência é a necessidade de estimativas precisas, pois afetam o resultado final independentemente da técnica usada; e também, a necessidade de haver fontes de dados (descritores) relevantes, isto é, não é sempre que apenas os valores da Seção Reta Radar Normalizada – NRCS (do inglês, *Normalized Radar Cross Section*), ou quaisquer estatísticas diretamente derivadas dela, descreverão um padrão. Outro fator que deve ser analisado é a prevalência da influência do estado do mar sobre os aspectos do sensor imageador, isto é, seja qual for o sensor e seu modo de imageamento haverá tal influência e compreendê-la pode proporcionar uma nova contribuição para as tarefas de detecção de alvos (LORENZZETTI; PAES; GHERARDI, 2010).

Mesmo em trabalhos mais recentes, ainda não houve abordagens que trouxessem luz aos desafios citados acima. Potenciais contribuições científicas apontam para: a análise da eficiência dos algoritmos em função das características ambientais oceânicas; sob quais fenômenos ambientais foram aplicados; e como os alvos podem ser diferenciados por características físicas na presença de certos fenômenos oceânicos. Todavia, imagens SAR do tipo *single-pol* são limitadas para caracterizar diferentes tipos de alvos em quaisquer estados de mar. Como forma de suprir tal demanda, o uso de

imagens SAR polarimétricas apresenta vantagens em termos de complementariedade de informações sobre o meio ou sobre os alvos metálicos.

Abordagens polarimétricas têm sido propostas com o objetivo de tirarem a devida vantagem da natureza vetorial do campo espalhado. Em (ZHAOYING; JINSONG, 2004), abordagens polarimétricas baseadas em imagens e em modelos físicos tem sido desenvolvidas. Liu; Vachon; Geling (2005) propõem um algoritmo para a detecção de navios através da polarimetria, o qual é baseado no critério de Neyman-Pearson. Em Velotto; Soccorsi; Lehner (2014), propõe-se um método para resolver as ambiguidades em azimute para a tarefa usando imagens SAR na banda X. Jeremy et al. (2001) analisam a relação alvo-ruído em diferentes canais polarimétricos, mostrando a importância do ângulo de incidência. Em Touzi; Charbonneau (2002), a decomposição de alvos coerentes (*coherent target decomposition*) é aplicada para fins de detecção de alvos. Um estudo sobre multipolarização é feito por Ferrara et al. (2011) para definir um método efetivo de detecção de alvos no mar. Em Novak; Sechtin; Cardullo (1989), propõem-se um detector polarimétrico linear que maximiza o contraste entre alvo e mar, por exemplo, o filtro casado polarimétrico. Em Marino; Cloude; Woodhouse (2010), um filtro de Notch é desenvolvido, o qual permite detectar características do *background* oceânico que são polarimetricamente diferentes. Migliaccio et al. (2011); Nunziata; Migliaccio; Brown (2012); Velotto et al. (2013a, 2013b) apresentam um detector polarimétrico, o qual explora diferentes propriedades de simetrias resultantes entre alvos e o *clutter* oceânico, sendo desenvolvido e aplicado em dados SAR nas bandas L, C, e X.

Imagens SAR FP do Radarsat-2 foram usadas para a detecção de navios foi realizada ao explorar-se a fase relativa entre dois canais de polarização cruzada. A fase relativa ao oceano e aos ruídos está concentrada em zero e os valores de ângulo para os alvos são de  $\pm\pi$ , tornando-se portanto um parâmetro para a detecção de alvos (WANG et al., 2015). Imagens de um sensor SAR aerotransportado, nas bandas C e L, são utilizadas para detectar navios através da combinação entre o classificador não-supervisionado de Wishart com a imagem intensidade total (SPAN) (WEI et al., 2014). Para fins de

detecção de alvos no mar, Touzi; Hurley; Vachon (2015) demonstram a eficiência dos parâmetros denominados grau de polarização e intensidade total espalhada para descrever o comportamento complementar do espalhamento entre mar e navio, conforme suas assinaturas polarimétricas. Lang et al. (2014) também exploram a complementariedade dos parâmetros polarimétricos. Porém, extraem descritores baseados em textura para caracterizar e categorizar os alvos metálicos.

No entanto, sistemas SAR *full*-polarimétricos (FP) tem um alto custo em termos de potência média transmitida, apresentam metade da largura de faixa imageada e um escopo limitado de ângulos de incidência aceitáveis para a formação da imagem, em relação a um sistema SAR de simples (*single-pol.*) ou de dupla (*dual-pol.*) polarização. Tudo isto faz com que o SAR FP não seja um sistema ótimo em termos de cobertura espacial e temporal. Tais limitações são conceitualmente solucionadas através das arquiteturas de Polarimetria Compacta – CP (do inglês, *Compact Polarimetry*). Elas proveem um desempenho polarimétrico próximo àqueles relacionados aos SAR FP, enquanto evitam suas principais limitações, destacando-se a curta cobertura espacial.

A ideia principal de uma arquitetura CP é transmitir apenas uma única polarização enquanto recebe coerentemente, conforme uma base de polarização ortogonal. Três arquiteturas CP têm sido propostas na literatura: a arquitetura  $\pi/4$  (ou linear); a arquitetura Circular-Circular - CC; e a arquitetura Polaridade Híbrida – HP (do inglês, *Hybrid-Polarity*). A primeira consiste na transmissão de um sinal linearmente polarizado, por exemplo, em ângulo de  $45^\circ$  em relação à polarização  $h$  ou  $v$ , enquanto recebe coerentemente conforme a base linear  $h - v$ . O principal problema desta arquitetura recai sobre o fato da transmissão de um campo inclinado não garantir invariância à orientação para respostas do tipo rebatimento duplo (*double bounce*). A fim de contornar este problema, a arquitetura CC seria uma opção, pois a transmissão seria circular e a recepção de forma coerente em uma base dual polarizada circularmente. Entretanto, esta arquitetura não é de simples implementação na prática. Uma alternativa interessante é a arquitetura HP, que consiste na transmissão de um

campo circularmente polarizado enquanto recebe coerentemente em uma base linear  $h - v$  (RANEY, 2011).

A ideia subjacente a estas arquiteturas está baseada no fato de que os princípios fundamentais de polarimetria óptica estabelecem que a matriz de covariância não depende da base de polarização que chega ao receptor. Assim, para uma dada iluminação polarizada, a mesma matriz de covariância será obtida usando medidas coletadas tanto por uma base coerente linear quanto por uma circular. De fato, a arquitetura HP possui todas as vantagens da transmissão circular como na CC, mas lida com uma implementação em *hardware* bem mais simples. Além disto, é uma arquitetura também caracterizada por vantagens específicas que incluem autocalibração, níveis comparáveis de sinais nos canais de recepção, efeitos limitados de ambiguidades, impacto reduzido de efeito Faraday, etc. (RANEY, 2006, 2011; SOUYRIS et al., 2007; RANEY et al., 2011, 2012; SHIRVANY; CHABERT; TOURNERET, 2012; ATTEIA; COLLINS, 2013). Todas as arquiteturas CP compartilham de um limite em comum: elas são caracterizadas por respostas polarimétricas que tendem a ser similares às respostas FP. Um SAR FP permite obter uma matriz de covariância de 4 x 4 elementos que descrevem completamente as propriedades de espalhamento de uma cena observada. Um SAR CP tem acesso a apenas uma matriz de espalhamento de 2 x 2 do campo retroespalhado. Apenas em casos específicos, por exemplo, quando algumas assunções no espalhamento da cena podem ser feitas, a informação FP poderia ser reconstruída a partir de dados SAR CP (RANEY, 2011; COLLINS et al., 2015).

Entre os recentes estudos sobre SAR CP, é possível evidenciar aqueles que utilizam a emulação de imagens SAR CP a partir de dados SAR FP, ou aqueles que utilizam dados de sensores aerotransportados, pois fizeram as primeiras experimentações enquanto se aguardava o lançamento das novas gerações de satélites com os modos CP ditos reais (ex.: RISAT-1 com um modo HP e ALOS-2 com um modo HP e um modo linear). A detecção de navios é abordada em Yin; Yang; Zhang (2011); Li et al. (2013); Paes et al. (2014); Paes; Nunziata; Migliaccio (2014); e Yin et al. (2015), nos quais as informações

de fase para determinar o tipo de *bouncing*; os tipos de espalhamentos; e o desempenho de diferentes arquiteturas são considerados.

A potencialidade dos parâmetros HP/CP são investigados em Shirvany; Chabert; Tourneret (2012, 2013); e Paes; Nunziata; Migliaccio (2015), cuja finalidade é a observação de alvos no mar, especificamente detecção de navios e óleo. Eles fazem uso de dados SAR HP emulados sobre dados SAR FP nas bandas L e C, comparando seus desempenhos com dados SAR lineares *dual-pol* tradicionais. O parâmetro polarimétrico investigado é o grau de polarização ( $\rho$ ) e resultados experimentais mostram seu melhor desempenho, quando confrontado aos *dual-pol*, por exemplo, com os canais HH-HV e VV-VH. Em Li et al. (2013), o parâmetro HP denominado delta ( $\delta_{hv}$ ) refere-se à diferença de fase entre as componentes  $h - v$ .  $\delta_{hv}$  é utilizado para observar turbinas de vento no mar para geração de energia eólica, assim como seu *clutter* oceânico (incluindo suas esteiras de turbulência) dentro de um escopo de ângulos de incidência e de estados de mar. Apesar da detecção de alvos metálicos ser foco do presente trabalho, ressalta-se que outras aplicações costeiras e oceânicas podem ser exploradas com técnicas CP, por exemplo, manchas de óleo (MIGLIACCIO; NUNZIATA; BUONO, 2015; PAES et al., 2015b); diversos aspectos do gelo marítimo ártico e antártico (PAES et al., 2015a); e ocupação costeira.

Por fim, o satélite RISAT-1, lançado em 2012, é o primeiro a possuir o novo modo *dual-pol*, isto é, o modo de imageamento HP real, ainda que experimental (MISRA; KIRANKUMAR, 2014). Resultados de pesquisas ainda mais recentes com tais dados HP reais tem confirmado as expectativas das emulações. Variadas aplicações encontradas na literatura ratificam esta nova e promissora tecnologia: Detecção de alvos no mar (PAES et al., 2015c); detecção de manchas de óleo (KUMAR; KISHORE; RAO, 2013); classificação de vegetação e de uso do solo (DE; KUMAR; RAO, 2014); entre outras.

## 2.2. Polarimetria

Polarimetria lida com a natureza vetorial de ondas eletromagnéticas polarizadas através de um espectro de frequências acima da faixa do

ultravioleta. O campo eletromagnético propaga-se na velocidade da luz e é formado por um vetor campo elétrico e um vetor campo magnético transversais entre si. Neste campo, poderão ocorrer mudanças abruptas ou graduais no estado de polarização da onda, fazendo com a que onda seja repolarizada. Quando a onda atinge um objeto e é refletida, informações importantes sobre tal elemento refletor podem ser obtidas através da análise da natureza desta onda refletida. O direção da polarização é definida pela direção do vetor campo elétrico (BOERNER et al., 1998).

Polarimetria radar é um termo que consiste na verificação de propriedades polarimétricas (comportamento da direção do campo elétrico) de ondas transmitidas por radares e na extração de propriedades dos alvos a partir das ondas retroespalhadas (refletidas) por eles. Em relação à tecnologia SAR, o termo utilizado é POLSAR (do inglês, *POLarimetric SAR*). A onda refletida por um alvo em direção ao receptor pode ser descrita adotando-se a convenção do alinhamento ao retroespalhamento (BSA, do inglês, *Back Scatter Alignment*) por se tratar de sistemas monostáticos. A onda incidente ( $E^i$ ) e a refletida ( $E^s$ ) podem ser dadas por vetores de duas componentes e a relação entre elas será uma matriz 2 x 2. Se o campo espalhado é expresso em coordenadas  $xyz$ , então os campos estarão relacionados pela matriz de Sinclair, a qual expressa as propriedades de um alvo coerente capaz de transformar a polarização da onda, e é dada por:

$$\begin{bmatrix} E_{x2}^s \\ E_{y2}^s \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{4\pi r}} \begin{bmatrix} S_{x1x2} & S_{x1y2} \\ S_{y1x2} & S_{y1y2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x1}^i \\ E_{y1}^i \end{bmatrix} e^{-jkr} \quad (2.1)$$

onde o índice  $s$  significa o campo espalhado e o índice  $i$ , o campo incidente.  $S$  é a matriz de espalhamento medida conforme as coordenadas  $xyz$ , ou seja, por exemplo,  $S_{x1x2}$ , mensura a energia transmitida no sentido  $x_1$  e recebida no mesmo sentido.  $S_{x1y2}$ , por sua vez, significa a medida da energia transmitida no sentido de  $x_1$  e retornada no sentido do eixo  $y_2$ . Uma vez que se compreenda que os índices 1 e 2 referem-se ao sentido de propagação e de retroespalhamento da onda e não necessariamente aos sentidos de polarização, ambos os índices podem ser suprimidos, por exemplo,  $S_{xx}$  ou  $S_{xy}$ .

O termo  $e^{-jkr}$  refere-se aos efeitos de propagação tanto em amplitude como em fase (BOERNER et al., 1998). A matriz de espalhamento pode caracterizar o processo de espalhamento produzido por um alvo, e o próprio alvo por sua vez. Isto é possível quando ambas as ondas, incidente e retroespalhada, são completamente polarizadas. Como consequência, alvos coerentes (alvos pontuais) devem ser estudados por meio de decomposições coerentes. O objetivo das decomposições coerentes é expressar a matriz de espalhamento  $S$  medida como uma combinação de bases de matrizes correspondentes a mecanismos de espalhamento canônicos (LEE; POTTIER, 2009).

Entretanto, em uma situação real, a matriz de espalhamento medida pelo radar corresponde a alvos coerentes complexos, sendo que em poucas situações objetos mais simples (ex.: refletores de canto) são satisfatoriamente representados por esta matriz. Em análise geral, um modo qualitativo de diferenciar alvos canônicos (ou puros) de alvos distribuídos é considerar suas naturezas físicas, isto é, se são naturais ou se são feitos pelo homem, pois uma célula de resolução pode ser composta por vários elementos espalhadores. A decomposição de Pauli, ou as bases de Pauli, visa expressar a matriz de espalhamento em termos mais simples quanto possíveis. Esta decomposição considera a base linear ortogonal  $(\mathbf{h}, \mathbf{v})$  e pode assumir o princípio da reciprocidade no caso de sistemas monostáticos. A combinação das matrizes de Pauli, as quais formam uma base para o espaço de matrizes de ordem 2, com a matriz de espalhamento  $S$  permite a interpretação de espalhamentos de elementos esféricos, planos, diédricos, triédricos, além dos mecanismos de espalhamento como reflexões (*bouncing*) simples (*single*), em pares (*even*), ou em quantidades ímpares (*odd*). Mas, mesmo em casos reais, alvos não-naturais podem apresentar características de espalhadores distribuídos. Assim, como exemplo, há alternativamente a decomposição de Krogager, a qual considera a combinação de respostas de espalhadores esféricos, diédricos e helicoidais. Outro exemplo de decomposição seria aquela de Cameron, a qual visa dividir a matriz de espalhamento medida em duas propriedades básicas: reciprocidade e simetria. A análise destas propriedades

permite que se observe alvos canônicos, como: triedros; diedros; dipolos; cilindros; etc (LEE; POTTIER, 2009).

No entanto, alvos são caracterizados a partir da matriz de espalhamento, ou também chamados, espalhadores puros. Em uma cena real, espalhadores distribuídos predominam e podem ser caracterizados apenas estatisticamente devido a presença do ruído *speckle*. A fim de reduzir os efeitos deste ruído, apenas representações polarimétricas de segunda ordem podem ser utilizadas. Estas representações são matrizes Hermitianas de 3x3 e referem-se às matrizes de covariância e de coerência, esta última também é chamada de matriz de polarização. Estas duas matrizes portam informações polarimétricas equivalentes e também podem ser empregadas para análise do sinal do ponto de vista da polarimetria de onda, conceito importante para a emulação de imagens SAR CP a partir de dados SAR FP. Devido à alta complexidade dos processos de espalhamento, interpretar fisicamente as respostas dos elementos espalhadores de uma cena é muito difícil por meio de uma análise direta das matrizes de coerência e de covariância. Assim, diferentes decomposições incoerentes estão disponíveis na literatura, por exemplo, a decomposição de Freeman, de Huynen, de Autovalores e Autovetores, entre outras (LEE; POTTIER, 2009).

Ainda para representar o sinal retroespalhado em uma cena, considerando o caso monostático e o sentido BSA, tem-se a representação em termos de potência a qual permite avaliar os mesmos eventos físicos citados anteriormente em diferentes modos. As representações dos dados em termos de potência para descrever o retroespalhamento são muito mais vantajosas porque são capazes de eliminar a fase absoluta dos alvos. Isto significa que a potência relacionada aos parâmetros incoerentes se torna aditiva. Introduce-se, então, a matriz de Kennaugh que é uma transformação linear do vetor de Stokes (capaz de caracterizar o estado de polarização da onda), isto é, ao associar-se à matriz de espalhamento, os elementos da matriz de Kennaugh são capazes de descrever o espalhamento polarimétrico em termos de potência do sinal (SCHMITT; WENDLEDER; HINZ, 2015). A formulação geral é dada por

$$K = \begin{bmatrix} k_0 & k_4 & k_5 & k_6 \\ k_4 & k_1 & k_9 & k_8 \\ k_5 & k_9 & k_2 & k_7 \\ k_6 & k_8 & k_7 & k_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

onde  $k_i$ ,  $i = 0,1,2,3,\dots,n$ , são os elementos de Kennough e podem ser calculados do seguinte modo para dados quad-pol

$$\begin{aligned} k_0 &= \frac{1}{2} \{|S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{VV}|^2\} \\ k_1 &= \frac{1}{2} \{|S_{HH}|^2 - |S_{HV}|^2 - |S_{VH}|^2 + |S_{VV}|^2\} \\ k_2 &= \frac{1}{2} (|S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2) + \Re\{S_{HH}S_{VV}^*\} \\ k_3 &= \frac{1}{2} (|S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2) - \Re\{S_{HH}S_{VV}^*\} \\ k_4 &= \frac{1}{2} \{|S_{HH}|^2 - |S_{VV}|^2\} \\ k_5 &= \frac{1}{2} \Re\{S_{HH}S_x^* + S_xS_{VV}^*\} \\ k_6 &= \frac{1}{2} \Im\{S_{HH}S_x^* + S_xS_{VV}^*\} \\ k_7 &= \frac{1}{2} \Im\{S_{HH}S_{VV}^*\} \\ k_8 &= \frac{1}{2} \Im\{S_{HH}S_x^* - S_xS_{VV}^*\} \\ k_9 &= \frac{1}{2} \Re\{S_{HH}S_x^* - S_xS_{VV}^*\} \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde  $S_x = S_{HV} + S_{VH}$ , e  $\Re\{\cdot\}$  e  $\Im\{\cdot\}$  são as partes reais e imaginárias dos elementos ali contidos, respectivamente. Os operadores  $(\cdot)^*$  e  $|\cdot|$  representam o conjugado complexo e o módulo, respectivamente. A interpretação destes elementos não é trivial. Uma interpretação comum é aquela baseada na decomposição de Huynen, onde os elementos são divididos basicamente em três grupos e em três sistemas de coordenadas. Os sistemas de coordenadas são orientados paralelos aos eixos lineares, verticalmente e horizontalmente,  $(k_1, k_4, k_7)$ ; diagonalmente aos eixos lineares,  $45^\circ$  e  $135^\circ$ ,  $(k_2, k_5, k_8)$ ; e circularmente com rotações à direita e à esquerda  $(k_3, k_6, k_9)$ . Em relação aos efeitos do espalhamento, tem-se no primeiro grupo, elementos de absorção  $(k_1, k_2, k_3)$  que descrevem a perda de polarização durante os processos de espalhamento. O segundo grupo consiste dos elementos  $k_4, k_5, k_6$  que modificam a relação entre dois valores de amplitude durante a reflexão, isto é,

elementos relacionados à mudança de polarização. O terceiro grupo une os elementos de retardo  $k_7, k_8, k_9$ , os quais descrevem o atraso da fase durante o espalhamento nas respectivas direções (SCHMITT; WENDLEDER; HINZ, 2015).

O conhecimento destes conceitos até aqui apresentados são importantes para entender o processo de emulação. A emulação, do ponto de vista computacional, pode ser entendida como uma ação capaz de proporcionar que algo (um programa) tenha um resultado igual ou superior a outro<sup>1</sup>. Assim, para emular as respostas polarimétricas de imagens *compact-pol/ hybrid-pol*, a partir de dados *full-polarimétricos* tem-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned} S_{RV} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{2} (S_{HV} + S_{VH}) - iS_{VV} \right) \\ S_{RH} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( S_{HH} - \frac{i}{2} (S_{HV} + S_{VH}) \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

e o equivalentes elementos de Kennaugh são dados por

$$\begin{aligned} k_0 &= |S_{RH}|^2 + |S_{RV}|^2 \\ k_3 &= -\Im\{S_{RH}S_{RV}^*\} \\ k_5 &= \Re\{S_{RH}S_{RV}^*\} \\ k_8 &= |S_{RV}|^2 - |S_{RH}|^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

onde  $k_0$  e  $k_8$  são os elementos de intensidade;  $k_3$  e  $k_5$  referem-se à correlação inter canal;  $k_0$  também reflete a intensidade total refletida.

Neste ponto, as principais considerações sobre as medidas do espalhamento de uma cena real foram expostas, isto é, citaram-se características de espalhadores coerentes e incoerentes bem como diferentes decomposições, considerando também as matrizes de espalhamento (para espalhadores determinísticos coerentes) e a de Kennaugh (para analisar diversas interações a partir da potência do sinal retroespalhado). A seguir, apresentar-se-ão

---

<sup>1</sup> Dicio – Dicionário online da língua portuguesa.  
<http://www.dicio.com.br/emulacao/>

conceitos de polarimetria de onda, os quais se fazem necessários ao entendimento sobre como extrair parâmetros polarimétrico em modo Híbrido.

### **2.3. Conceitos de polarimetria de onda**

O estado de polarização de uma onda é usualmente dado pela evolução temporal do vetor campo elétrico. O ponto final deste vetor traça uma elipse no plano de polarização, sendo tal plano ortogonal ao sentido de propagação. Sinais ou ondas eletromagnéticas podem ser completamente polarizados ou despolarizados, sendo dois casos extremos, e ondas aleatórias reais possuem componentes de ambos estes estados, isto é, são parcialmente polarizados. A descrição apropriada das propriedades de polarização de um campo eletromagnético recai sobre o conceito da matriz de coerência a qual contém todas as informações mensuráveis sobre seu estado de polarização, incluindo a intensidade.

Um modo para caracterizar parcialmente sua polarização é medindo a intensidade relativa da componente polarizada do campo total (grau de polarização), ou seja, isto significará o quanto próximo de ser totalmente polarizado estará este campo. Alternativamente, outra abordagem seria a determinação de quanto este campo estaria despolarizado, isto é, sua entropia (LEE; POTTIER, 2009).

#### **2.3.1. Matriz de polarização**

As propriedades de polarização de um campo de ondas planas genérico são analisadas em termos de uma matriz de polarização através de seus parâmetros de Stokes equivalentes, isto é, são analisados conforme as correlações entre as componentes do campo e o estado de polarização. A seguir, serão descritos os casos de campo totalmente polarizado e despolarizado. Os conceitos de grau de polarização, entropia da onda e o coeficiente de correlação complexa serão introduzidos (MANDEL; WOLF, 1995).

Considere ondas planas que se propagam em uma direção  $z$  em um sistema de coordenadas ortogonais  $xyz$ , então, sua matriz de polarização será explicitamente definida por:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_{xx} & \Gamma_{xy} \\ \Gamma_{yx} & \Gamma_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle E_x^* E_x \rangle & \langle E_x^* E_y \rangle \\ \langle E_y^* E_x \rangle & \langle E_y^* E_y \rangle \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

onde, as variáveis aleatórias  $E_i$ , com  $i = (x, y)$ , representam as componentes do campo na frequência  $\omega$ , oscilando em um plano perpendicular à direção de propagação (eixo  $z$ ), e  $\langle \cdot \rangle$  representa a média temporal sobre cada elemento da matriz  $\Gamma$ .

Os elementos diagonais  $\Gamma_{kk}$  são as densidades espectrais ou, também chamadas de intensidades associadas à componente campo elétrico  $E_k$  na frequência  $\omega$ . O traço da matriz  $\Gamma$

$$tr(\Gamma) = \Gamma_{xx} + \Gamma_{yy} \quad (2.7)$$

é a densidade espectral total do campo. Os elementos fora da diagonal principal  $\Gamma_{xy}$  e  $\Gamma_{yx}$  são os conjugados complexos um do outro:

$$\Gamma_{xy} = \Gamma_{yx}^* \quad (2.8)$$

Assim, a matriz de polarização é Hermitiana (uma matriz quadrada com  $n$  entradas complexas cuja transposta de sua conjugada é igual à própria matriz) e contém quatro parâmetros reais independentes. Além disto, conforme demonstrado por Mandel e Wolf (1995), seu determinante é não-negativo.

$$\det(\Gamma) = \Gamma_{xx}\Gamma_{yy} - \Gamma_{xy}\Gamma_{yx} \geq 0 \quad (2.9)$$

Os elementos fora da diagonal principal representam a correlação prevalecente entre as componentes mutuamente ortogonais do campo elétrico, e podem ser normalizados como:

$$\mu_{xy} = |\mu_{xy}|e^{j\delta_{xy}} = \frac{\Gamma_{xy}}{\sqrt{\Gamma_{xx}\Gamma_{yy}}} \quad (2.10)$$

Considerando (2.8) e (2.9)

$$0 \leq |\mu_{xy}| \leq 1 \quad (2.11)$$

$\mu_{xy}$  passa a ser considerado para medir o grau de polarização entre as componentes  $x$  e  $y$  do campo elétrico (BORN; WOLF, 1980), sendo denominado de coeficiente de correlação complexa. A matriz de polarização pode ser definida em relação a um sistema de coordenadas arbitrário  $(x, y)$  no plano perpendicular à direção de propagação do campo. No caso de aplicações em imagens SAR cujas bases de transmissão e de recepção sejam lineares e ortogonais entre si, este parâmetro será indicado por  $\mu_{hv}$ . Em seguida, Mandel e Wolf (1995) demonstram que há invariância dos parâmetros da matriz em relação à rotação, por exemplo, o determinante e o traço são invariantes em relação a qualquer rotação do sistema de coordenadas em torno do sentido da propagação.

Da Equação 2.10, tem-se um outro importante parâmetro,  $\delta_{xy}$ , o qual se refere à diferença de fase entre as componentes ortogonais  $x - y$ , isto é, no caso da imagem SAR cuja antena possua polarizações lineares, corresponderá às componentes  $h - v$ . Este parâmetro também denominado por *delta* pode ser calculado por:

$$\delta_{xy} = \arctan\left(\frac{-\Im(\Gamma_{xy})}{\Re(\Gamma_{xy})}\right), \quad -180^\circ \leq \delta_{xy} \leq 180^\circ \quad (2.12)$$

onde  $\Im(\Gamma_{xy})$  é a parte imaginária e  $\Re(\Gamma_{xy})$  a parte real de  $\Gamma_{xy}$ .

### 2.3.2. Grau de polarização da onda

A matriz Hermitiana complexa de covariância da onda  $2 \times 2$  positiva e semidefinida  $[J]$ , também chamada de matriz de coerência de Jones é definida por:

$$J = \langle E \cdot E^{T*} \rangle = \begin{bmatrix} \langle E_x E_x^* \rangle & \langle E_x E_y^* \rangle \\ \langle E_y E_x^* \rangle & \langle E_y E_y^* \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle J_{xx} \rangle & \langle J_{xy} \rangle \\ \langle J_{xy}^* \rangle & \langle J_{yy} \rangle \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle g_0 \rangle + \langle g_1 \rangle & \langle g_2 \rangle - j \langle g_3 \rangle \\ \langle g_2 \rangle + j \langle g_3 \rangle & \langle g_0 \rangle - \langle g_1 \rangle \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

onde  $J = \langle E \cdot E^{T*} \rangle$  representa a média temporal, assumindo que a onda é estacionária, para aquele dado instante, ainda que o ambiente real seja dinamicamente modificado.

Sendo  $J$  uma matriz 2 x 2 Hermitiana complexa positiva e semidefinida, verifica-se que  $|J| \geq 0$  ou  $\langle g_0 \rangle^2 = \langle g_1 \rangle^2 + \langle g_2 \rangle^2 + \langle g_3 \rangle^2$ . Os elementos da diagonal da matriz de covariância da onda apresentam as intensidades, e aqueles fora da diagonal principal, apresenta a correlação complexa cruzada entre  $E_x$  e  $E_y$ ;  $Tr(J)$  representa a energia total da onda.

Para  $\langle J_{xy} \rangle = 0$ , não existe correlação entre  $E_x$  e  $E_y$ , e a matriz de covariância será diagonal. A onda correspondente será então despolarizada. Quando  $|J| = 0$ , tem-se  $\langle J_{xx} \rangle \langle J_{yy} \rangle = |\langle J_{xy} \rangle|^2$ , sendo que a correlação entre  $E_x$  e  $E_y$  será máxima. A onda correspondente será então completamente polarizada (MANDEL; WOLF, 1995; ELLIS; DOGARIU, 2005; GIL, 2007).

Entre estes dois casos extremos está o caso geral da polarização parcial, onde  $|J| > 0$  indica um certo grau de dependência estatística entre  $E_x$  e  $E_y$  que pode ser expresso em termos de grau de polarização da onda ( $p$ ), como:

$$p = \frac{\sqrt{\langle g_1 \rangle^2 + \langle g_2 \rangle^2 + \langle g_3 \rangle^2}}{\langle g_0 \rangle} = \sqrt{1 - \frac{4 \det(\Gamma)}{tr(\Gamma)^2}} \quad (2.14)$$

onde,

$p = 0$ , para ondas totalmente despolarizadas, e

$p = 1$ , para ondas totalmente polarizadas.

### 2.3.3. Entropia da onda

Como alternativa, a entropia da onda  $H_w$  pode ser usada para indicar o quão próximo de ser completamente aleatório está o campo elétrico. Os valores de  $H_w$  encontram-se no intervalo  $0 \leq H_w \leq 1$  (MANDEL; WOLF, 1995; ELLIS; DOGARIU, 2005; GIL, 2007), e  $H_w$  é dado por:

$$H_w = -tr(\hat{\Gamma} \log_2 \hat{\Gamma}) \quad (2.15)$$

onde  $\hat{\Gamma} = \Gamma / tr(\Gamma)$ .

A matriz de polarização (ou de coerência, como também é chamada) pode ser reescrita em uma forma completamente equivalente introduzindo um conjunto de três parâmetros que levam em conta o estado de polarização da onda espalhada: o ângulo de elipticidade  $\tau$  e o ângulo de orientação  $\phi$ , ambos os parâmetros geométricos que descrevem a parte totalmente polarizada da onda; e o grau de polarização  $p$ , o qual considera a intensidade da componente polarizada em uma onda parcialmente polarizada (GIL, 2007),

$$\Gamma = \frac{I}{2} \begin{pmatrix} 1 + p \cos 2\phi \cos 2\tau & p(\sin 2\phi \cos 2\tau - j \cos 2\tau) \\ p(\sin 2\phi \cos 2\tau + j \sin 2\tau) & 1 - p \cos \phi \cos \tau \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

onde  $I$  é a intensidade total. Nota-se que quando  $p = 0$ ,  $\Gamma$  é proporcional à matriz identidade e, assim,  $H_w = 1$  e  $|\mu_{hv}| = 0$ . Quando  $p = 1$ , obtém-se uma onda totalmente polarizada. O mesmo ocorre, por exemplo, quando se encontram valores de  $|\mu_{hv}| = 1$  e  $H_w = 0$ .

### 2.3.4. Polarimetria compacta

O uso de polarimetria compacta remonta a um histórico de mais de 40 anos, tendo como grandes usuários as comunidades de meteorologia por radar e de imageamento de planetas. Os primeiros conceitos de polarização compacta na literatura apareceram para o modo linear (ou também referido como  $\pi/4$ ). No entanto, o desempenho ainda estava aquém dos resultados esperados. A arquitetura Circular-Circular mostra-se muito útil, mas não em termos práticos

para aplicações de observação da Terra. A arquitetura HP, por sua vez, apresenta praticamente as mesmas características da CC, mas de implementação viável devido ao recebimento do sinal em base ortogonal. Estudos importantes realizados na área de exploração de planetas fazem uso da arquitetura HP onde se constata uma boa relação ciência-hardware em função de sua implementação prática (RANEY, 2011).

De acordo com o mencionado anteriormente, a ideia principal de uma arquitetura CP é transmitir apenas uma onda em única polarização (ou circular ou linearmente orientada a  $45^\circ$ ), enquanto recebe coerentemente em uma base de polarização ortogonal. Todas estas três arquiteturas compartilham três aspectos: (a) a informação contida no campo retroespalhado depende da escolha da polarização transmitida; (b) para que o campo retroespalhado seja completamente caracterizado é necessário haver a informação da fase relativa adicionalmente às medidas de intensidade dos retornos contidos nas componentes ortogonais; e (c) a caracterização do campo retroespalhado é independente dos vetores da base nos quais são feitas as medidas coerentes polarizadas. A seguir, se segue uma explicação sobre os princípios de cada uma das três arquiteturas CP encontradas na literatura: a arquitetura  $\pi/4$  (ou linear); a arquitetura Circular-Circular - CC; e a arquitetura Polaridade Híbrida – HP (RANEY, 2011).

#### **2.3.4.1. A arquitetura $\pi/4$ (Linear)**

A arquitetura  $\pi/4$  consiste na transmissão de uma onda linearmente polarizada orientada a  $\pm \pi/4$  ( $\pm 45^\circ$ ) em um plano  $h - v$ , enquanto recebe coerentemente em uma base ortogonal linear  $h - v$  também orientada a  $\pm \pi/4$  ( $\pm 45^\circ$ ). Neste trabalho, assume-se a polarização linear a  $+\pi/4$  como sendo o sentido da transmissão. O campo  $E = (E_h, E_v)$  recebido linearmente polarizado é emulado a partir da matriz de espalhamento  $S$  medida pela arquitetura SAR FP, isto é, considerando retroespalhamento e a convenção de alinhamento do retroespalhamento (BSA, do inglês, *Backward Scattering Alignment*), conforme (RANEY et al., 2011; CLOUDE; GOODENOUGH; CHEN, 2012) :

$$E_{xy} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{xx} + S_{xy} \\ S_{xy} + S_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

onde  $S_{pq}$  com  $p, q$  pertencentes a  $\{h, v\}$  representa a imagem amplitude e  $jS_{pq}$  representa a imagem complexa. Assim, os parâmetros são emulados de acordo com os conceitos de polarimetria de onda. Logo, procedimentos similares podem ser aplicados para definir parâmetros polarimétricos para as demais arquiteturas CP uma vez que a matriz de polarização (ou de coerência)  $\Gamma$  é construída a partir da matriz de espalhamento, como:

$$\begin{aligned} \Gamma_{xx} &= \frac{1}{2} (|S_{xx}|^2 + S_{xx}^* S_{xy} + S_{xy}^* S_{xx} + |S_{xy}|^2) \\ \Gamma_{xy} &= \frac{1}{2} (|S_{xy}|^2 + S_{xx}^* S_{xy} + S_{xx}^* S_{yy} + S_{xy}^* S_{yy}); \quad \Gamma_{yx} = \Gamma_{xy}^* \\ \Gamma_{yy} &= \frac{1}{2} (|S_{xy}|^2 + S_{xy}^* S_{yy} + S_{yy}^* S_{xy} + |S_{yy}|^2) \end{aligned} \quad (2.18)$$

#### 2.3.4.2. A arquitetura Circular-Circular (CC)

A arquitetura SAR CC consiste na transmissão de uma campo circularmente polarizado, enquanto recebe coerentemente em uma base ortogonal circular, isto é, transmite-se orientado à direita (RH, do inglês, *Right-Hand*) e recebe-se circularmente como RH e orientado à esquerda (LH do inglês, *Left-Hand*). Na antena SAR, o campo que chega circularmente polarizado,  $E = (E_{rhc}, E_{lhc})$ , é emulado seguindo o mesmo raciocínio da subseção anterior (RANEY, 2006), mas considerando a rotação do campo na base circular (LEE; POTTIER, 2009):

$$E_{xy} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_{xx} + S_{yy} \\ 2S_{xy} + j(S_{xx} - S_{yy}) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Então, a arquitetura CC é a mesma da HP, exceto pela representação da base de recepção, e seus parâmetros podem ser derivados do mesmo jeito que para HP. A relação entre os elementos de  $\Gamma$  and  $S$  são os seguintes:

$$\begin{aligned}
\Gamma_{xx} &= \frac{1}{4} (|S_{xx}|^2 + |S_{yy}|^2 - jS_{yy}^* S_{xx} + S_{xx}^* S_{yy}) \\
\Gamma_{xy} &= \frac{1}{4} (j|S_{xx}|^2 - j|S_{yy}|^2 + 2S_{xx}^* S_{xy} + 2S_{yy}^* S_{xy} + jS_{yy}^* S_{xy} - jS_{xx}^* S_{yy}); \Gamma_{yx} = \Gamma_{xy}^* \\
\Gamma_{yy} &= \frac{1}{4} (|S_{xy}|^2 + |S_{yy}|^2 - jS_{xy}^* S_{yy} + jS_{yy}^* S_{xy})
\end{aligned} \tag{2.20}$$

### 2.3.4.3. A arquitetura Polaridade Híbrida (HP)

A arquitetura SAR HP consiste na transmissão de uma onda circularmente polarizada e na recepção coerente em uma base linear ortogonal  $h - v$ . Neste estudo, assume-se a transmissão da onda com polarização no sentido circular à direita. O campo  $E = (E_h, E_v)$  recebido linearmente polarizado é, então, emulado a partir da matriz de espalhamento  $S$  medida pela arquitetura SAR FP, conforme (RANEY, 2006; RANEY et al., 2011, 2012; CLOUDE; GOODENOUGH; CHEN, 2012):

$$E_{xy} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{xx} - jS_{xy} \\ S_{xy} - jS_{yy} \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

onde  $S_{pq}$  com  $p, q$  pertencentes a  $\{h, v\}$  representa a imagem amplitude e  $jS_{pq}$  representa a imagem complexa. Então, os parâmetros HP podem ser emulados por meio de conceitos de polarimetria de ondas, como descrito anteriormente, construindo a matriz de coerência  $\Gamma$  a partir da matriz de espalhamento  $S$ :

$$\begin{aligned}
\Gamma_{xx} &= \frac{1}{2} (|S_{xx}|^2 + |S_{xy}|^2 - jS_{xy}^* S_{xx} - jS_{xx}^* S_{xy}) \\
\Gamma_{xy} &= \frac{1}{2} (S_{xy}^* S_{xx} + jS_{yy}^* S_{xx} - j|S_{xy}|^2 + S_{yy}^* S_{xy}); \Gamma_{yx} = \Gamma_{xy}^* \\
\Gamma_{yy} &= \frac{1}{2} (|S_{xy}|^2 + |S_{yy}|^2 - jS_{xy}^* S_{yy} + jS_{yy}^* S_{xy})
\end{aligned} \tag{2.22}$$

### 2.3.5. Razão de polarização circular

Conforme descrito anteriormente, sistemas SAR de polarização circular foram empregados para a observação de planetas e de asteroides com considerável sucesso (OSTRO, 1993; RANEY et al., 2011). Observou-se que a onda circularmente polarizada retorna no sentido contrário (no sentido anti-horário, considerando que a transmissão foi no sentido horário) quando atinge uma

superfície plana. Esta onda retorna com o mesmo sentido da onda transmitida quando há a presença de diversos elementos espalhadores na superfície conforme o comprimento de onda. Portanto, um modo para estimar a rugosidade de uma superfície iluminada por ondas circularmente polarizadas é o estabelecimento da razão

$$\mu_c = \frac{\sigma_{MS}}{\sigma_{SC}} \quad (2.23)$$

onde  $\mu_c$  é a razão de polarização circular;  $\sigma_{MS}$  e  $\sigma_{SC}$  são respectivamente as energias relativas à onda que retorna no mesmo sentido (MS) pelo o que retorna no sentido contrário (SC) (OSTRO, 1993). Quando se utilizam bases lineares tem-se

$$\mu_c = \frac{\sigma_{SC}}{\sigma_{MS}} \quad (2.24)$$

Nota-se que, para as imagens emuladas, a Equação 1.29 apresenta os resultados esperados pela teoria. Entretanto, para dados HP reais (ex.: imagens RISAT-1), a Equação 2.24 faz-se necessária.

No presente estudo,  $\mu_c$  é escrita em termos do vetor de Stokes, e de acordo com a Equação 2.19, será dado por

$$\mu_c = \frac{\Gamma_{yy} + \Gamma_{xx} - 2\Im(\Gamma_{xy})}{\Gamma_{yy} + \Gamma_{xx} + 2\Im(2\Gamma_{xy})} \quad (2.25)$$

onde  $\Im(\cdot)$  significa a parte imaginária. Para o uso dos dados SAR do satélite RISAT-1, o inverso da Equação 2.25 é aplicado. Nota-se ainda que, dada a intensidade deste grau de rugosidade,  $\mu_c$  pode ser também considerado como um estimador de aspectos volumétricos de uma cena por ser capaz de diferenciar a resposta para diferentes objetos naturais e não-naturais de formatos e orientações variadas. Valores de  $\mu_c > 1$  podem ser associados à presença de muitos elementos espalhadores como pode ser observado em Ostro (1993).

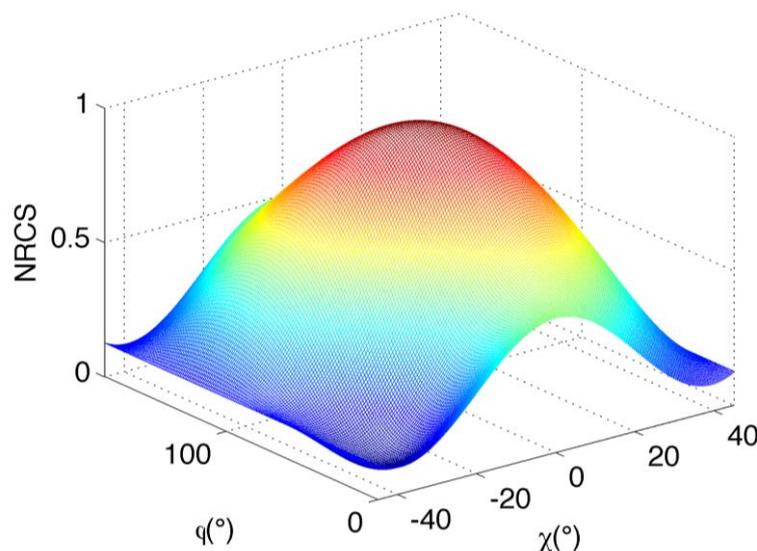
### 2.3.6. Comportamento esperado dos parâmetros polarimétricos

O conceito de resposta polarimétrica, isto é, a potência associada à onda retroespalhada em qualquer combinação de polarizações, pode ser aplicado para discutir as propriedades polarimétricas da onda parcialmente polarizada espalhada pelo mar, com ou sem alvos metálicos. Quando a mesma polarização é usada pela antena de transmissão/recepção, o gráfico da Figura 2.1 é obtido e chamado de resposta polarimétrica copolarizada (VAN ZYL; ZEBKER; ELACHI, 1987)

$$\sigma^0(\chi, \varphi) = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{k^2} s^T \langle K \rangle s \quad (2.26)$$

onde  $k$  é o número de ondas eletromagnéticas,  $s$  é o vetor de Stokes que descreve as propriedades de polarização,  $T$  refere-se à transposta,  $\langle K \rangle$  é representa a média na matriz de Kennaugh, a qual descreve o comportamento do espalhamento polarimétrico da cena;  $\chi$  e  $\varphi$  são respectivamente a elipticidade e o ângulo de orientação da fase (NUNZIATA; MIGLIACCIO; GAMBARDELLA, 2011). Neste estudo sobre o mar, utiliza-se a resposta polarimétrica copolarizada porque proporciona um maior retorno de energia retroespalhada em relação à resposta polarimétrica cruzada.

Figura 2.1 – Resposta polarimétrica de canais copolarizados para uma superfície marinha ligeiramente rugosa.



Resposta semelhante ao espalhamento de Bragg caracterizada por uma polarização vertical máxima ( $\chi = 0^\circ, \varphi = 90^\circ$ ) e por um ponto baixo para a polarização horizontal ( $\chi = 0^\circ, \varphi = 0^\circ, 180^\circ$ ).

Fonte: Adaptado de Paes, Nunziata e Migliaccio (2015).

Para prever o comportamento dos parâmetros HP quando o espalhamento da cena consiste no espalhamento causado pelo mar, com ou sem alvos metálicos, é necessário associar as matrizes de Kennaugh. Considerando a superfície do mar, a qual possui um mecanismo de espalhamento quasi-determinístico de reflexão simples, e sob condições de baixo vento, o mecanismo dominante é do espalhamento de Bragg. A abordagem proposta por Schuler; Lee; Hoppel (1993) é utilizada para prever a matriz de Kennaugh associada ao espalhamento de Bragg da cena. Contudo, para fins deste estudo, a superfície do mar é modelada como ligeiramente rugosa a qual a matriz de espalhamento é dada por

$$S = \begin{bmatrix} S_{xx} & 0 \\ 0 & S_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

onde  $x = S_{xx}/S_{yy}$ . Portanto, a matriz de Kennaugh relacionada é dada por

$$K = \begin{bmatrix} |x|^2 + 1 & |x|^2 - 1 & 0 & 0 \\ |x|^2 - 1 & |x|^2 + 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\Re(x) & 2\Im(x) \\ 0 & 0 & 2\Im(x) & -2\Re(x) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

onde  $\Re(x)$  significa a parte real. A resposta polarimétrica depende de  $x$ . Na Figura 2.3, seguindo o roteiro proposto por Van Zyl; Zebker; Elachi (1987), a resposta copolarizada associada com uma superfície ligeiramente rugosa é mostrada usando  $x = 0.5 + j0.5$ . Observa-se que uma resposta semelhante à de Bragg é obtida, caracterizando-se por uma polarização vertical máxima ( $\chi = 0^\circ, \varphi = 90^\circ$ ), um ponto baixo para a polarização horizontal ( $\chi = 0^\circ, \varphi = 0^\circ, 180^\circ$ ), e nenhuma despolarização. Além disto,

pode-se notar que a potência associada a uma iluminação no sentido RHC ( $\chi = -45^\circ$ ) é ínfima.

Importante notar que a resposta à uma iluminação no sentido RHC ( $\chi = -45^\circ$ ), a resposta no sentido LHC ( $\chi = 45^\circ$ ) será observada. Isto é uma propriedade geral que caracteriza os “espalhadores em reflexões da onda em números ímpares” (ou em *odd-bouncing*). Os fatos observados acima sugerem o comportamento para os seguintes parâmetros HP: 1) valores de  $p$  e  $\mu_{hv}$  próximos à unidade e  $H_w$ , próximos a 0, desde que o espalhamento de Bragg da cena tenha uma despolarização desprezível; e 2) valores de  $\delta_{hv}$  positivos e próximos a  $90^\circ$  devido à natureza de *single-bouncing* do espalhamento de Bragg, pois a transmissão considerada é no sentido RHC e a resposta, LHC.

Para analisar o comportamento de  $\mu_c$ , é necessário observar que a superfície do mar é uma cena natural distribuída e, então, satisfaz a propriedade da simetria de reflexão (NUNZIATA; MIGLIACCIO; BROWN, 2012). Em termos de espalhamento polarimétrico, isto implica que a correlação entre a amplitude do espalhamento copolarizada e *cross*-polarizada se reduz a:

$$\langle S_{hh}S_{hv}^* \rangle = \langle S_{hv}S_{vv}^* \rangle = 0 \quad (2.29)$$

Isto justifica teoricamente a presença de apenas oito elementos não-nulos na matriz de Kennaugh (Equação 2.28). Quando a Equação 2.29 se verifica,  $\mu_c$  resume-se a

$$\mu_c = \frac{\langle |S_{hh}|^2 \rangle + \langle |S_{vv}|^2 \rangle - 2\langle \Re(S_{hh}S_{vv}^*) \rangle}{\langle |S_{hh}|^2 \rangle + \langle |S_{vv}|^2 \rangle + 2\langle \Re(S_{hh}S_{vv}^*) \rangle} \quad (2.30)$$

Dado que o espalhamento do tipo reflexão simples da cena seja dado por  $\langle \Re(S_{hh}S_{vv}^*) \rangle > 0$ , então  $\mu_c < 1$ .

Na presença de alvos metálicos, a natureza precisa do mecanismo de espalhamento resultante não pode ser prevista dado que depende das estruturas que caracterizam tal alvo. Em geral, espera-se que um mecanismo

de espalhamento de uma superfície rugosa faça com que a resposta polarimétrica copolarizada recaia no pedestal, isto é, que a base do gráfico da Figura 2.3 aproxime-se de zero no eixo vertical que seria a parte inferior do gráfico. Isto significa que os elementos da medida de espalhamento (da matriz de Stokes ou de covariância) usados para gerar a assinatura não são idênticos. Quanto maior as diferenças entre as matrizes individuais, mais o resultado se aproxima do pedestal. Em imagens SAR, esta variação de propriedades de espalhamento pode resultar de pixels adjacentes que contenham diferentes tipos de espalhadores (ZEBKER; VANZYL, 1991).

Isto corresponde ao pedestal na assinatura copolarizada. A presença de uma grande quantidade de energia espalhada não polarizada faz com que: 1)  $|\mu_{hv}|$  e  $p$  tenham valores próximos a zero; 2)  $H_w$  próximo a um. Além disto, em resposta à iluminação no sentido RHC, ambas as ondas espalhadas LHC e RHC são esperadas. Neste caso, a implicação será que ambas apresentarão valores de  $\delta_{hv}$  tanto positivos quanto negativos. O sinal exato não pode ser estimado porque depende da forma da parte determinística da resposta copolarizada, que por sua vez, depende da predominância de estruturas de *single/double/multiple bouncing*. A Tabela 2.1 apresenta o resumo do escopo de valores esperados do sinal retroespalhado pelo mar para cada parâmetro polarimétrico.

Tabela 2.1 – Valores relativos ao comportamento esperado de cada parâmetro polarimétrico HP/CP.

Símbolo	Denominação	Escopo de valores	Valores esperados (mar)
$ \mu_{hv} $	Módulo do coeficiente de correlação complexa	$0 <  \mu_{hv}  < 1$	$ \mu_{hv}  \sim 1$
$\delta_{hv}$	Ângulo delta (diferença de fase entre as componentes h – v)	$-180^\circ < \delta_{hv} < 180^\circ$	$\delta_{hv} \sim 90^\circ$
$p$	Grau de polarização	$0 < p < 1$	$p \sim 1$
$H_w$	Entropia da onda	$0 < H_w < 1$	$H_w \sim 0$
$\mu_c$	Razão de polarização circular	$\mu_c > 0$	$\mu_c < 1$

A seguir, uma vez realizada a revisão bibliográfica, apontando o estado-da-arte, e consideradas as bases teóricas da polarimetria de onda necessárias ao entendimento da emulação das imagens SAR HP a partir de dados SAR FP, bem como para a devida interpretação dos parâmetros polarimétricos, apresentar-se-á de modo detalhado os dados e a metodologia utilizada nesta pesquisa.

### 3 MATERIAIS E METODOLOGIA

#### 3.1. Imagens SAR, dados complementares e verdades de campo

O conjunto de dados desta pesquisa consiste em nove imagens SAR SLC, das quais: seis imagens SAR são FP (quatro imagens na banda L / satélite ALOS PALSAR; quatro na banda C / Radarsat-2); uma imagem SAR HP real na banda C do satélite RISAT-1. As áreas imageadas são bastante variadas em termos de características de vento, de correntes, e de intensidade de tráfego marítimo, por exemplo, Golfo do México, Estreito de Gibraltar, Cabo da Boa Esperança, e Baía de Tóquio (Tabela 3.1). Para cada cena SAR, foram obtidos dados complementares de velocidade de vento de superfície e sua direção através dos escaterômetros Windsat, Quikscat e ERS-wind. A fonte utilizada é uma base de dados da NOAA (*STAR – Center for satellite application and research* - <http://manati.star.nesdis.noaa.gov/datasets/>). Adicionalmente, a intensidade do vento também foi estimada a partir de imagens Radarsat-2 e ALOS PALSAR utilizando os modelos CMOD5 (HERSBACH; STOFFELEN; DE HAAN, 2007) e seu correspondente adaptado para a banda L (ISOGUCHI; SHIMADA, 2009). A finalidade será explicada adiante em momento oportuno.

Em relação à confirmação da presença de navios, dados do Sistema Automático de Informações (AIS, do inglês, *Automatic Information System*) foram usados para confirmar a presença das embarcações, bem como para descrevê-las (ex.: provendo informações de comprimento, largura e tipo, entre outras) Apesar das tentativas de obter dados AIS em diversas fontes, as informações sobre os navios foram obtidas eficazmente no sítio *Marine Traffic* (<http://marinetraffic.com>). As imagens do Golfo do México apresentam uma grande concentração de plataformas de petróleo e de embarcações auxiliares devido ao reconhecido potencial daquela região para a atividade petrolífera. A verdade de campo para tais cenas podem ser obtidas através de um banco de dados abertos (<http://geocommons.com>). Entretanto, este site indica apenas onde estão os alvos, mas não como eles são. Para evitar essa limitação, como forma complementar, utilizou-se a ferramenta livre Google Earth para pesquisar

imagens ópticas daquela região e em datas próximas ao imageamento SAR, considerando que a maioria dos alvos não se move.

Outras duas cenas merecem destaque. A primeira refere-se à Baía de Tóquio, onde a verdade terrestre coletada sobre os alvos metálicos foi obtida através da coleta em campo e registrada por uma videocâmera localizada na Academia de Defesa Nacional próximo a Maborikaigan, Tóquio. A altitude do ponto de visada é de aproximadamente 100m acima do nível do mar. A segunda cena refere-se à costa da Cidade do Cabo, África do Sul, onde situa-se o Cabo da Boa Esperança. Nessa ocasião, realizou-se um experimento multipolarimétrico para detecção de alvos denominado projeto Madiba. Dados AIS tradicionais (transmissão em V/UHF) e orbitais foram obtidos para fins de verdade de campo. Esse experimento destaca-se pelo fato de incluir no conjunto de dados deste estudo imagens SAR reais HP do satélite RISAT-1, o primeiro do mundo a ser lançado com este modo de imageamento experimental.

No projeto Madiba, realizado em dezembro de 2013, diferentes tipos de imagens SAR foram obtidos com o propósito de validar algoritmos desenvolvidos para a detecção de alvos no mar em um esforço único para registrar as verdades de campo. Imagens *dual-pol* SLC dos satélites TerraSAR-X e Cosmo-Skymed compõem a base de dados do referido projeto. No entanto, o presente estudo usará somente das imagens SAR HP reais do RISAT-1 ainda que entre elas haja apenas uma imagem com dados AIS que confirmam a presença de navios na imagem.

O planejamento e a coordenação de um experimento deste porte são bastante complicados em virtude de diferenças culturais entre as instituições envolvidas, mas também pela complexidade intrínseca de organizar e/ou sincronizar meios orbitais e meios de superfície. A escolha do Cabo da Boa Esperança deu-se por conta de uma parceria entre a Universidade de Nápoles “Parthenope” (Itália) e o Conselho de Pesquisas Científicas e Industriais (CSIR, do inglês, *Council for Scientific and Industrial Research*) da África do Sul, sendo embasada pela análise do histórico estatístico da movimentação de tráfego mês a mês no ano precedente. A Agência Espacial Italiana (ASI, do italiano,

*Agenzia Spaziale Italiana*), o Centro de Pesquisa Aeroespacial alemão (DLR, do alemão, *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt*) e a Organização de Pesquisa Espacial Indiana (ISRO, do inglês, *Indian Space Research Organization*) figuram entre as agências espaciais envolvidas no projeto. Ressalta-se que todos os dados foram fornecidos gratuitamente para pesquisa científica. As outras instituições envolvidas, além daquelas ora mencionadas, são: o Instituto de Estudos Avançados (IEAv) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), ambos institutos no Brasil. Participou também, fornecendo sem custos os dados AIS, a Autoridade Sulaficana de Segurança Marítima (SAMSA, do inglês, *South African Maritime Safety Authority*) – África do Sul.

Por fim, ressalta-se que apesar da previsão de tráfego marítimo indicar uma alta probabilidade de encontrarem-se navios em tal região costeira, embarcações mercantes são alvos não-cooperativos, isto é, podem modificar de modo inesperado suas trajetórias e velocidades de acordo com suas necessidades operacionais. Além disso, para zonas em alto mar afastadas além de 100km da costa, a transmissão dos dados AIS pelos navios torna-se ineficiente em virtude do raio de curvatura da Terra e da propagação em linha de visada dos sinais transmitidos em V/UHF pelos sistemas convencionais. Isso acrescenta mais um grau de imprecisão no registro das posições dos alvos. Por último, mas não menos importante, está o fato de que as imagens SAR obtidas são de alta resolução espacial. Isto implica na redução das áreas imageadas e diminui as chances de detectar mais alvos. Por não haver verdade de campo para todas as imagens adquiridas e por haver imagens sem nenhum alvo, nem todas as imagens adquiridas foram processadas. Apenas as imagens com alvos foram arroladas na Tabela 3.1. A seguir, descrever-se-ão os dados SAR utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3.1 – Descrição das imagens SAR e das características ambientais relacionadas.

Sensor	ID Imagem	Ang. Incid.	Região	Data/Hora (GMT)	Veloc. vento	Direção vento	Observações
ALOS-PALSAR	ALPSRP179000580	24,7° – 26,5°	Golfo do México	04/06/2009 – 04:38:26	5 – 10m/s	Leste, predominante	Alguma agitação do mar notada devido à intensidade do vento e suas variações de direção.
ALOS-PALSAR	ALPSRP104460560	22,7° – 24,9°	Golfo do México	10/01/2008 – 04:29:26	3 – 5m/s	Nordeste	<i>Swell</i> na direção E-W. Estado-de-mar moderado.
ALOS-PALSAR	ALPSRP104460570	22,7° – 24,9°	Golfo do México	10/01/2008 – 04:29:34	3 – 5m/s	Nordeste	<i>Swell</i> na direção E-W. Estado-de-mar moderado.
ALOS-PALSAR	PASL1100810090119391207120028	21,5° – 24,0°	Baía de Tóquio	09/10/2008 – 01:19:34	5-13m/s	Sudoeste	Valores aproximados observados nas vizinhanças do interior da baía.
Radarsat-2	OK25212_P K256480	23,4° – 25,3°	Golfo do México	04/05/2010 – 12:17:41	5-8m/s	Sul	<i>Swell</i> na direção SW-NE.
Radarsat-2	PDS_00058910	20,8° – 22,8°	Estreito de Gibraltar	31/03/2008 – 18:10:56	Não obs. dentro do estreito. Esperado: 8-13m/s.	Sudeste (lado Leste); Sul (lado Oeste).	Frente de ondas na direção E-W e <i>swell</i> na direção SW-NE.
Radarsat-2	OK27507_P K274987	25,7° – 27,5°	Sul da Sardenha	17/02/2012 – 17:13:36	5 m/s	Sudeste	Baixo vento a norte e mar agitado ao sul da imagem
Radarsat-2	OK27507_P K281084	20,8° – 22,8°	Golfo de Nápoles	09/03/2012 – 17:01:24	12m/s	Sudoeste	Mar agitado a oeste, fora da costa
RISAT-1	142581021	22° – 24°	Costa Cidade do Cabo	11/12/2013 – 17:16:59	12m/s	Noroeste	Forte variação oceânica. Região de baixo devido península

### 3.1.1. Satélite SAR Radarsat-2

O satélite Radarsat-2<sup>2</sup>, lançado em dezembro de 2007 pela Agencia Espacial Canadense (CSA, do inglês, *Canadian Space Agency*), opera na banda C e possui variados modos de imageamento, além de ser o único disponível comercialmente com capacidade FP nesta banda. A exemplo, uma imagem SLC no modo *Spotlight* apresenta resolução espacial de 1,6 x 0,8m e uma área

<sup>2</sup> Canadian Space Agency website: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/>

coberta na superfície (*swath*) de pelo menos 18 x 8km. Por sua vez, o modo de máxima cobertura (modo *ScanSAR*) abrange uma área cerca de 500 x 500km, porém com resolução espacial nominal de 160 x 100m para imagens também SLC. O escopo dos ângulos de incidência vai de 20° a 50°. O Radarsat-2 também permite a seleção de diversas opções de polarizações (*single-pol*, *dual-pol*, *quad-pol*), as quais variam conforme modo de imageamento<sup>3</sup>.

Nesta pesquisa, foram somente utilizadas imagens SAR SLC no modo Fine QUAD-POL, ou seja, resolução espacial de aproximadamente 5 x 7m; *swath* de 25 x 25km; e possíveis ângulos de incidência de 18° a 49°, sendo tal faixa imageadas coberta por uma abertura média de 2° dentro do escopo mencionado. No Manual da Descrição dos Produtos Radarsat-2<sup>2</sup> encontram-se as relações entre os modos de imageamento, resoluções espaciais e ângulos de incidência disponíveis. O coeficiente sigma-zero equivalente ao ruído (NESZ, do inglês, *Noise Equivalent Sigma-Zero*) é a medida da sensibilidade do radar em áreas de baixo retroespalhamento ao ruído termal do sistema, ou seja, alvos cujos  $\sigma^0$  sejam inferiores a este nível de sensibilidade não serão distinguíveis. O NESZ do Radarsat-2 para o modo SLC FP Fine QUAD é cerca de -35dB.

### 3.1.2. Satélite SAR ALOS PALSAR

O satélite ALOS<sup>4</sup>, lançado em janeiro de 2006 pela Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA, do inglês, *Japan Aerospace Exploration Agency*), possui três sensores de imageamento, sendo um deles SAR. O sensor *Phased Array L-band SAR* (PALSAR) é o sensor que opera na banda L e também possui variados modos de imageamento. Atualmente, o recém-lançado satélite ALOS-2 está em operação, banda L, com capacidades semelhantes ao ALOS PALSAR, ainda que adicionalmente possua dois modos CP, por exemplo, os modos HP e  $\pi/4$ . Entretanto, o ALOS-2, até o

---

<sup>3</sup> Radarsat-2 product description:

[http://gs.mdacorporation.com/products/sensor/radarsat2/RS2\\_Product\\_Description.pdf](http://gs.mdacorporation.com/products/sensor/radarsat2/RS2_Product_Description.pdf)

<sup>4</sup> JAXA website: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>

encerramento deste trabalho, encontrava-se ainda em fase de calibração e não havia dados disponíveis.

O ALOS PALSAR apresenta variadas possibilidades de combinação de *swaths*, resoluções espaciais, ângulos de incidência e de polarizações. Suas resoluções espaciais variam de 7 a 10m, *swaths* 30 a 360km. Possui diferentes modos polarimétricos, destacando-se os modos FP. Utilizou-se o modo FP Fine QUAD<sup>5</sup>, cujo NESZ é de  $-29\text{dB}$  e suas resoluções espaciais variam de 7 a 15m a depender do ângulo de incidência (de  $8^\circ$  a  $30^\circ$ ), com cobertura de 30km na superfície.

### 3.1.3. O satélite SAR RISAT-1

O satélite RISAT-1<sup>6</sup>, lançado em abril de 2012 pela Organização de Pesquisa Espacial Indiana (ISRO, do inglês, *Indian Space Research Organisation*), possui modos convencionais de imageamento SAR, mas é o primeiro sensor a possuir em caráter experimental o modo HP. O sensor opera na banda C e possui modos de imageamento de alta resolução (modos *High Resolution Spotlight* (HRS) e *Fine Resolution Stripmap* (FRS-1 e 2)) e de ampla cobertura (*Medium Resolution ScanSAR* (MRS) e *Coarse Resolution ScanSAR* (CRS)). Para todos estes modos, estão disponíveis as polarizações simples, dupla e híbrida (ou HP). O modo polarimétrico *quad-pol* está disponível apenas para FRS-2. Os ângulos de incidência variam de  $12^\circ$  a  $55^\circ$ . Nesta pesquisa, o modo HP FRS-1 (transmissão RHC e recepção em H e V) foi usado, onde a resolução espacial é de  $3 \times 2\text{m}$ , com *swath* de 25km e NESZ de  $-16\text{dB}$ .

## 3.2. Metodologia

A metodologia desenvolvida no presente estudo possui três etapas principais: 1) análise da sensibilidade dos parâmetros polarimétricos HP em função da variabilidade do background oceânico; 2) detecção dos alvos sobre cada um

---

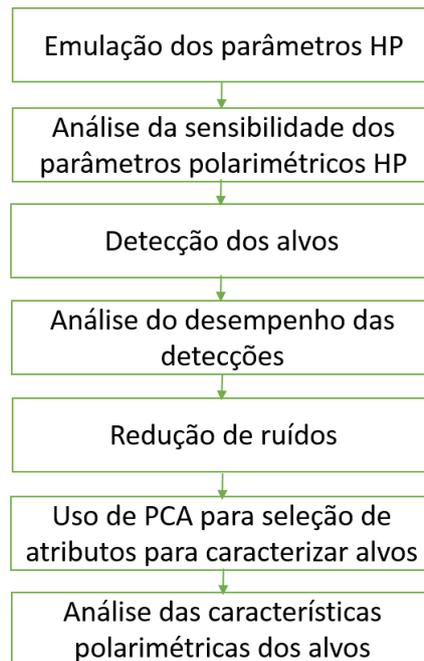
<sup>5</sup> ALOS PALSAR product description:

[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/PALSAR\\_x\\_Format\\_EL.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/PALSAR_x_Format_EL.pdf)

<sup>6</sup> eoPortal – RISAT-1: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/risat-1>

dos parâmetros polarimétricos por meio de limiarização global e adaptativa; e 3) análise do desempenho das detecções através de métricas objetivas. No entanto, para um melhor entendimento de todo o processo, a Figura 3.1 apresenta todos os passos da metodologia a qual parte da emulação das imagens HP e vão até o processo de análise de características polarimétricas dos alvos por meio de PCA.

Figura 3.1 – Esquema geral da metodologia adotada.



Fonte: Produção do autor.

Inicialmente, realiza-se a emulação das imagens HP (vide Tabela 3.2), isto é, das imagens dos parâmetros que representam medidas polarimétricas como coeficiente de correlação complexa (Equação 2.10), ângulo delta (Equação 2.12), grau de polarização (Equação 2.14), entropia da onda (Equação 2.15), e razão de polarização circular (Equação 2.25) geradas a partir da matriz de polarização  $\Gamma$  (Equação 2.22), para as quais a janela de convolução aplicada foi de 5 x 5 pixels. Esta janela foi estabelecida empiricamente, evitando a suavização excessiva de detalhes da cena. Este procedimento é considerado como suficiente para as etapas de análise de sensibilidade do *background* oceânico e de detecção de alvos. Posteriormente, para selecionar os melhores parâmetros HP através de PCA, realiza-se um processo de redução de ruídos

de modo que facilite a análise das características polarimétricas dos alvos. Esta redução é obtida através da aplicação de filtros *wavelets* Daubechies-4 (db4), usando o 3º nível de decimação para a suavização do ruído *speckle* da imagem SAR (PAES; PAGAMISSE, 2011). A seguir, apresentam-se os procedimentos para construir a métrica de análise de sensibilidade dos parâmetros polarimétricos HP à variação oceânica.

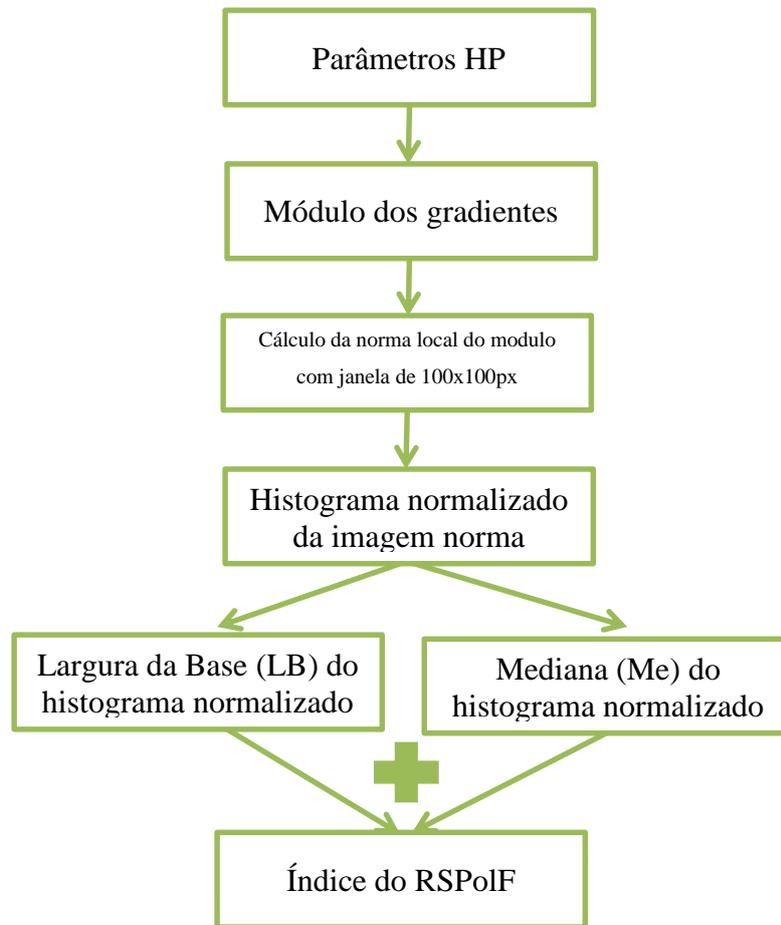
Tabela 3.2 - Parâmetros HP emulados e utilizados

Símbolo	Denominação	Equação
$ \mu_{hv} $	Módulo do coeficiente de correlação complexa	2.10
$\delta_{hv}$	Ângulo delta (diferença de fase entre as componentes h – v)	2.12
$p$	Grau de polarização	2.14
$H_w$	Entropia da onda	2.15
$\mu_c$	Razão de polarização circular	2.25

### 3.2.1. Análise de sensibilidade dos parâmetros polarimétricos HP à variação oceânica

A fim de analisar a sensibilidade dos parâmetros HP (vide Tabela 3.2) em relação à variabilidade oceânica, uma escala objetiva é proposta com base no índice de Sensibilidade Relativa de Parâmetros Polarimétricos (RSPoIF, do inglês, *Relative Sensitivity of Polarimetric Features*) introduzido pela primeira vez no estudo realizado por Paes; Nunziata; Migliaccio (2015). A Figura 3.2 apresenta o esquema de blocos com os procedimentos necessários para gerar o RSPoIF e a escala. Esta métrica constitui uma das mais relevantes contribuições científicas desta tese, pois permite que o estado de agitação do mar seja estimado a partir de imagens dos parâmetros polarimétricos.

Figura 3.2 – Esquema de blocos com os procedimentos para o cálculo do RSPoIF.



Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

O primeiro passo consiste no cálculo do módulo dos gradientes do parâmetro HP (por exemplo, entropia da onda ( $H_w$ )) na direção vertical ( $\partial F/\partial y$ ) e horizontal ( $\partial F/\partial x$ ) da matriz, isto é, da imagem deste parâmetro selecionado. O cálculo do gradiente<sup>7</sup> em cada direção está implementado como na Equação 3.1 e o módulo destes gradientes como apresentado na Equação 3.2:

$$B_d = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^{N-1} (b_{i+1} - b_{i-1}) \quad (3.1)$$

sendo,  $B_d$  a matriz com os gradientes do parâmetro HP selecionado na direção  $d$  (vertical ou horizontal) e  $b_i$  refere-se aos elementos da matriz  $B_d$ .

---

<sup>7</sup> Mathworks – Matlab documentation  
<http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/gradient.html?searchHighlight=gradient>

$$|A| = \sqrt{(B_v)^2 + (B_h)^2} \quad (3.2)$$

sendo,  $|A|$  o módulo dos gradientes na direção vertical ( $B_v$ ) e na horizontal ( $B_h$ ).

Cada parâmetro polarimétrico terá seu próprio índice. Ressalta-se que em imagens onde há a presença da costa um procedimento simples de mascaramento desta porção da imagem é realizado para que tais valores de pixel não interfiram no estabelecimento do RSPoIF.

O segundo passo é o cálculo da norma matricial, a qual fornece um valor singular máximo de uma soma do módulo das entradas de cada uma de suas linhas<sup>8</sup> (ou vetores). A magnitude da variação local (Equação 3.3) é obtida através do cálculo da norma sobre a matriz do módulo dos gradientes horizontal e vertical (da variação de valores nestas duas direções), conforme explicado anteriormente. Assim, tal matriz é particionada em blocos de 100 x 100 pixels os quais representam, em média, uma área de 500 x 500m dadas as resoluções espaciais do conjunto de dados utilizados nesta pesquisa. Entretanto, o tamanho destes blocos de processamento pode variar conforme a resolução espacial da imagem e/ou da área de influência do fenômeno investigado. A Figura 3.3 apresenta um exemplo com o parâmetro  $H_w$  e a imagem com a norma calculada em blocos de 100 x 100 pixels, além do mascaramento realizado para evitar a influência da área de costa.

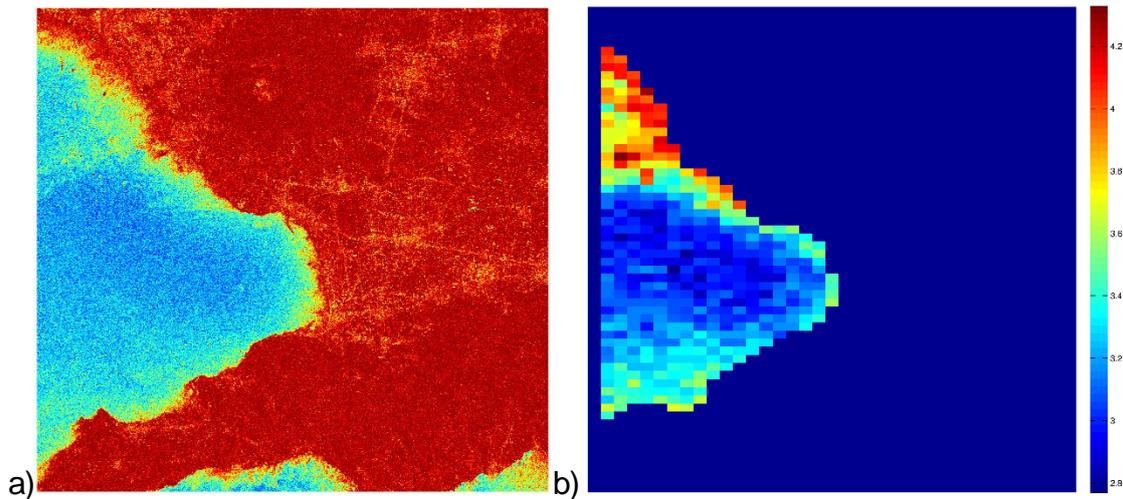
$$\|A\| = \max_j \sum_{i=1}^n |a_{ij}| \quad (3.3)$$

sendo,  $\|A\|$  a norma da matriz A e  $a_{ij}$  representando cada elemento da matriz A.

---

<sup>8</sup> Wolfram – Computation meets knowledge  
<http://reference.wolfram.com/language/ref/Norm.html>

Figura 3.3 – Cálculo da norma local sobre o gradiente do parâmetro  $H_w$ .

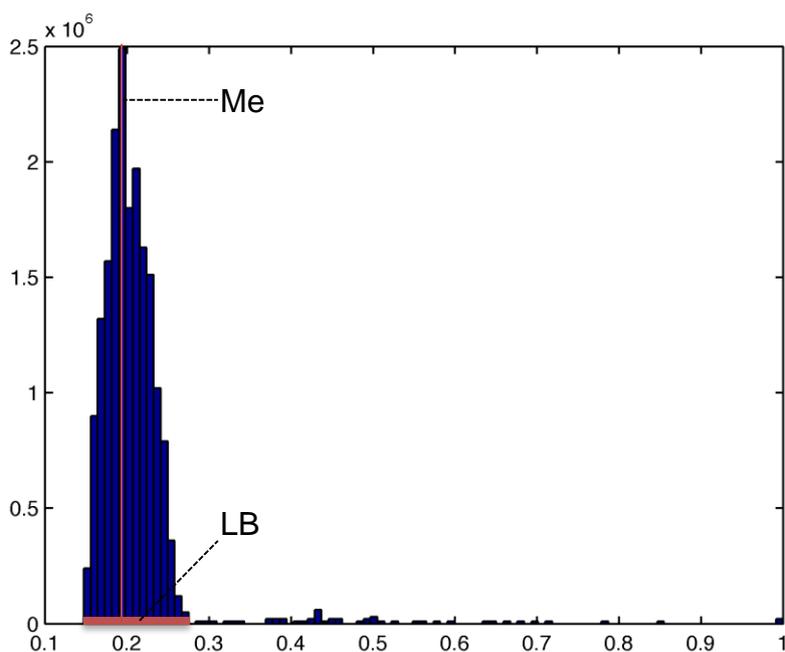


A Figura 3.3a mostra uma imagem  $H_w$  da Golfo de Nápoles (Itália) gerada a partir de dados Radarsat-2. A Figura 3.3b mostra a imagem da norma local calculada em janelas de 100 x 100 pixels sobre o modulo do gradiente. Notar que a superfície terrestre foi excluída com um simples procedimento manual de mascaramento para que não interferissem nos cálculos.

Fonte: Produção do autor.

Em seguida, normaliza-se o histograma da imagem norma pelo seu valor máximo. Finalmente, o valor do RSPoIF pode ser alcançado pela soma de dois parâmetros relativos à porção contínua do histograma normalizado: Mediana (Me) e Largura da Base (LB). A Figura 3.4 mostra estes parâmetros relativos ao histograma sendo visualmente explicados.

Figura 3.4 – Explicação visual dos parâmetros Me e LB.



Exemplo de histograma normalizado da imagem norma obtida a partir do processamento do parâmetro  $\delta_{xy}$  relativo à imagem ALOS PALSAR ALPSR179000580.

Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

É importante salientar que tanto Me quanto LB são parâmetros extraídos em relação à porção contínua do histograma (conforme indicado na Figura 3.4), a qual se refere aos valores dos pixels que representam o oceano, formando assim uma base. Os valores além desta base são considerados *outliers*, isto é, referem-se aos alvos metálicos ou mesmo a ilhas. Portanto, Me fornece a noção da intensidade da variabilidade dos pixels referentes ao mar. Enquanto que, LB (a diferença entre os valores extremos desta base contínua) fornece a noção da variabilidade em si, isto é, do escopo de valores que tal parâmetro HP está sujeito por conta dos fenômenos oceânicos.

Por fim, a última etapa deste procedimento é somar os valores de Me e LB para obter-se o índice RSPoIF. Para relacioná-lo à variabilidade da superfície marinha, seis intervalos de valores contínuos são definidos empiricamente. Estes intervalos possuem larguras diferentes entre si, assumindo uma característica gaussiana a fim de que possam cobrir adequadamente os níveis de agitação do mar. Doravante os intervalos desta escala serão mencionados apenas como níveis. O escopo dos níveis parte da variabilidade muito baixa

(RSPoIF < 0,15) e vão até muito alta (RSPoIF > 0,85). A Tabela 3.3 apresenta a relação entre os índices RSPoIF e os níveis de agitação oceânica relativa.

Tabela 3.3 – Escala de índices RSPoIF

<b>Intervalos do índice</b>	<b>Níveis</b>
[0,0 – 0,15]	Muito Baixo (MB)
]0,15 – 0,35]	Baixo (B)
[0,35 – 0,65]	Médio (M)
]0,65 – 0,85]	Alto (A)
]0,85 – 1,00+[	Muito Alto (MA)

Os níveis de RSPoIF encontrados para cada imagem do *dataset* são coerentes tanto com dados de direção e intensidade de vento de superfície medidos por escaterômetros<sup>9</sup> (ex.: Windsat e Quikscat), quanto com as escalas de Beaufort (Anexo A) e do estado do mar, ou escala de Douglas (Anexo B). A fim de ratificar esta coerência e, por conseguinte, a relevância desta métrica, a intensidade do vento foi extraída sobre as imagens HH na banda C, com base no modelo CMOD5 (HERSBACH; STOFFELEN; DE HAAN, 2007) e na banda L (ISOGUCHI; SHIMADA, 2009), assumindo que a direção do vento é aquela indicada nos dados dos escaterômetros. Os valores dos escaterômetros são confirmados pela extração do vento nas imagens SAR, sendo que ocorre uma ligeira superestimação do vento na banda C (HERSBACH; STOFFELEN; DE HAAN, 2007) e uma subestimação na banda L (ISOGUCHI; SHIMADA, 2009). Além disto, dados de altura significativa de ondas<sup>10,11,12</sup> foram confrontados

---

<sup>9</sup> Site STAR – Center for satellite application and research: <http://manati.star.nesdis.noaa.gov/datasets/WindSATData.php>

<sup>10</sup> ERDDAP - Easier access to scientific data: [http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/NWW3\\_Global\\_Best.graph](http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/NWW3_Global_Best.graph)

<sup>11</sup> CCMMA – Centro Campano per il Monitoraggio e la Modellistica Marina e Atmosferica: <http://ccmma.uniparthenope.it/forecast/wave>

<sup>12</sup> Poseidon system: <http://poseidon.hcmr.gr/>

para analisar a contribuição do vento de superfície e do *swell* sobre as imagens e, conseqüentemente, sobre a informação calculada através do RSPoIF.

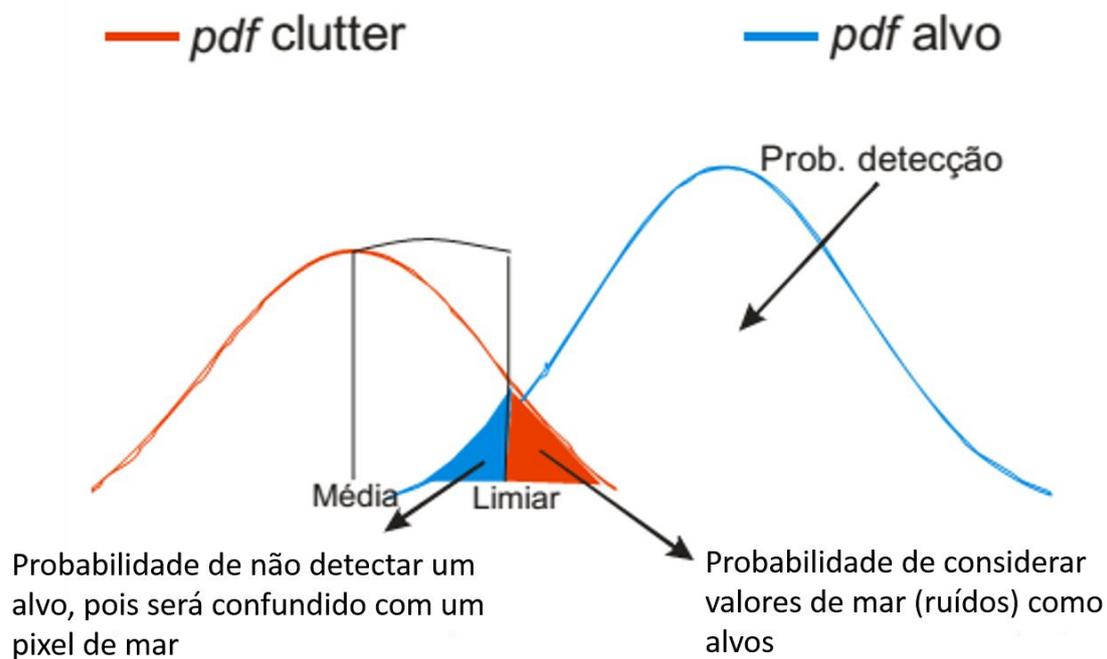
Os índices RSPoIF, ou os níveis aos quais correspondem na escala proposta, indicam quais e quanto os parâmetros polarimétricos são susceptíveis às variações do *background* oceânico. Isto permite seleccioná-los conforme se apresentam as condições ambientais. Inclusive, a depender do parâmetro HP, mar e alvo são caracterizados de forma tão distinta entre si que apenas simples procedimentos para separá-los são necessários. Quando um nível de RSPoIF calculado sobre uma imagem HP é comparado ao mesmo cálculo sobre uma imagem intensidade (ex.: HH ou VV), observa-se que os parâmetros polarimétricos HP, em geral, oferecem uma melhor caracterização mar-alvo e, conseqüentemente, sendo propícios para a detecção.

### **3.2.2. Detecção de alvos sobre cada imagem parâmetro HP e implementação de métodos de detecção global e adaptativo**

Primeiro, para investigar a viabilidade dos parâmetros HP ( $|\mu_{hv}|$ ,  $\delta_{hv}$ ,  $p$ ,  $H_w$ ,  $\mu_c$ ) em distinguir os alvos de seus entornos correspondentes ao retroespalhamento do sinal pelo oceano, limiares globais são implementados. Em seguida, para tentar resolver casos mais desafiadores, algoritmos adaptativos CFAR são implementados. Com base nas observações preliminares nos níveis de RSPoIF é possível notar que, para a maioria dos casos, os alvos podem ser separados do mar por um simples *threshold* global. Nenhum pré-processamento faz-se necessário para executar as detecções. O valor limiar global para cada parâmetro HP é determinado a partir do cálculo da média de todos os pixels da imagem HP (à exceção somente daqueles relativos à superfície terrestre). Então, um valor duas vezes maior a esta média é definido como limiar, porém é empiricamente ajustado até se encontrar uma diferenciação adequada entre alvos e mar. Uma vez definido tal valor, basta executar uma regra condicional a qual compara este valor pré-estabelecido com o valor de cada pixel da imagem. Aqueles valores que o superarem, serão considerados como alvos. Os demais serão considerados como pertencentes ao *background* oceânico.

Adicionalmente, para ser confrontado mais à frente com o desempenho do método de limiarização global, um algoritmo de detecção CFAR (PAES, 2009; PAES; LORENZZETTI; GHERARDI, 2010), não supervisionado, é considerado. A implementação ocorre conforme a distribuição estatística do *background* oceânico, a qual é analisada usando o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS). Este teste define qual distribuição estatística ajusta-se aos valores dos pixels relativos ao mar. Uma vez definida a distribuição é possível calcular localmente o valor extremo que pertenceria ao conjunto dos pixels do oceano (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Definição de um limiar que separe duas classes de valores com distribuições estatísticas diferentes.



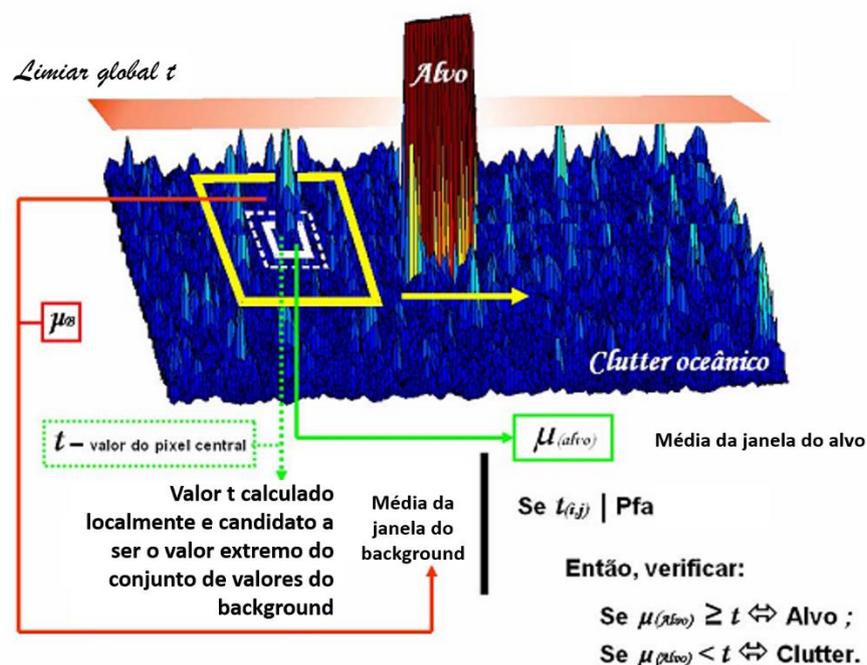
Busca-se um valor que seja o mais alto de uma distribuição, permitindo determinar uma classe diferente de valores desde que sejam superiores a este limiar. A área em azul representa a probabilidade de se obter falsos negativos, isto é, de considerar erroneamente como mar um pixel que pertença a um alvo. Na área em vermelho ocorre o oposto. É a probabilidade de se obter falsos positivos, ou seja, de considerar valores de mar como se fossem alvos.

Fonte: adaptado de Paes (2009).

O algoritmo CFAR consiste basicamente no deslocamento de janelas concêntricas nas quais valores médios da janela interna são confrontados com um valor  $t$  estimado a partir da distribuição estatística do background. Após a definição de uma Probabilidade de Falsos Alarmes (Pfa), e com base nas

informações locais fornecidas pela janela externa, será possível estimar  $t$ . Este valor representa o maior valor que um pixel do mar poderia assumir. Logo, admite-se que qualquer valor acima deste poderá ser considerado como um valor de um alvo. A Figura 3.6 apresenta um exemplo esquemático de como funcionaria um processo de limiarização global e uma adaptativa baseados no CFAR. Assim, o desempenho de ambos os métodos, global e adaptativo, serão discutidos em função do índice RSPoIF referente tal imagem HP.

Figura 3.6 – Esquema de algoritmos de detecção baseados em limiar global e em CFAR.



O limiar global  $t$  é um valor que se aplica à toda a imagem de parâmetros HP indiferentemente às variações estatísticas locais. Se o valor de um pixel da imagem for maior do que ele, então, será um alvo. Do contrário, um pixel referente ao oceano. Os quadriláteros concêntricos representam as janelas adaptativas do algoritmo CFAR. Os valores médios da janela interna são confrontados com um valor  $t$  estimado a partir da distribuição estatística do background. Dada uma  $Pfa$ , a regra de decisão poderá ser definida para separar valores de alvos daqueles do mar.

Fonte: adaptado de Paes (2009).

Neste trabalho, dois tipos de CFAR foram implementados: *Cell Average* (CA) CFAR (GUIDA; LONGO; LOPS, 1993; CUI; YANG; YAMAGUCHI, 2011) e *Order Statistics* (OS) CFAR (SUN et al., 2012; MENG, 2013). O CA CFAR

confronta o valor médio dos pixels da janela do alvo com os valores dos pixels do *background*, enquanto que o OS CFAR ordena os pixels dentro da janela do alvo em ordem crescente e o valor mais alto constante no último quartil será o pixel supostamente do alvo a ser confrontado com o *background*. Nesta implementação, ambas as combinações são aplicadas (CA-OS CFAR) sobre as duas distribuições estatísticas analisadas (log-normal e Weibull) em cada imagem de modo a verificar qual dos dois esquemas CFAR apresentará o melhor desempenho (PAES; NUNZIATA; MIGLIACCIO, 2015).

### **3.2.3. Análise do desempenho das detecções usando métricas objetivas**

O desempenho dos métodos de detecção de alvos pode ser discutidos em termos de falsos alarmes (FA) e de alvos perdidos (AP). FA ocorrem principalmente devido à superfície do mar que modula o retroespalhamento do sinal forte o suficiente para confundir os algoritmos de detecção (LORENZZETTI; PAES; GHERARDI, 2010). Por outro lado, AP estão relacionados às características dos alvos, como suas dimensões e suas orientações em relação ao feixe radar, as quais podem contribuir com sinais retroespalhados relativamente fracos tornando-os praticamente indistinguíveis do *background* oceânico. É importante ressaltar que AP também podem ser causados pelas condições do mar quando o movimento das ondas pode esconder pequenas embarcações. No entanto, o mesmo movimento pode levantar uma embarcação, de tal modo que provenha a orientação adequada ao radar para gerar um grande retroespalhamento (PICHEL et al., 2004). Deste modo, em função de tal aleatoriedade, considerar-se-á como fatores para AP apenas as características dos alvos por influenciarem constantemente.

Assim, introduzem-se duas métricas a fim de prover uma avaliação objetiva do desempenho dos detectores: a nova Dependência do estado-do-mar e das características do alvo (DoST, do inglês, *Dependency of Sea State and Target*) (PAES; NUNZIATA; MIGLIACCIO, 2015); e a bem conhecida Figura-de-Mérito (FoM, do inglês, *Figure-of-Merit*) (FOULKES; BOOTH, 2000). O DoST consiste em dois índices: a Dependência do estado-do-mar (DSS, do inglês, *Dependency of Sea State*) e Dependência das características superficiais do

alvo (DTSC, do inglês, *Dependency on the Target Surface Characteristics*). DSS é a razão entre a soma de FAs e soma de todos os alvos verdadeiros (AV) conhecidos para cada imagem parâmetro no conjunto de dados:

$$DSS = \frac{\sum FA}{\sum AV} \quad (3.1)$$

o escopo de valores desta razão corresponde ao intervalo  $[0 \infty[$  dos quais o valor ótimo é zero, ou seja, nenhum falso alarme. DTSC é obtido através da razão entre o somatório de todos os alvos detectados (AD) e AV:

$$DTSC = \frac{\sum AD}{\sum AV} \quad (3.2)$$

sendo que o intervalo de valores é  $[0 1]$  dos quais o valor ótimo é a unidade, isto é, quando todos os alvos são corretamente detectados. A FoM é uma métrica utilizada em diversos trabalhos na literatura (FOULKES; BOOTH, 2000; PICHEL et al., 2004; LORENZZETTI; PAES; GHERARDI, 2010; PAES; LORENZZETTI; GHERARDI, 2010), e provê uma ideia geral sobre a influência de ambos os fatores (alvos e estado-do-mar), mas não é capaz de distinguir tais influências como DoST é capaz. Neste trabalho, FoM será utilizada para comparação com DoST para avaliar o desempenho das detecções pelos algoritmos de detecção global e adaptativo. FoM é matematicamente definida por:

$$FoM = \frac{\sum AD}{\sum FA + \sum AV} \quad (3.3)$$

### **3.2.4. Análise de Principais Componentes (APC) para seleção de atributos e para caracterização polarimétrica de alvos**

Esta tarefa tem como propósito selecionar os parâmetros HP empregados conforme suas capacidades de caracterizar os alvos metálicos, associando-os de modo que portem informações complementares. Assim, uma análise dos mecanismos de espalhamento dominantes poderá ser realizada. Os parâmetros HP proveem informação redundante entre si para a classificação dos mecanismos de espalhamento da cena observada, por exemplo,  $p$  e  $H_w$  apesar de possuírem interpretações diferentes, tratam da mesma natureza

física. Estas redundâncias (ou complementariedades) podem ser identificadas pela APC. Ela pode ser considerada como uma rotação de coordenadas que remove a correlação de um conjunto de variáveis aleatórias. Isto é feito através de uma transformação linear que, aplicada a um conjunto de valores randômicos, resulta em um novo conjunto de variáveis descorrelacionadas.

Neste estudo, o conjunto de variáveis correlacionadas é dado pelos parâmetros HP. Considere  $f_j$  com  $j = 1 \dots n$  o  $j$ -ésimo vetor no qual as  $m$  componentes são os elementos ordenados a partir do  $j$ -ésimo parâmetro HP (Tabela 3.2). Para analisar a correlação prevaiente entre os parâmetros, utiliza-se a matriz de covariância. Assim, o seguinte vetor alvo é construído com  $i$  componentes, com  $i = 1 \dots m$ , sendo dado por:

$$k_i = [f_{1i}, f_{2i}, \dots, f_{ni}]. \quad (3.4)$$

A matriz de covariância  $C_{n \times n}$  simétrica é dada por:

$$C_i = \langle k_i k_i^T \rangle, \quad (3.5)$$

onde  $\langle \cdot \rangle$  e  $T$  significam a média e a transposta, respectivamente. A matriz de covariância mostra um alto (ou baixo) grau de correlação entre os parâmetros quando os elementos fora da diagonal principal da matriz são grandes em termos de valores (ou pequenos). De fato, a APC consiste na geração de uma matriz de rotação que gira as variáveis em torno de um conjunto de direções ortogonais, que são denominadas como direções das principais componentes. A matriz de rotação é obtida através da autodecomposição de  $C_i$ :

$$C_i = W D W^T \quad (3.6)$$

Com  $D = \text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n)$  sendo a matriz diagonal que contém os autovalores de  $C_i$  e  $W$  o autovetor da matriz, cujas colunas contm os autovetores de  $C_i$ . O novo conjunto de variáveis não correlacionadas no sistema de coordenadas principal é dado por:

$$x_i(j) = \sum_{l=1}^n W_{jl} k_i(l), \quad i = 1 \dots m; \quad j = 1 \dots m, \quad (3.7)$$

onde  $x_i(j)$  denota o  $i$ -ésimo componente do  $j$ -ésimo parâmetro no sistema de coordenadas principal, nominada de  $j$ -ésima principal componente (PC), e  $W_{jl}$  é um elemento de  $W$ . A Equação 3.7 provê  $n$  PCs que são ordenadas em ordem decrescente conforme suas variâncias. Neste estudo, a APC é aplicada para identificar quais parâmetros HP portam informações redundantes entre si. As PCs são analisadas em pares ( $n = 2$ , na Equação 3.7) e todos os parâmetros HP são avaliados (DANKLMAYER; CHANDRA; LUNEBURG, 2005).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo, os experimentos são apresentados de modo a discutir a sensibilidade dos parâmetros polarimétricos tendo em conta os alvos metálicos no mar e as condições de estado do mar. Estes experimentos consistem na execução de três passos principais para cada parâmetro HP gerado, seguidos e discutidos no Capítulo 3: *i)* analisou-se a sensibilidade de cada parâmetro em relação às variações do *background* oceânico; *ii)* implementaram-se detectores de alvos baseados em *thresholds* globais e adaptativos (CFAR); e *iii)* foi realizada uma análise quantitativa dos resultados conforme as métricas DoST e FoM.

Os parâmetros HP foram construídos a partir de dados FP ALOS PALSAR (banda L) e Radarsat-2 (banda C). Através da matriz de polarização para o modo Híbrido (Equação 3.22) é possível emular tais parâmetros HP. Dados HP reais RISAT-1 também foram utilizados para verificar os aspectos observados nas emulações. A Tabela 3.1, no Capítulo 3 deste trabalho, contém informações detalhadas sobre o conjunto de dados empregado. Os resultados obtidos processando todo o conjunto de dados por meio de limiarização global estão listados na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Imagens ALOS PALSAR. Resultados dos desempenhos com limiarização global e conforme RSPoIF e as métricas DoST e FoM

IMAGEM ALOS PALSAR ALPSRP179000580				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$\delta_{hv}$	0,3205 (B)	0	0,69	0,69
$ \mu_{hv} $	1,0938 (MA)	3,79	1,00	0,20
$H_w$	1,1018 (MA)	0,05	0,78	0,74
$p$	0,8597 (MA)	0,10	1,00	0,90
$\mu_c$	0,1013 (MB)	1,92	0,84	0,29

IMAGEM ALOS PALSAR ALPSRP104460560				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$\delta_{hv}$	0,199 (B)	0	0,91	0,91
$ \mu_{hv} $	0,7813 (A)	0	1,00	1,00
$H_w$	0,9731 (MA)	0	0,94	0,94
$p$	0,5957 (M)	0	0,94	0,94
$\mu_c$	0,0775 (MB)	0	0,97	0,97

continua

continuação e final - Tabela 4.1

IMAGEM ALOS PALSAR ALPSRP104460570				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$\delta_{hv}$	0,2767 (B)	0	0,69	0,69
$ \mu_{hv} $	0,95 (MA)	0	1,00	1,00
$H_w$	0,9829 (MA)	0	0,83	0,83
$p$	0,6412 (A)	0	0,73	0,73
$\mu_c$	0,0654 (MB)	0	0,92	0,92

IMAGEM ALOS PALSAR PASL1100810090119391207120028				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$\delta_{hv}$	0,3697 (M)	0,03	0,61	0,57
$ \mu_{hv} $	0,9770 (MA)	1,29	1,00	0,43
$H_w$	1,035 (MA)	0,16	0,54	0,47
$p$	0,783 (A)	0,09	0,58	0,52
$\mu_c$	0,1455 (MB)	0,25	0,83	0,66

Tabela 4.2 - Imagens Radarsat-2. Resultados dos desempenhos com limiarização global e conforme RSPoIF e as métricas DoST e FoM

IMAGEM RADARSAT-2 OK25212_PK256480				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$\delta_{hv}$	0,2138 (B)	0	0,87	0,87
$ \mu_{hv} $	0,5852 (M)	0	1,00	1,00
$H_w$	0,7760 (A)	0	0,91	0,91
$p$	0,3668 (M)	0	0,87	0,87
$\mu_c$	0,0304 (MB)	0	1,00	1,00

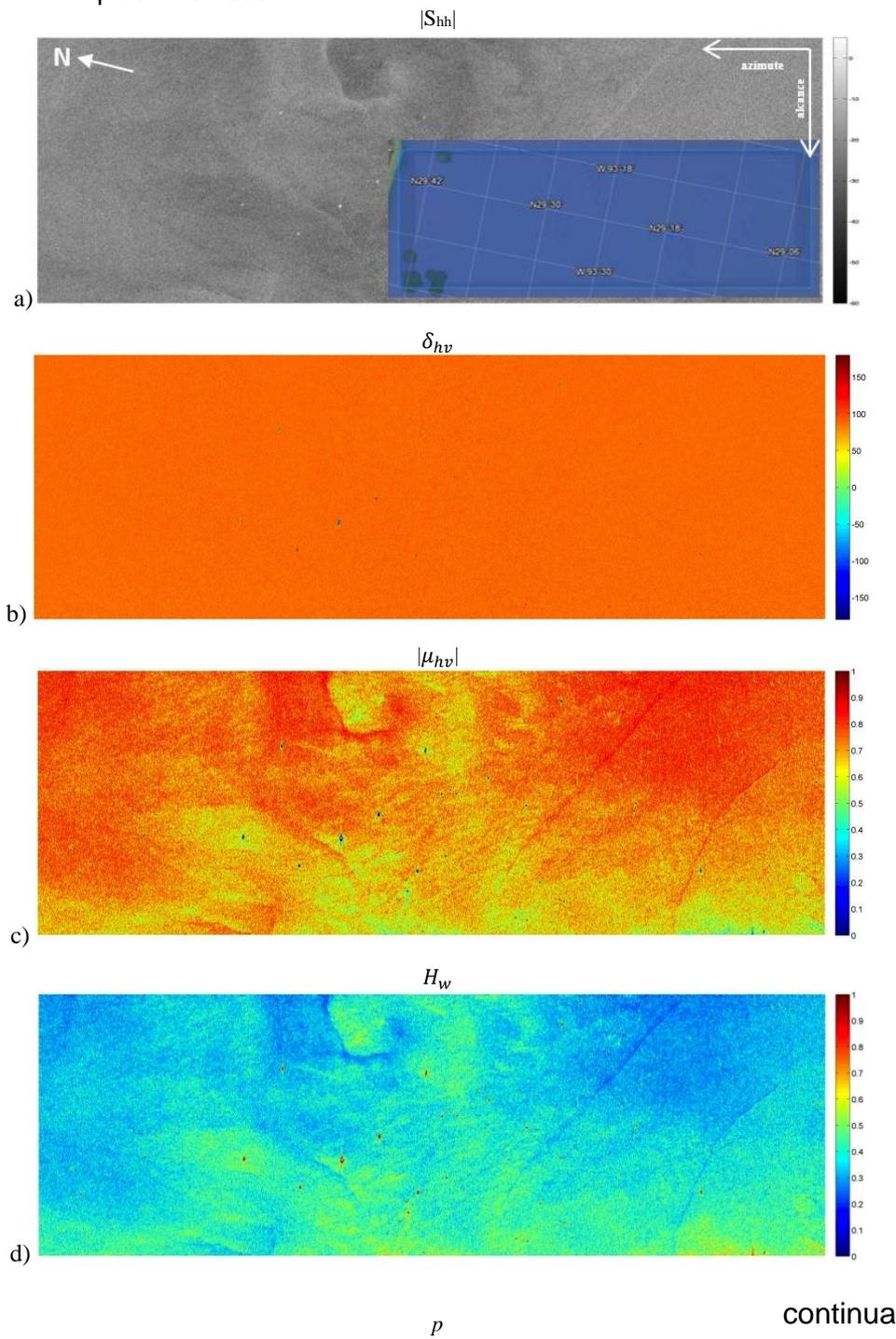
IMAGEM RADARSAT-2 PDS_00058910				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$\delta_{hv}$	0,1579 (B)	0	0,88	0,88
$ \mu_{hv} $	0,4984 (M)	0,22	1,00	0,81
$H_w$	0,6601 (A)	0,11	1,00	0,90
$p$	0,3492 (B)	0	0,88	0,88
$\mu_c$	0,0362 (MB)	0,22	1,00	0,81

Por exemplo, no caso da imagem ALPSRP179000580 (Tabela 4.1), a FoM = 0,69 que caracteriza o desempenho do parâmetro  $\delta_{hv}$  não ocorre devido à agitação da superfície oceânica (pois, DSS = 0), mas sim em função das características das superfícies dos alvos presentes nesta cena (DTSC = 0,69). Isto também se constata com a verificação do índice RSPoIF (=0,3205), indicando baixa sensibilidade à variação do *background*. Cada parâmetro se

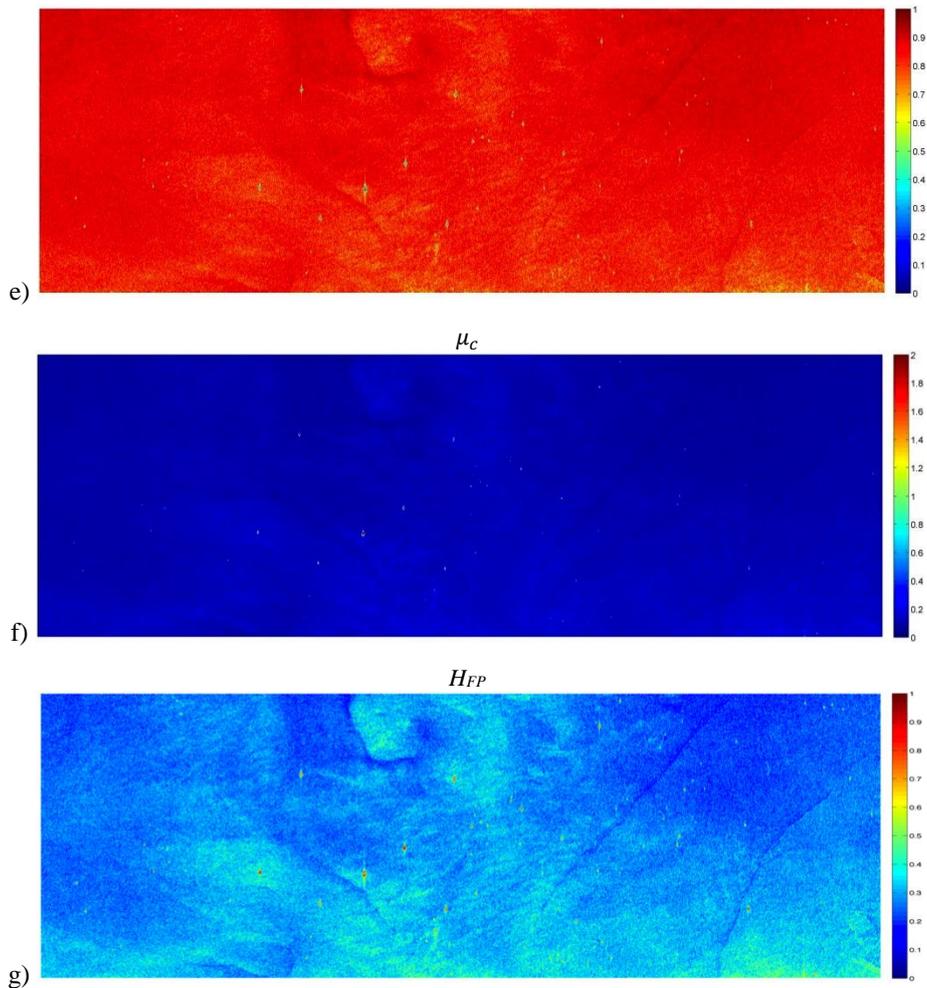
comporta de modo diferente. Nota-se que  $|\mu_{hv}|$  apresenta uma FoM = 0,20, o que ocorre devido à agitação do *background* oceânico (onde, DSS = 3,79), com RSPoIF (=1,0938) muito alto (MA), e não é afetado pelas características do alvo (DTSC = 1,00). Entretanto, salienta-se que o índice RSPoIF não está estritamente relacionado à FA. Há casos onde  $FA \neq 0$  e RSPoIF é baixo (veja  $\mu_c$  na Tabela 4.1 para a mesma imagem). Analogamente, RSPoIF muito alto não implica necessariamente em grande quantidade de FA. Por exemplo, na imagem ALOS PALSAR ALPSRP104460560, o parâmetro  $H_w$  apresenta RSPoIF muito alto, mas DSS = 0. Estes comportamentos replicam-se por todo o conjunto de dados como pode ser visto na Tabela 4.1 e Tabela 4.2.

No entanto, destaque será dado aos resultados obtidos a partir das imagens ALOS PALSAR ALPSRP179000580, referente à região do Golfo do México/EUA, e RISAT-1 142581021, referente à costa da Cidade do Cabo/África do Sul. A primeira imagem (Figura 4.1) apresenta uma cena com o caso mais desafiador em termos de condições de estado de mar. A segunda é um dado SAR HP real (Figura 4.13) e será comentada mais adiante na Subseção 4.4. O módulo da imagem HH SAR da cena ALOS PALSAR ALPSRP179000580 (Figura 4.1a) é apresentada em tons de cinza, valores de  $\sigma^0$ , escala em dB. A imagem possui 79 alvos metálicos que foram visualmente inspecionados e duplamente confirmados ao aplicarem-se técnicas de detecção *dual-pol* (NUNZIATA; MIGLIACCIO; BROWN, 2012). A cena é caracterizada por uma variabilidade significativa na superfície do mar com o vento de superfície variando de 5-10 m/s, soprando predominantemente para a direção leste. Todos os parâmetros HP desta cena são mostrados na Figura 4, onde a entropia convencional FP ( $H_{FP}$ ), extraída dos dados *full* polarimétricos, foi incluída para fins de comparação, cuja formulação encontra-se em (LEE; POTTIER, 2009).

Figura 4.1 – Imagem ALOS PALSAR ALPSRP179000580 e seus relativos parâmetros polarimétricos.



continuação e final - Figura 4.1



Região do Golfo do México – EUA. Imagens dos parâmetros HP, de cima para baixo: (a)  $|S_{hh}|$ , imagem intensidade HH, escala [-60 5] dB; (b)  $\delta_{hv}$ , diferença de fase entre as componentes h – v, escala [-180° 180°]; (c)  $|\mu_{hv}|$ , módulo do coeficiente de correlação complexa, escala [0 1]; (d)  $H_w$ , entropia da onda, escala [0 1]; (e)  $p$ , grau de polarização, escala [0 1]; (f)  $\mu_c$ , razão de polarização circular, escala [0  $\infty$ ]; (g)  $H_{FP}$ , entropia da cena (calculada da imagem FP), escala [0 1].

Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

Uma inspeção visual das imagens dos parâmetros HP permite constatar que apresentam variabilidades diversas entre si. Para quantificar os efeitos da variabilidade do *background* em cada parâmetro HP, calculou-se o correspondente índice RSPoIF para cada um deles, conforme explicado na Subseção 3.2.1 (Figura 3.2 e Tabela 3.2). Os resultados listados na Tabela 4.3 confirmam que as sensibilidades mais fracas às variações do *background* são obtidas pelos parâmetros  $\delta_{hv}$  e  $\mu_c$ , enquanto que as maiores sensibilidades se

verificam com os demais parâmetros.  $H_w$  e  $H_{FP}$  apresentam características de sensibilidade ao *background* marinho muito semelhantes, dando indicações que através de imagens obtidas em modo híbrido (HP) é possível obter respostas muito próximas ao modo *full-pol* (FP), mas com a vantagem de cobrir uma área maior na superfície do mar.

Tabela 4.3 – Imagem ALOS PALSAR ALPSRP179000580. Resultados dos desempenhos com limiarização global e conforme RSPoIF e as métricas DoST e FoM

Parâmetro polarimétrico	RSPoIF*	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$\delta_{hv}$	0,3205 (B)	0	0.69	0,69
$ \mu_{hv} $	1,0938 (MA)	3,79	1.00	0,20
$H_w$	1,1018 (MA)	0,05	0.78	0,74
$p$	0,8597 (MA)	0,10	1.00	0,90
$\mu_c$	0,1013 (MB)	1,92	0.84	0,29
$H_{FP}$	1,1222 (MA)	0,05	0.79	0,75

\*Ver Tabela 3.3 para limiares RSPoIF

A fim de analisar quantitativamente o desempenho das detecções, as duas métricas DoST e FoM são consideradas (veja Tabela 4.3). Pode ser observado que, como esperado, DoST permite a distinção entre FA e AP como influência na perda de desempenho, remetendo diretamente à causa. No exemplo da Tabela 4.3, a agitação do mar é a causa da perda de desempenho para o parâmetro  $|\mu_{hv}|$ . As características dos alvos afetam as detecções com o parâmetro  $\delta_{hv}$ , e ambos os elementos afetam os resultados de  $\mu_c$ .

A métrica FoM apenas mostra que algo afetou o desempenho, mas não permite que através de seus resultados investiguem-se as causas. Através da métrica DoST é possível verificar tanto qual índice (DSS ou DTSC) está impactando sobre o desempenho, quanto qual deles tem maior contribuição negativa. Portanto, o uso de DoST torna-se uma vantagem porque em caso de fraco desempenho será possível ao usuário ajustar/ adaptar/ modificar o

algoritmo detector com base nas informações das causas fornecidas por esta nova métrica.

#### 4.1. Limiarização global

Para obter os valores dos limiares globais, seguiu-se o procedimento descrito na Seção 3.2.2, o qual consiste na variação de um valor de *threshold* até que se obtenha a melhor relação em FA (Falsos Alarmes) e AP (Alvos Perdidos). Os valores limiares globais aplicados estão listados na Tabela 4.4, onde o valor médio e o valor de referência estão assinalados para cada parâmetro. Um exemplo de *threshold* global é mostrado na Figura 4.2, onde se exhibe um alvo significativo encontrado na cena. É possível notar que quanto maior é a variabilidade oceânica, mais elevado é o valor de partida do limiar global em relação à média do *background*.

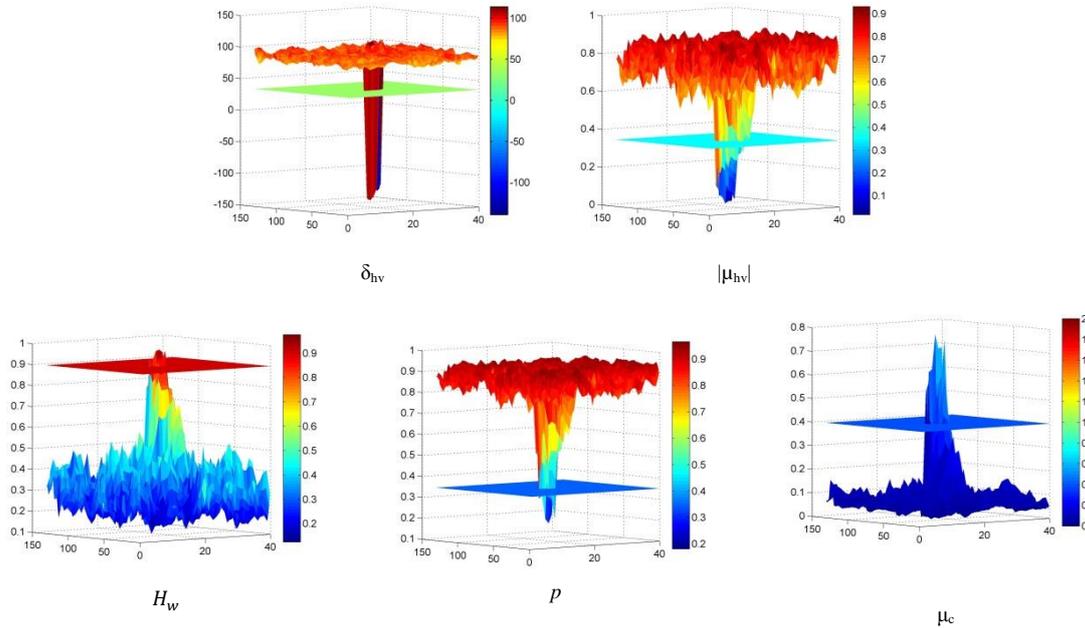
Tabela 4.4 – Imagem ALOS PALSAR ALPSRP179000580. Intervalo de valores esperados, valores médios e limiares globais aplicados

Parâmetro polarimétrico	Intervalo de valores esperados	Valores médios	Limiar global
$\delta_{hv}$	$-180^0 \leq \delta_{hv} \leq 180^0$	88,8316°	35°
$ \mu_{hv} $	$0 \leq  \mu_{hv}  \leq 1$	0,7138	0,35
$H_w$	$0 \leq H_w \leq 1$	0,3744	0,90
$p$	$0 \leq p \leq 1$	0,8512	0,35
$\mu_c$	$\mu_c \geq 0$	0,1018	0,40
$H_{FP}$	$0 \leq H_{FP} \leq 1$	0,2845	0,70

A imagem ALOS PALSAR ALPSRP179000580 foi selecionada como referência por ser o caso mais desafiador do dataset devido à agitação da superfície oceânica, bem como sugerido pelo dado auxiliar do escaterômetro e pelo cálculo do índice RSPoIF (apresenta o nível MA de agitação). Assim, os limiares globais utilizados em cada parâmetro HP foram calculados para todas as cenas do dataset com base nesta imagem de referência. Testou-se o mesmo procedimento em outras imagens, mas verificou-se que tais thresholds globais estabelecidos para a imagem ALOS PALSAR ALPSRP179000580

serviam bem para todos os parâmetros em todas as demais cenas e, portanto, não havendo a necessidade de recalculá-los a cada nova cena.

Figura 4.2 – Exemplo de limiares globais aplicados com base nos comportamentos esperados para os parâmetros HP para um alvo significativo da cena.



Os valores de limiarização global para cada um dos parâmetros HP são mostrados na forma de plano de corte. Nota-se a diferença entre os valores dos alvos e seus arredores, ratificando a capacidade dos parâmetros HP em diferenciá-los. O mesmo alvo é observado para todos os parâmetros HP.

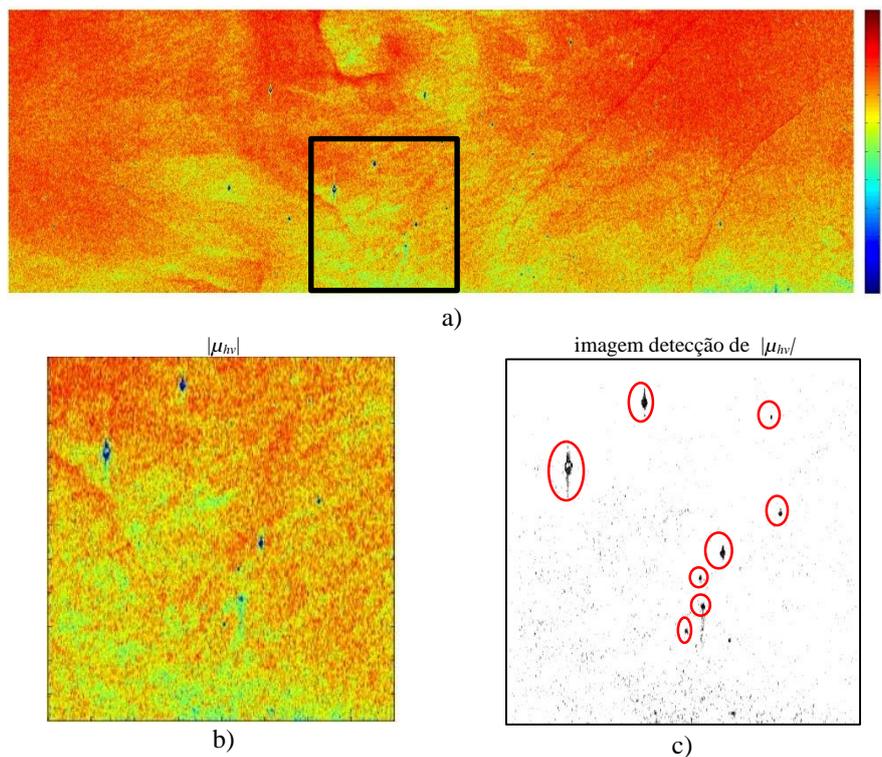
Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

Este aspecto (um mesmo limiar para todas as cenas de todas as imagens de um mesmo parâmetro) já demonstra que o uso destes parâmetros HP para a detecção de alvos torna tal tarefa muito mais viável, além de mostrar que um simples algoritmo de decisão baseado em um limiar global é uma técnica suficientemente robusta devido à clara caracterização da diferença entre mar-alvo metálico na maioria dos casos. Também, é possível observar que a maior variação ocorre entre os valores de pixels do mar. Os valores dos alvos metálicos flutuam conforme suas características estruturais, mas com uma variação menor do que para o *background* oceânico.

O efeito da variabilidade do *background* sobre o desempenho da detecção pode ser observado especificamente através da Figura 4.3, na qual a imagem de  $|\mu_{hv}|$  é investigada. Para uma melhor observação, na imagem  $|\mu_{hv}|$  (Figura

4.3a) uma região de interesse é apontada por um retângulo preto (Figura 4.3b). O resultado da detecção pode ser visto na Figura 4.3c. Isto mostra que o resultado da detecção foi fortemente afetado pelos FA. Isto confirma que a grande variação dos valores do *background* oceânico (a agitação da superfície marinha) é responsável pela geração de falsos alarmes. Ratifica-se que aqui se ignoram as possibilidades de presença de rochas e de ilhas estarem presentes na cena. Nas Tabelas 4.1 e 4.2, observa-se que não há uma regra geral entre a ocorrência de FA e os índices RSPoIF. De fato,  $|\mu_{hv}|$  pode apresentar baixa taxa de FA mesmo quando RSPoIF é elevado. Porém, predominantemente, no caso de alguns parâmetros como o próprio  $|\mu_{hv}|$ , quando há alto nível de FA, nota-se a ocorrência de elevada agitação oceânica reportada pelo RSPoIF.

Figura 4.3 – Influência da agitação da superfície do mar sobre o parâmetro  $|\mu_{hv}|$ .



Detalhes relacionados à imagem ALPSRP179000580: (a) toda a cena  $|\mu_{hv}|$ ; (b) visualização em detalhe da área assinalada pelo retângulo em preto; (c) imagem detecção de  $|\mu_{hv}|$  pelo limiar global, onde alvos e FA são ambos visíveis.

Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

Os procedimentos para calcular o RSPoIF permitem também que se identifiquem áreas específicas na imagem que apresentem variabilidade acima da média da cena, ou seja, é possível apontar sub-regiões onde ocorram fortes variações de valores, sendo outra importante contribuição do presente estudo. O procedimento apresentado na Subseção 3.2.1 utiliza uma janela de 100 x 100 pixels (uma área aprox.. 1,5 x 1,5km, dadas as resoluções das imagens utilizadas) e nesta investigação específica, uma janela de 30 x 30 pixels (ou cerca de 150 x 150m em geral) é implementada. Este tamanho de janela foi empiricamente estabelecido com base nas dimensões dos alvos e na resolução espacial da imagem, mas podem ser ajustadas conforme a necessidade.

Deste modo, para tal identificação, é suficiente que apenas os procedimentos até o cálculo da norma do gradiente seja efetuado (vide Figura 3.2). Como exemplo, a Figura 4.4 apresenta a análise realizada sobre  $\mu_c$  nesta mesma cena ALOS PALSAR. A Figura 4.4a mostra que  $\mu_c$  apresenta um valor de RSPoIF de 0,1013 (MB, conforme a escala), mas também apresenta muitos FA (DSS=1,92), vistos na Figura 4.4a e indicados na Tabela 4.3. Na Figura 4.4b, encontra-se o recorte sinalizado pelo retângulo vermelho na Figura 4.4a. A Figura 4.4c mostra a imagem binária como o resultado das detecções após a limiarização. Observa-se que há dois alvos detectados entre outros FA. A imagem normal resultado da operação com a janela de 30 x 30 pixels pode ser vista na Figura 4.4d. Nota-se que altos valores de norma aparecem não somente em áreas onde há alvos metálicos, mas também em áreas onde há somente a superfície marinha. Isto explica o surgimento de FA e provavelmente está relacionado com as características deste parâmetro HP, pois ele é uma medida de rugosidade e, a depender da intensidade desta rugosidade e de como os elementos estão dispostos na superfície, pode referir-se a aspectos de espalhamento volumétrico (OSTRO, 1993). O desempenho de  $\mu_c$  associado a estas características apresentadas sugerem o uso de um algoritmo detecção adaptativo.

Figura 4.4 – Análise das influências do ambiente sobre o desempenho de  $\mu_c$  na imagem ALPSRP179000580.

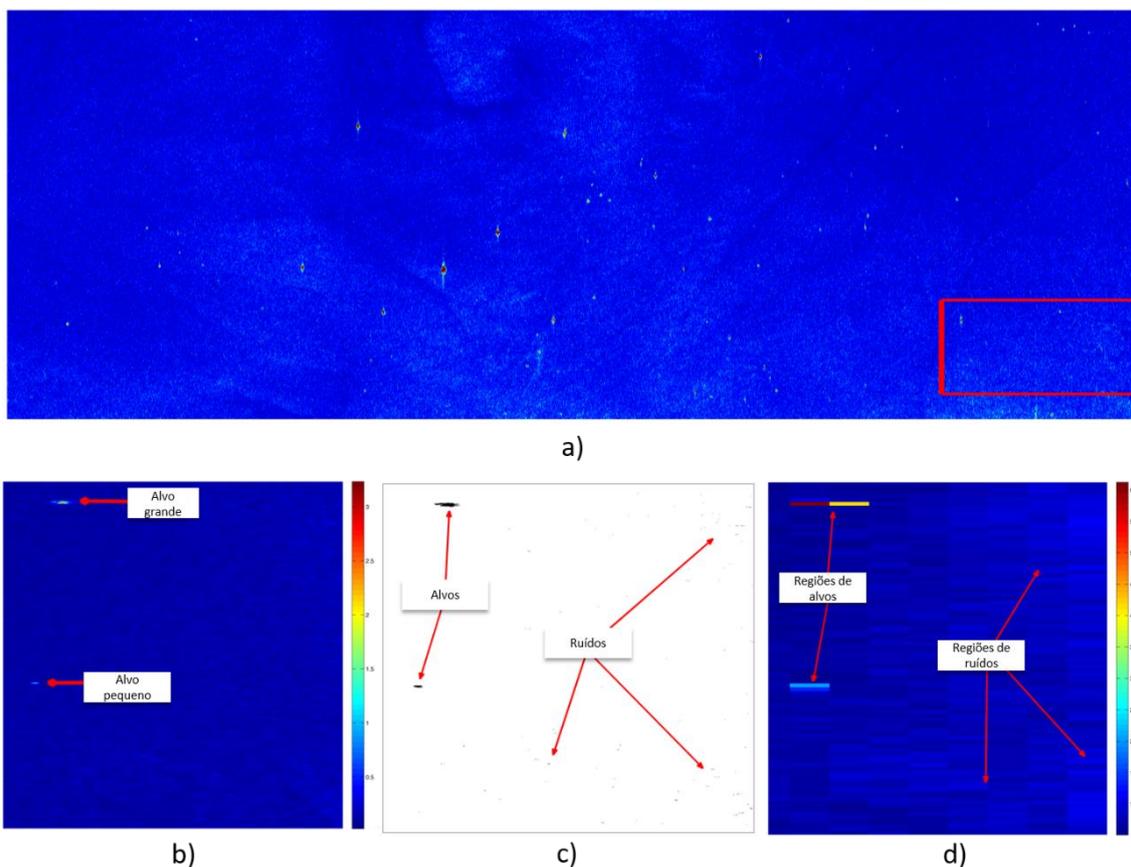


Imagem  $\mu_c$  investigada: (a) toda a cena conforme  $\mu_c$ ; (b) Visualização em detalhe do retângulo vermelho em (a) com dois alvos em destaque; (c) resultado da detecção após a limiarização. Os dois alvos são detectados, mas também são muitos os FA; (d) imagem norma do gradiente de  $\mu_c$ , obtida através de janelas de 30 x 30 pixels, sugerindo que em ambas as estas há valores que superam o limiar aplicado e que procedimentos adaptativos são necessários.

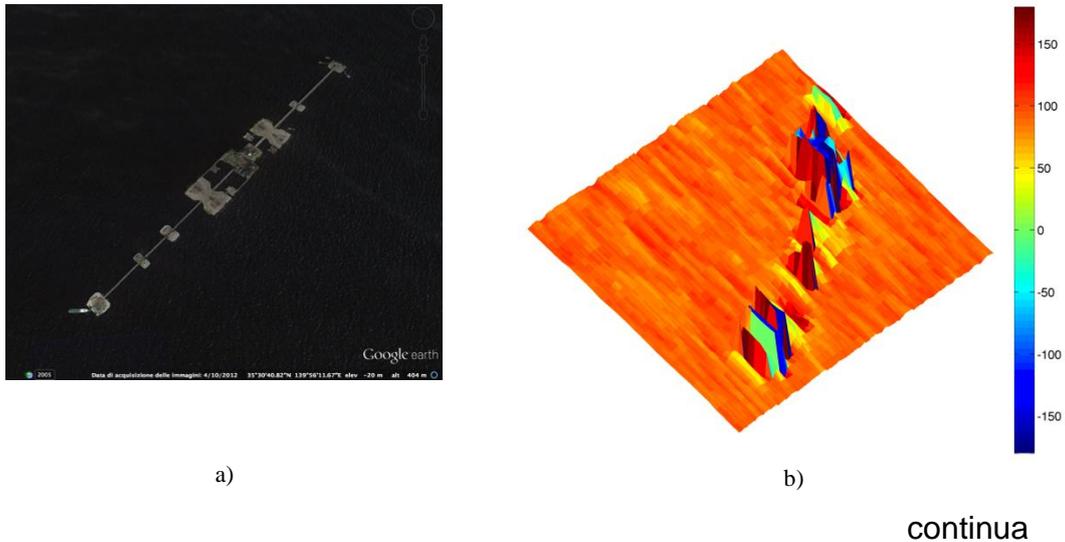
Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

O efeito das características dos alvos sobre o desempenho nas detecções pode ser visto na Figura 4.5, onde há um alvo metálico com verdade de campo localizado na Baía de Tóquio (Figura 4.5a). O parâmetro HP analisado é  $\delta_{hv}$ , pois resulta em muitos alvos perdidos (AP) em todos os casos processados. A imagem relativa a  $\delta_{hv}$  é vista na Figura 4.5b, onde se observa que seus valores referentes ao plano de estruturas praticamente se confundem com os valores do mar. Isto ocorre porque  $\delta_{hv}$  analisa o mecanismo de *bouncing*. Assim, nos trechos do alvo onde se verificam planos sem elementos verticais, o

mecanismo predominante será aquele de rebatimento simples caracterizado por um ângulo de aproximadamente  $90^\circ$ . Este comportamento peculiar faz com que os valores dos sinais de retorno sejam muito próximos ou iguais aos do oceano, causando a falha nas detecções por perda de alvos, justificando a alta taxa de AP.

Este comportamento é posteriormente confirmado ao analisar-se um corte transversal sobre as imagens  $\delta_{hv}$ ,  $H_w$ , e  $|S_{HH}|$  (Figura 4.5c). Observa-se que nem  $H_w$ , nem  $|S_{HH}|$  são capazes de distinguir entre espalhamentos do tipo *single* e *double bouncing*, enquanto isto é possível através de  $\delta_{hv}$ . Valores positivos de  $\delta_{hv}$  indicam um mecanismo de rebatimento do tipo múltiplo em pares (*even bouncing*); valores negativos indicam aqueles do tipo múltiplo em números ímpares (*odd bouncing*); e valores próximos de  $+90^\circ$  indicam rebatimento direto (*single bouncing*).

Figura 4.5 – Efeito das características do alvo sobre o desempenho da detecção.



continuação e final - Figura 4.5

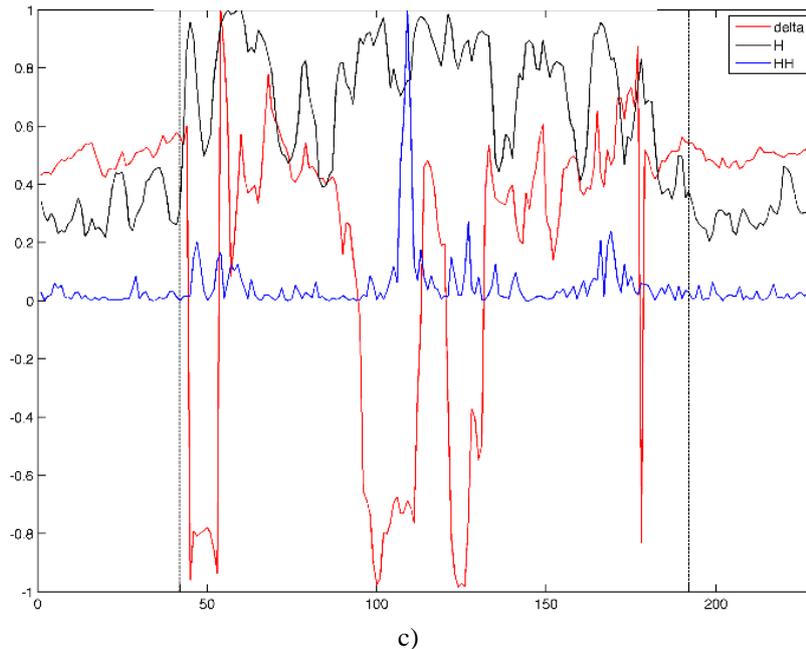


Imagem ALOS PALSAR PASL1100810090119391207120028. Região da Baía de Tóquio: (a) Exemplo de alvo metálico (estrutura portuária para atracação de navios) visto na imagem Google Earth; (b) imagem  $\delta_{hv}$  relativa à cena. Nota-se que este parâmetro é muito sensível às características da superfície do alvo (ou *deck*). Decks planos (sem elementos verticais) provocam *single bouncing* e seus valores tornam-se indistinguíveis do mar ao redor. (c) o corte transversal sobre o referido alvo é comparado entre  $\delta_{hv}$  (vermelho),  $H_w$  (preto), e  $|S_{HH}|$  (azul). As linhas pontilhadas verticais indicam o início e o final do alvo, sendo os demais pixels relativos ao mar.

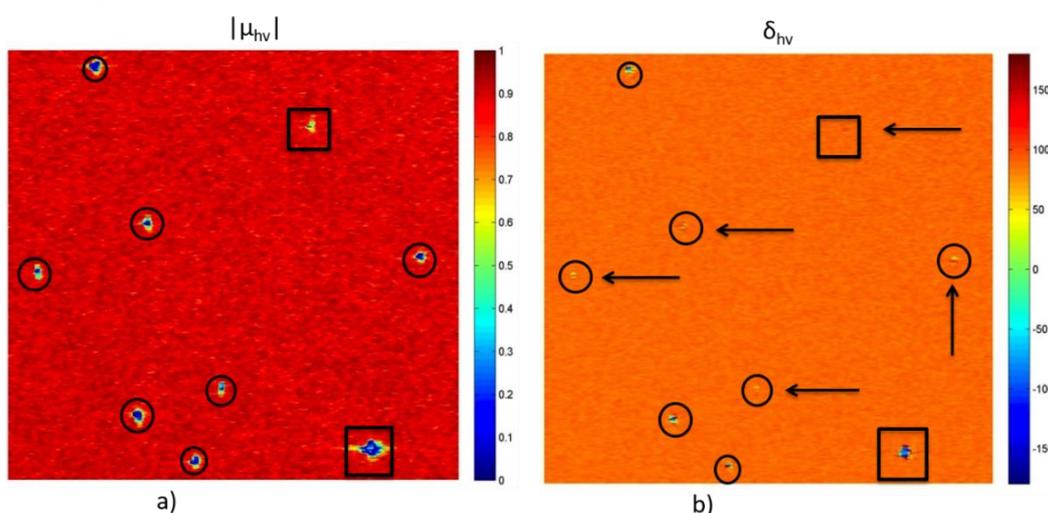
Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

É importante notar que esta característica de  $\delta_{hv}$  é independente das dimensões do alvo, por exemplo, alvos com fortes respostas em outros parâmetros (veja  $|\mu_{hv}|$  na Figura 4.6a) podem ser observados com baixo retorno em  $\delta_{hv}$ , ou mesmo serem indistinguíveis dos pixels dos arredores referentes ao mar devido ao convés plano (Figura 4.6b). Além disto,  $|\mu_{hv}|$  apresenta-se como um parâmetro HP de alta sensibilidade a FA, mas também capaz de permitir a detecção de alvos pequenos (Figura 4.7a). Este mesmo alvo é confirmado através da detecção por meio de técnica *dual-pol* (Figura 4.7b) utilizada aqui para fins de confirmação (NUNZIATA; MIGLIACCIO; BROWN, 2012), mas tal alvo é perdido se depender da caracterização por  $\delta_{hv}$  (Figura 4.7c), pois provavelmente seu convés não apresenta elementos que

contribuam para os rebatimentos dos tipos *even* ou *odd*. Os resultados apresentados nas Figuras 4.6 – 4.8 demonstram que  $\delta_{hv}$  não é adequado para detectar certos tipos de alvos devido ao arranjo de elementos espalhadores em suas superfícies. Este fraco desempenho não depende do tamanho dos alvos.

Com o propósito de analisar melhor este fato, a resposta polarimétrica copolarizada relacionada ao alvo perdido por  $\delta_{hv}$  (vide Figura 4.7c) foi gerada e contrastada com uma resposta também copolarizada para uma porção de mar colhido nas cercanias do alvo (Figura 4.8). É possível perceber que a resposta polarimétrica copolarizada da superfície do mar (Figura 4.8a) é praticamente indistinguível da resposta do alvo analisado (Figura 4.8b). Esta análise confirma que ambos os resultados apresentam um mecanismo de espalhamento dominante do tipo reflexão simples (ou *single bouncing*). Observa-se também que a resposta deste alvo resulta em um pedestal que é apenas ligeiramente mais elevado do que aquele para a superfície do mar.

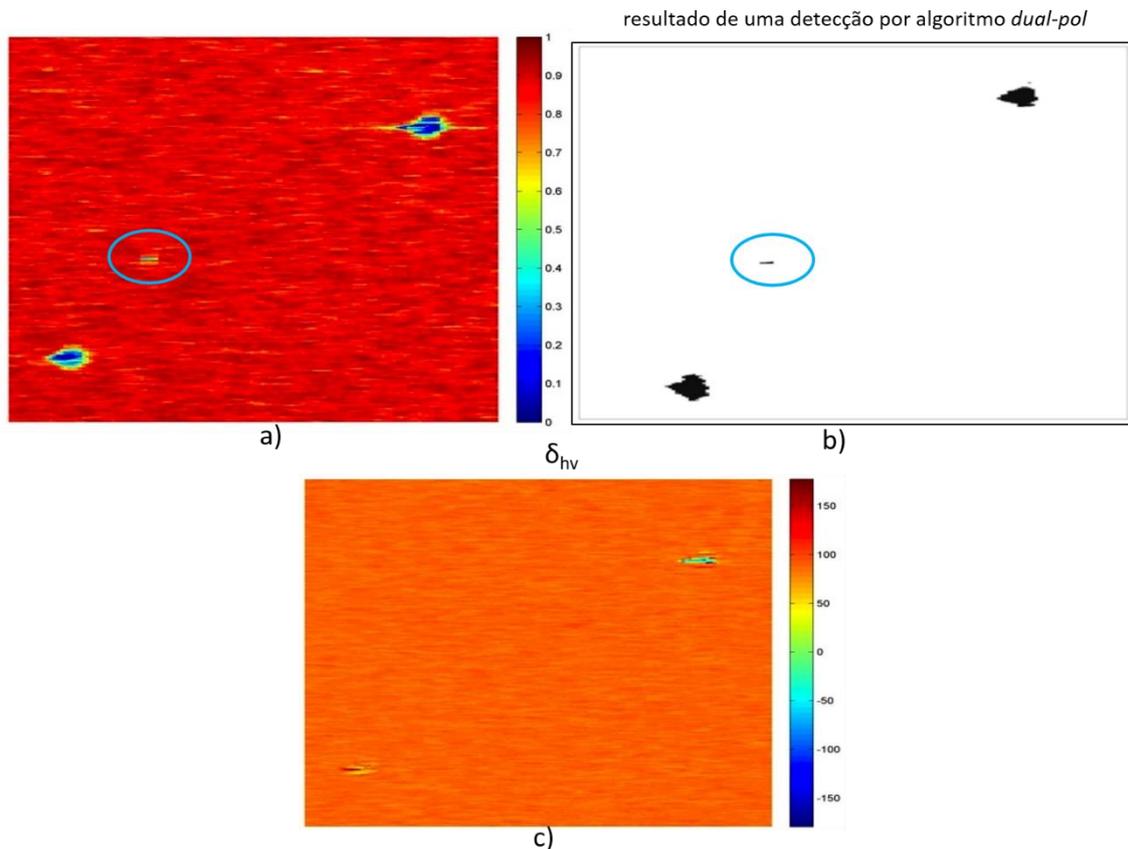
Figura 4.6 – Independência de  $\delta_{hv}$  às dimensões dos alvos metálicos.



Comportamento dos parâmetros  $|\mu_{hv}|$  e  $\delta_{hv}$  frente às características dos alvos: (a)  $|\mu_{hv}|$  apresenta facilidade para detectar variados tipos e dimensões de alvos; (b)  $\delta_{hv}$  não é capaz de distinguir alguns alvos. Nota-se que mesmo alvos com forte retorno em  $|\mu_{hv}|$  (alvos metálicos,  $|\mu_{hv}| \sim 0$ ) se confundem com o retorno característico para o mar. Isto ratifica a dependência da presença de elementos espalhadores na superfície destes alvos para gerar retorno de sinal diferente dos valores de *single bouncing* (cerca de  $90^\circ$ ).

Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

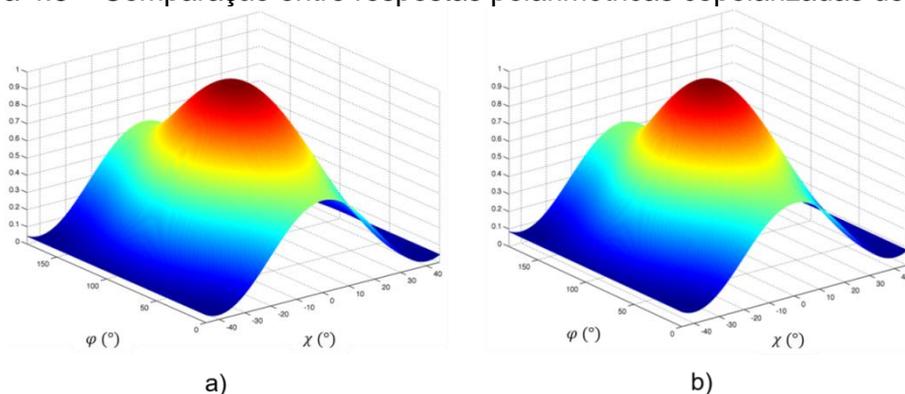
Figura 4.7 – Capacidade de  $|\mu_{hv}|$  em perceber pequenos alvos.



Verificação da sensibilidade de  $|\mu_{hv}|$  permite notar que pequenos alvos podem ser detectados (a). A veracidade dos alvos analisados, principalmente daquele assinalado com a elipse azul, foi confirmada por meio de outras técnicas robustas baseadas em um algoritmo *dual-pol Reflection Symmetry* (b). Ainda que pequeno, o alvo apontado pela elipse azul em (a) não pode ser visto em  $\delta_{hv}$  provavelmente devido à presença e à disposição dos elementos em sua superfície.

Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

Figura 4.8 – Comparação entre respostas polarimétricas copolarizadas de alvo e mar.



Respostas polarimétricas copolarizadas da imagem do parâmetro  $\delta_{hv}$ : (a) região de superfície do mar adjacente ao alvo perdido; (b) área do alvo perdido (vide Figura 4.7c).

Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

## 4.2. Limiarização adaptativa

A fim de analisar em mais detalhes a *performance* dos parâmetros HP contra os FA, uma abordagem CFAR é considerada. Dois parâmetros HP que apresentaram as maiores taxas de FA são reanalisados sob o processamento adaptativo:  $|\mu_{hv}|$  e  $\mu_c$  (vide Tabelas 4.1, 4.2, 4.3). Esta reanálise permite que mais informações sejam obtidas sobre o papel da variabilidade da superfície marinha sobre a geração de FA. De fato, comparando os resultados obtidos pelos *thresholds* globais e pelos adaptativos é possível entender se FA obtidos ocorrem devido a uma indevida seleção de um limiar ou se pela elevada agitação do mar.

Para proceder com as detecções através do algoritmo CFAR, a distribuição estatística do background oceânico é analisada por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS). Os resultados do teste KS para o parâmetro  $|\mu_{hv}|$  indicam uma distribuição predominantemente Weibull, tanto para imagens ALOS PALSAR, quanto para imagens Radarsat-2. Em relação ao parâmetro  $\mu_c$ , diferentes comportamentos ocorrem para imagens ALOS PALSAR e Radarsat-2. No caso da primeira, a distribuição aproxima-se de uma log-normal. Enquanto que para o segundo caso, a distribuição Weibull é a que melhor se ajusta. Um algoritmo CA-OS CFAR é implementado (GUIDA;

LONGO; LOPS, 1993; CUI; YANG; YAMAGUCHI, 2011) e aplicado às imagens dos parâmetros HP  $|\mu_{hv}|$  e  $\mu_c$ .

O algoritmo CA-OS CFAR aplicado sobre a distribuição Weibull consiste em duas janelas sobrepostas de dimensões 5 x 5 pixels e 30 x 30 pixels, interna e externa, respectivamente. Tanto as dimensões das janelas, quanto a probabilidade de falso alarme (PFA) são definidas empiricamente. A PFA selecionada foi de  $10^{-4}$ . O algoritmo CA-OS CFAR aplicado sobre a distribuição log-normal consiste em janelas sobrepostas, interna e externa, de 10 x 10 pixels e de 100 x 100 pixels, respectivamente. A PFA usada foi de  $10^{-5}$ . Como particularidade, para imagens Radarsat-2, os melhores desempenhos de  $\mu_c$  são obtidos quando diferentes configurações são aplicadas (janelas de 5 x 5 e 20 x 20; PFA =  $10^{-2}$ ). Por fim, realizou-se a comparação entre os desempenhos de  $|\mu_{hv}|$  e  $\mu_c$  assim como a análise em relação às suas respectivas sensibilidades à variabilidade do *background*.

Os resultados para  $|\mu_{hv}|$  e  $\mu_c$  estão sumarizados na Tabela 4.5, onde as métricas DoST e FoM podem ser observadas. Nota-se que houve melhoras no desempenho geral quando confrontado com os resultados da limiarização global (vide comparações nas Figuras 4.9 e 4.10). No entanto, a métrica FoM não é capaz de identificar o que ainda está afetando a *performance*, FA e AP. A métrica DoST apresenta esta capacidade, a qual pode ser observada na Figura 4.11 e Figura 4.12, onde um esquema para análise da *performance* de ambos os métodos, global e adaptativo, é estabelecido. Também são anotados os resultados relativos ao índice RSPoIF para cada cena. Na Figura 4.11, os índices DSS e DTSC relevantes a  $|\mu_{hv}|$  são esquematizados tanto para o *threshold* global, quanto para o CFAR.

Analisando todos os resultados das imagens geradas a partir de ALPSRP179000580, é possível notar que o CFAR obtém os melhores resultados em termos de FA (Falsos Alarmes), mas à custa de um aumento de AP (Alvos Perdidos). Por sua vez, limiares globais não apresentam AP, mas permitem muitos FA. Pode ser notado que nas demais cenas do conjunto de

dados, além de ALPSRP179000580, ambos os métodos de detecção apresentaram resultados semelhantes. Isto confirma a robustez dos parâmetros HP em distinguir alvos de seus arredores referentes ao background oceânico. A Figura 4.12 mostra um esquema para análise global do desempenho de  $\mu_c$ . Verifica-se uma menor sensibilidade em relação à variabilidade oceânica em todas as cenas. Contudo, quando utilizando *threshold* global, um baixo índice de RSPoIF não implica necessariamente em poucos FA. Entretanto, este não é o caso quando se usa o CFAR, através do qual uma ótima *performance* é alcançada em todos os casos, à exceção da imagem ALPSRP179000580.

Tabela 4.5 - Imagens ALOS PALSAR e Radarsat-2. Resultados dos desempenhos com CFAR e conforme RSPoIF e as métricas DoST e FoM

IMAGEM ALOS PALSAR ALPSRP179000580				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$ \mu_{hv} $	1,0938 (MA)	0	0,82	0,82
$\mu_c$	0,1013 (MB)	0,48	0,96	0,64

IMAGEM ALOS PALSAR ALPSRP104460560				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$ \mu_{hv} $	0,7813 (A)	0	1,00	1,00
$\mu_c$	0,0775 (MB)	0	1,00	1,00

IMAGEM ALOS PALSAR ALPSRP104460570				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$ \mu_{hv} $	0,95 (MA)	0	1,00	1,00
$\mu_c$	0,0654 (MB)	0	1,00	1,00

IMAGEM ALOS PALSAR PASL1100810090119391207120028				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$ \mu_{hv} $	0,9770 (MA)	0	1,00	1,00
$\mu_c$	0,1455 (MB)	0	1,00	1,00

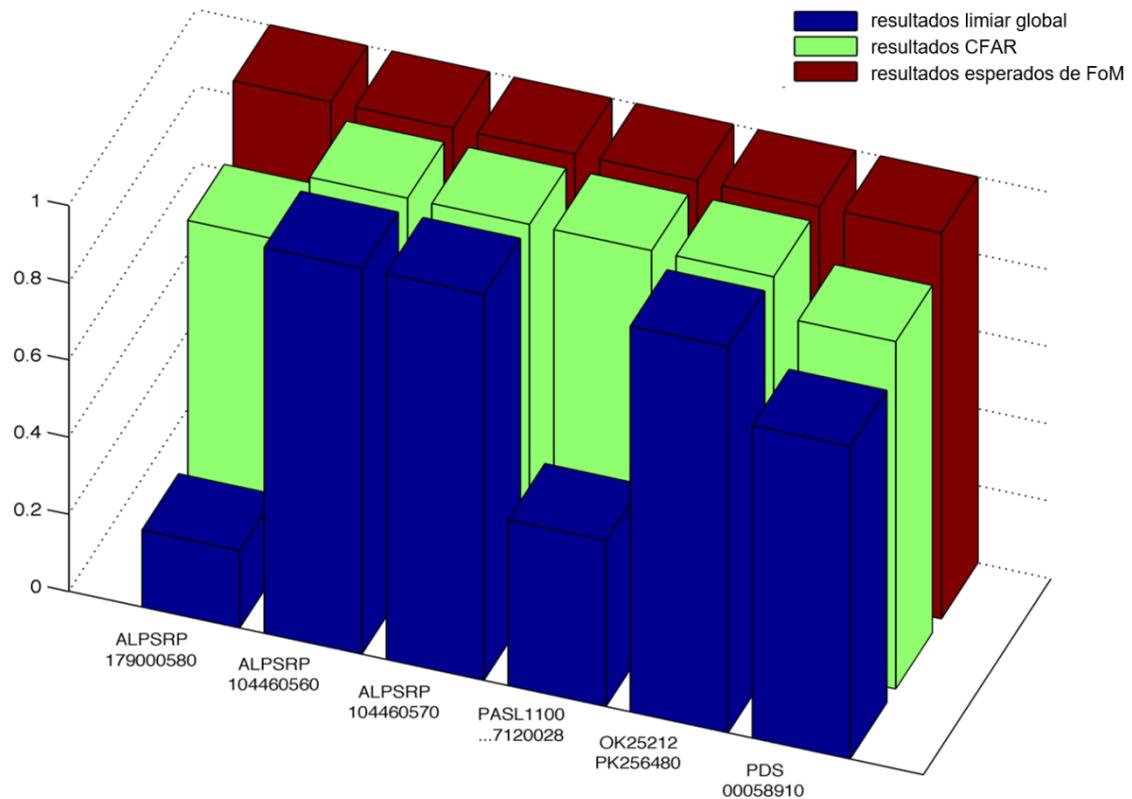
  

IMAGEM RADARSAT-2 OK25212_PK256480				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$ \mu_{hv} $	0,5852 (M)	0	1,00	1,00
$\mu_c$	0,0304 (MB)	0	1,00	0,70

IMAGEM RADARSAT-2 PDS_00058910				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	DoST		FoM
		DSS	DTSC	
$ \mu_{hv} $	0,4984 (M)	0,11	1,00	0,90
$\mu_c$	0,0362 (MB)	0	1,00	1,00

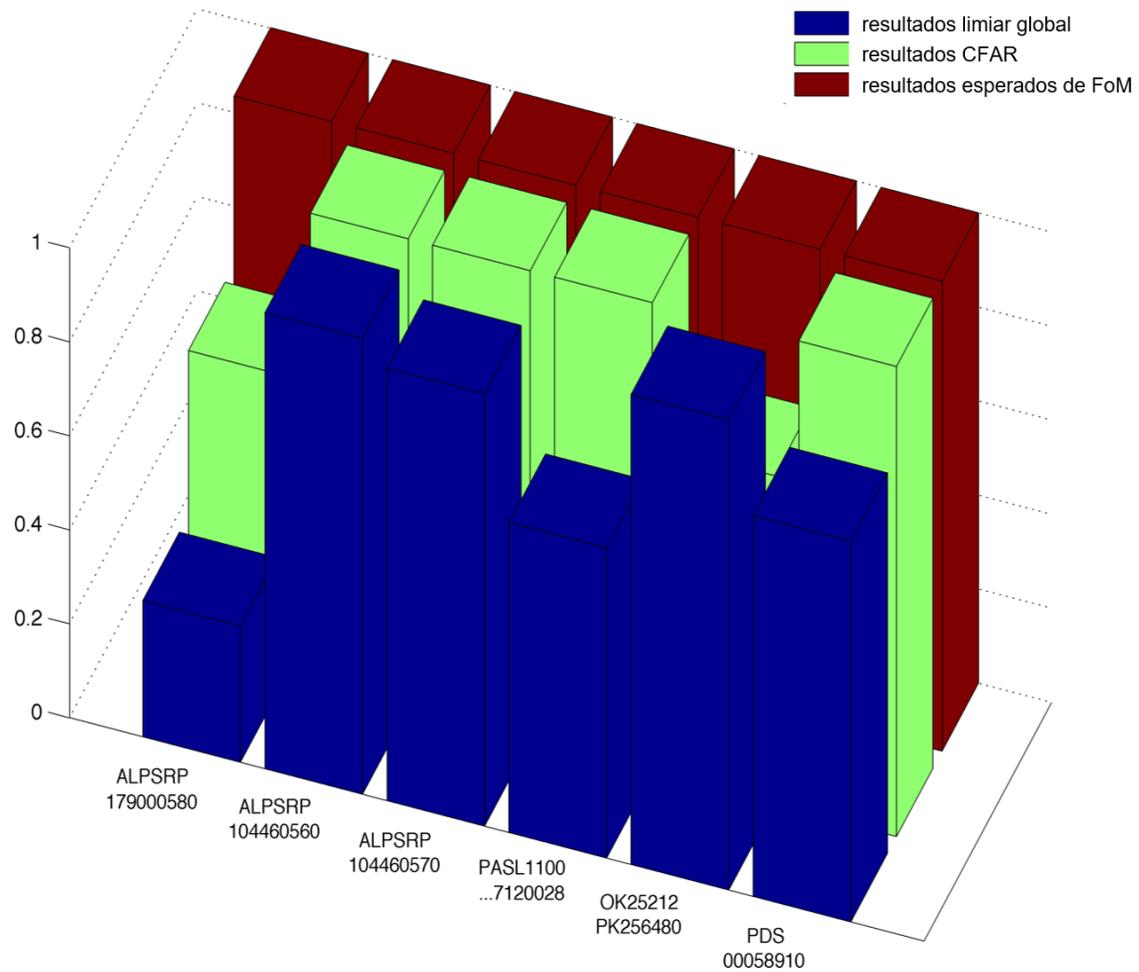
Figura 4.9 – Análise do desempenho de  $|\mu_{hv}|$  conforme FoM para cada imagem SAR.



Observa-se a comparação entre os resultados obtidos para um limiar global e para o CFAR para cada imagem SAR processada, conforme a FoM. Os valores esperados para a FoM de cada imagem estão representados pelas barras em vermelho (FoM = 1). Os resultados para o limiar global e o CFAR estão representados pelas barras azuis e verdes, respectivamente. A métrica FoM dá uma ideia geral sobre o comportamento dos métodos aplicados, mas não explica o que interfere na performance (ex.: FA ou AP).

Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

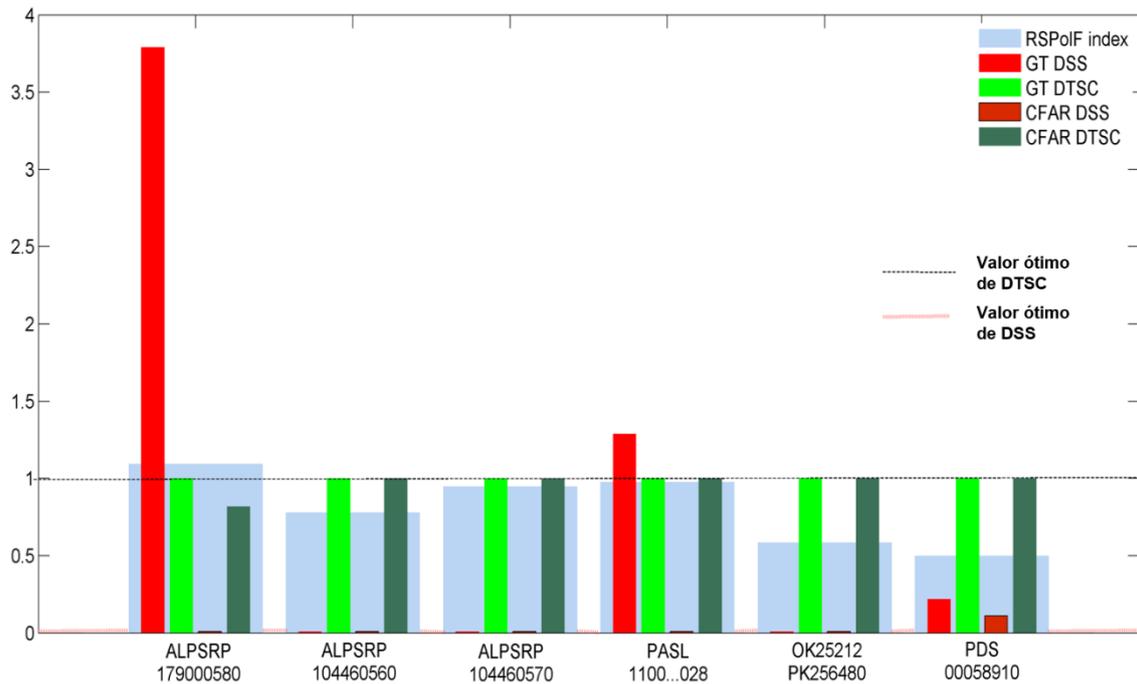
Figura 4.10 - Análise do desempenho de  $\mu_c$  conforme FoM para cada imagem SAR.



Observa-se a comparação entre os resultados obtidos para um limiar global e para o CFAR para cada imagem SAR processada, conforme a FoM. Os valores esperados para a FoM de cada imagem estão representados pelas barras em vermelho (FoM = 1). Os resultados para o limiar global e o CFAR estão representados pelas barras azuis e verdes, respectivamente. A métrica FoM dá uma ideia geral sobre o comportamento dos métodos aplicados, mas não explica o que interfere na performance (ex.: FA ou AP).

Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

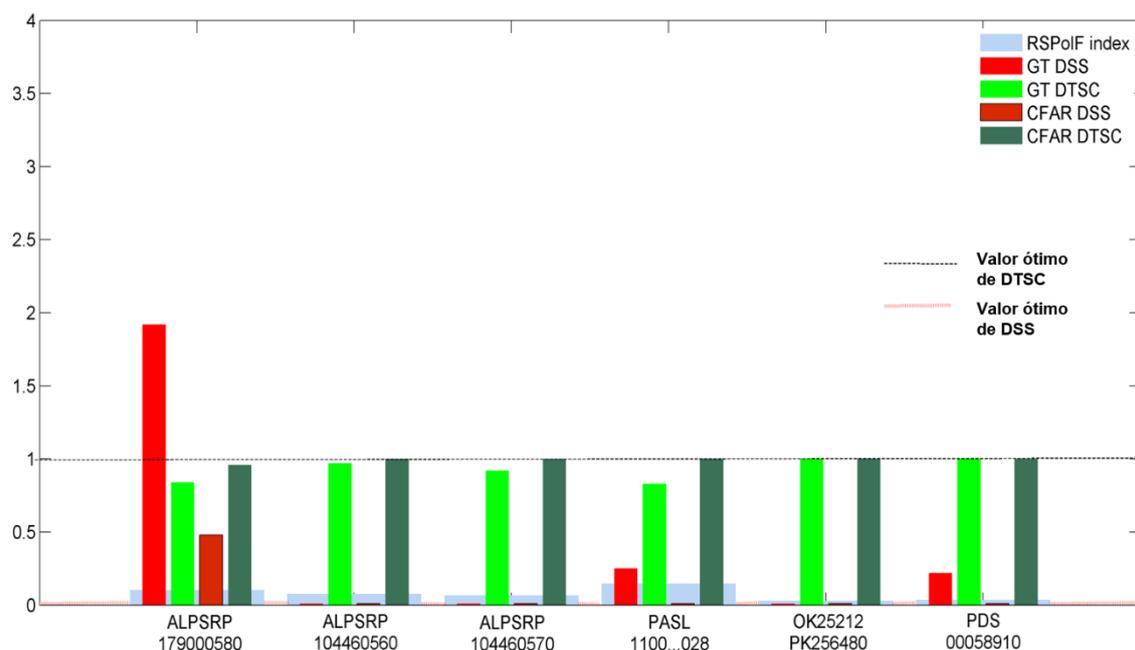
Figura 4.11 – Análise do desempenho de  $|\mu_{hv}|$  conforme DoST para cada imagem SAR.



Comparação entre os resultados da limiarização global (GT) e CA-OS CFAR contrastados com o índice RSPoIF (barra azul claro por trás de cada grupo de barras) obtido para cada imagem SAR. Em relação à limiarização global, os valores dos índices e a influência do estado de mar sobre as detecções (GT DSS) estão representados pelas barras vermelhas e os valores sobre a influência das características dos alvos (GT DTSC) podem ser vistos pelas barras verdes claras. Em relação ao desempenho da técnica CFAR, os resultados da influência da agitação do mar (CFAR DSS) e dos tipos de superfícies de alvos (CFAR DTSC) são representados pelas barras vermelhas escuras e verdes escuras, respectivamente. A linha pontilhada em preto indica o valor ótimo de DTSC e a linha pontilhada em vermelho (na base da figura) indica o valor ótimo de DSS.

Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

Figura 4.12 - Análise do desempenho de  $\mu_c$  conforme DoST para cada imagem SAR.



Comparação entre os resultados da limiarização global (GT) e CA-OS CFAR contrastados com o índice RSPoIF (barra azul claro por trás de cada grupo de barras) obtido para cada imagem SAR. Em relação à limiarização global, os valores dos índices sobre a influência do estado de mar sobre as detecções (GT DSS) estão representados pelas barras vermelhas e os valores sobre a influência das características dos alvos (GT DTSC) podem ser vistos pelas barras verdes claras. Em relação ao desempenho da técnica CFAR, os resultados da influência da agitação do mar (CFAR DSS) e dos tipos de superfícies de alvos (CFAR DTSC) são representados pelas barras vermelhas escuras e verdes escuras, respectivamente. A linha pontilhada em preto indica o valor ótimo de DTSC e a linha pontilhada em vermelho (na base da figura) indica o valor ótimo de DSS.

Fonte: Adaptado de Paes; Nunziata; Migliaccio (2015).

### 4.3. Associação dos índices RSPoIF às escalas de estado do mar e de Beaufort

Os resultados a seguir referem-se à avaliação dos índices RSPoIF, isto é, da sensibilidade relativa das feições polarimétricas à luz da escala de Beaufort (Anexo A) e da escala de estado do mar (ou Escala de Douglas) (Anexo B)

para a intensidade do vento. Foram obtidos dados complementares de altura significativa de onda<sup>13,14</sup> para as imagens Radarsat-2 e, para as imagens RISAT-1 obtiveram-se dados sobre a altura significativa de onda relativa<sup>15</sup> ao *swell* e ao vento de superfície. Ressalta-se que os bancos de dados consultados possuíam apenas informações para as imagens adquiridas após 2012. O casamento de informações foi possível apenas para as imagens listadas na Tabela 4.6. É possível notar que os índices RSPoIF apresentam correspondência com a escala de Beaufort, principalmente os parâmetros  $|\mu_{hv}|$  e  $H_w$ , pois são os mais sensíveis aos efeitos da agitação da superfície marinha pelo vento. Com base nas descrições da escala de Beaufort, toma-se como exemplo o caso da imagem Radarsat-2 OK27507\_PK281084 – Golfo de Nápoles, cuja intensidade do vento corresponde ao nível 5 nessa escala. Infere-se que as ondas possuam até 2,5m (que de fato corresponde à altura das ondas medida: 2m) e apresenta cristas e muita espuma de arrebentação de ondas (“carneiros”). Os dados disponíveis neste estudo não propiciam a um aprofundamento, mas este é um aspecto a ser investigado em trabalhos futuros. Por fim, o índice RSPoIF demonstra-se como promissor para estimar o estado de agitação do mar, apresentando correspondência com as conhecidas escalas de Douglas e de Beaufort.

---

<sup>13</sup> CCMMA – Centro Campano per il Monitoraggio e la Modellistica Marina e Atmosferica: <http://ccmma.uniparthenope.it/forecast/wave>

<sup>14</sup> Poseidon system: <http://poseidon.hcmr.gr/>

<sup>15</sup> ERDDAP - Easier access to scientific data: [http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/NWW3\\_Global\\_Best.graph](http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/NWW3_Global_Best.graph)

Tabela 4.6 - Associação dos índices RSPoIF às escalas de estado do mar e de Beaufort

Imagem Radarsat-2 OK27507_PK274987 – Costa sul da Sardenha						
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	Altura significativa de onda (m)		Vento de superfície (m/s)	Estado do mar Escala Douglas	Vento Escala de Beaufort
		Por vento	Por swell			
$\delta_{hv}$	0,08 (MB)	2 m		5 m/s	4 (agitado)	3 (brisa fraca)/ ondulação de 0,60-1,00 m
$ \mu_{hv} $	0,39 (M)					
$H_w$	0,55 (M)					
$p$	0,24 (B)					
$\mu_c$	0,05 (MB)					
Imagem Radarsat-2 OK27507_PK281084 – Golfo de Nápoles						
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	Altura significativa de onda (m)		Vento de superfície (m/s)	Estado do mar	Escala de Beaufort
		Por vento	Por swell			
$\delta_{hv}$	0,30 (B)	2 m		10 m/s	4 (agitado)	5 (brisa forte) / ondulação de 2,00 - 2,5 m
$ \mu_{hv} $	0,78 (A)					
$H_w$	0,78 (A)					
$p$	0,45 (M)					
$\mu_c$	0,28 (B)					
Imagem RISAT-1 142581021 – Costa da Cidade do Cabo						
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	Altura significativa de onda (m)		Vento de superfície (m/s)	Estado do mar <sup>8</sup>	Escala de Beaufort <sup>7</sup>
		Por vento	Por swell			
$\delta_{hv}$	0,52 (M)	1,5 m	1m	12 m/s	4 (agitado)	6 (vento fresco)/ ondulação de 3,5 a 4m  (mar grosso)
$ \mu_{hv} $	1,05 (MA)					
$H_w$	1,19 (MA)					
$p$	0,90 (MA)					
$\mu_c$	0,47 (M)					

A Tabela 4.7 possui apenas a simples associação dos índices RSPoIF às demais imagens usadas neste estudo, mas sem a confirmação por um dado complementar sobre o estado do mar, além da verificação do vento de superfície por meio de imagens de escaterômetros<sup>16</sup>, por exemplo, Windsat, Oceansat-2, Quickscat. As imagens SAR processadas foram adquiridas entre 2008 e 2010 e, portanto, não foi possível precisar os valores de altura significativa de ondas, nem encontrar em bases de dados gratuitas tais informações. Deste modo, as informações contidas na Tabela 4.7 são uma verificação bastante próxima das condições ambientais reais em cada cena, pois baseiam-se na descrição do provável tipo de onda encontrada na escala de Beaufort.

Apesar das aproximações, observa-se que há correspondência entre os níveis Alto (A) e Muito Alto (MA) de RSPoIF extraídos dos parâmetros  $|\mu_{hv}|$  e  $H_w$  com os níveis de 5 a 6 na escala de Beaufort. Estas correspondências também podem ser verificadas para as situações encontradas na Tabela 4.6, isto é, para  $|\mu_{hv}|$  e  $H_w$ , índices A e MA correspondendo aos níveis 5 e 6 na escala de Beaufort, respectivamente. A métrica proposta neste estudo demonstra-se promissora e poderá ser aprimorada em pesquisas futuras obtendo-se dados ambientais mais precisos.

Tabela 4.7 - Associação dos índices RSPoIF à escala de Beaufort

IMAGEM ALOS PALSAR ALPSRP179000580				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	Vento de superfície (m/s)	Escala de Beaufort <sup>7</sup>	Altura provável da vaga (m)
$\delta_{hv}$	0,3205 (B)	5 – 10	a 5 (brisa forte)	0,6 – 1 a 2 – 2,5
$ \mu_{hv} $	1,0938 (continuação – Tabela 4.7)			
$H_w$	1,1018 (MA)			
$p$	0,8597 (MA)			

continua

<sup>16</sup> ERDDAP - Easier access to scientific data:  
[http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/NWW3\\_Global\\_Best.graph](http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/NWW3_Global_Best.graph)

$\mu_c$	0,1013 (MB)			
IMAGEM ALOS PALSAR ALPSRP104460560				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	Vento de superfície (m/s)	Escala de Beaufort <sup>7</sup>	Altura provável da vaga (m)
$\delta_{hv}$	0,199 (B)	3 – 5	3 (brisa fraca)	0,6 - 1
$ \mu_{hv} $	0,7813 (A)			
$H_w$	0,9731 (MA)			
$p$	0,5957 (M)			
$\mu_c$	0,0775 (MB)			

IMAGEM ALOS PALSAR PASL1100810090119391207120028

Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	Vento de superfície (m/s)	Escala de Beaufort <sup>7</sup>	Altura provável da vaga (m)
$\delta_{hv}$	0,2767 (B)	3 – 5	3 (brisa fraca)	0,6 - 1
$ \mu_{hv} $	0,95 (MA)			
$H_w$	0,9829 (MA)			
$p$	0,6412 (A)			
$\mu_c$	0,0654 (MB)			

IMAGEM ALOS PALSAR PASL1100810090119391207120028

Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	Vento de superfície (m/s)	Escala de Beaufort <sup>7</sup>	Altura provável da vaga (m)
$\delta_{hv}$	0,3697 (M)	5 – 13	3 (brisa fraca)	0,6 – 1
$ \mu_{hv} $	0,9770 (MA)		a	a
$H_w$	1,035 (MA)		6 (vento fresco)	3 - 4
$p$	0,783 (A)			
$\mu_c$	0,1455 (MB)			

IMAGEM RADARSAT-2 OK25212\_PK256480

Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	Vento de superfície (m/s)	Escala de Beaufort <sup>7</sup>	Altura provável da vaga (m)
$\delta_{hv}$	0,2138 (B)	5 – 8	3 (brisa)	0,6 – 1

continua

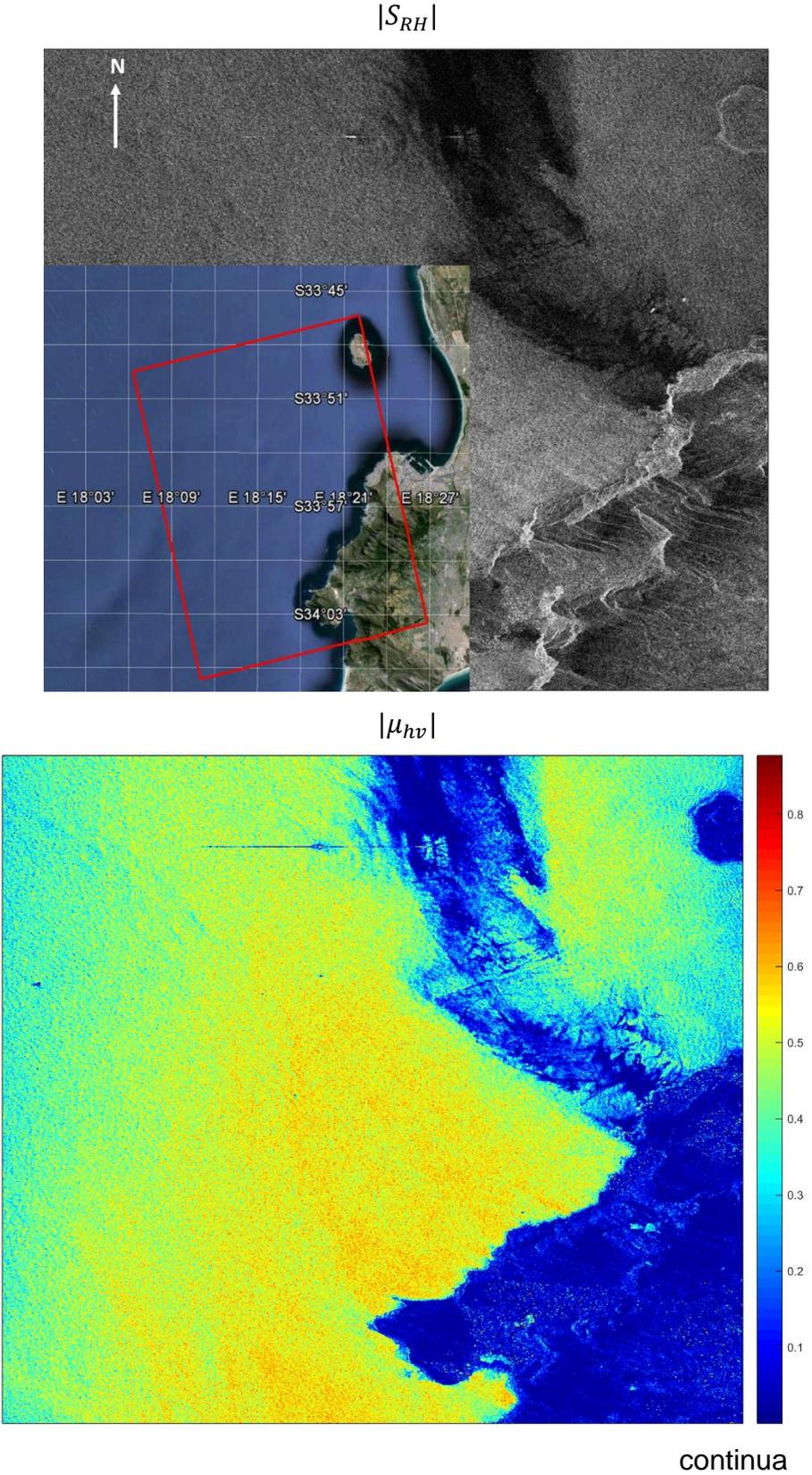
continuação e final – Tabela 4.7

$ \mu_{hv} $	0,5852 (M)		fraca)	a
$H_w$	0,7760 (A)		a	2 – 2,5
$p$	0,3668 (M)		5 (brisa forte)	
$\mu_c$	0,0304 (MB)			
IMAGEM RADARSAT-2 PDS_00058910				
Parâmetro polarimétrico	RSPoIF	Vento de superfície (m/s)	Escala de Beaufort <sup>7</sup>	Altura provável da vaga (m)
$\delta_{hv}$	0,1579 (B)			
$ \mu_{hv} $	0,4984 (M)		5 (brisa forte)	2 – 2,5
$H_w$	0,6601 (A)	8 – 13	a	a
$p$	0,3492 (B)		6 (vento fresco)	3 – 4
$\mu_c$	0,0362 (MB)			

#### 4.4. Imagens SAR HP reais do satélite RISAT-1: limiarização global

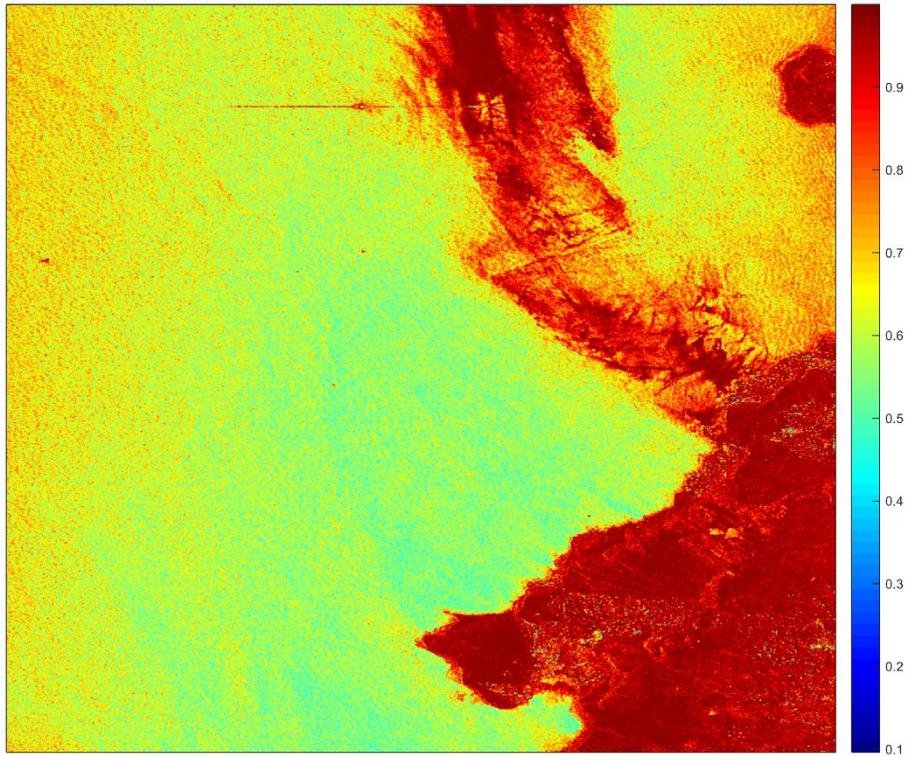
A Figura 4.13 mostra a imagem HP real do satélite RISAT-1 e os demais parâmetros polarimétricos, onde a área imageada é a costa da Cidade do Cabo (África do Sul). A imagem possui resolução espacial de 6 x 3m em *slant range* e cobre uma área de 30 x 10km. A Figura 4.14 mostra o resultado para limiarização global através dos valores propostos na Tabela 4.2. Esta limiarização visa ratificar a robustez dos parâmetros HP, isto é, visa mostrar que através destes recursos polarimétricos é possível caracterizar muito distintamente alvo e mar, sendo necessárias pequenas adaptações. Afinal, ainda que a agitação oceânica possa causar FA, o intervalo de variação de valores do mar é muito diferente (muito mais alto ou baixo, conforme parâmetro polarimétrico) do que o intervalo de valores referentes aos alvos metálicos.

Figura 4.13 – RISAT 1: Imagem SAR RH intensidade e demais parâmetros HP.

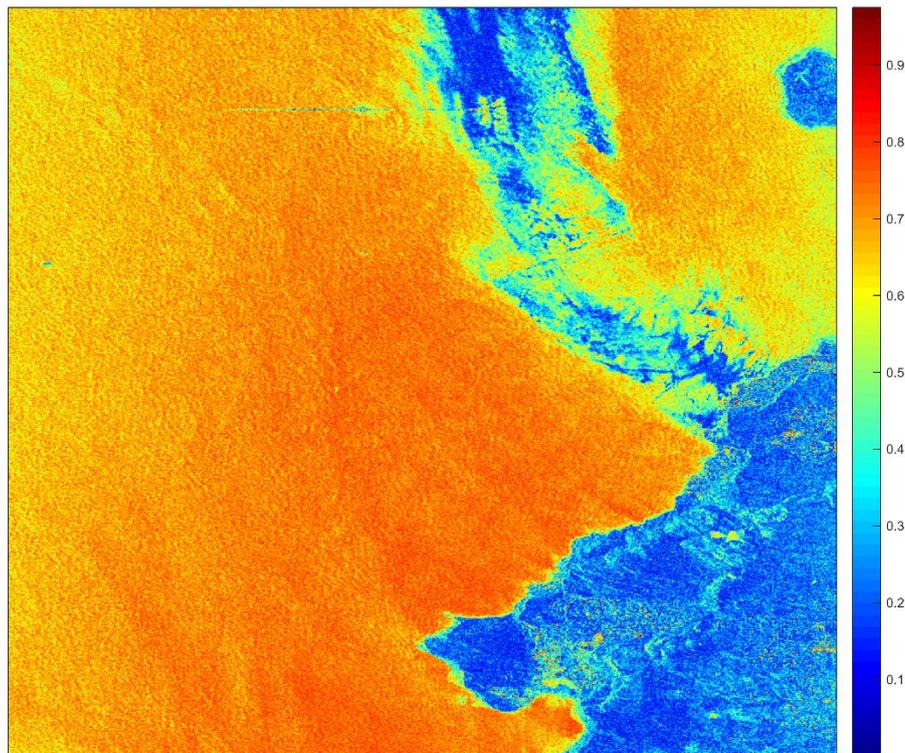


continuação - Figura 4.13

$H_w$

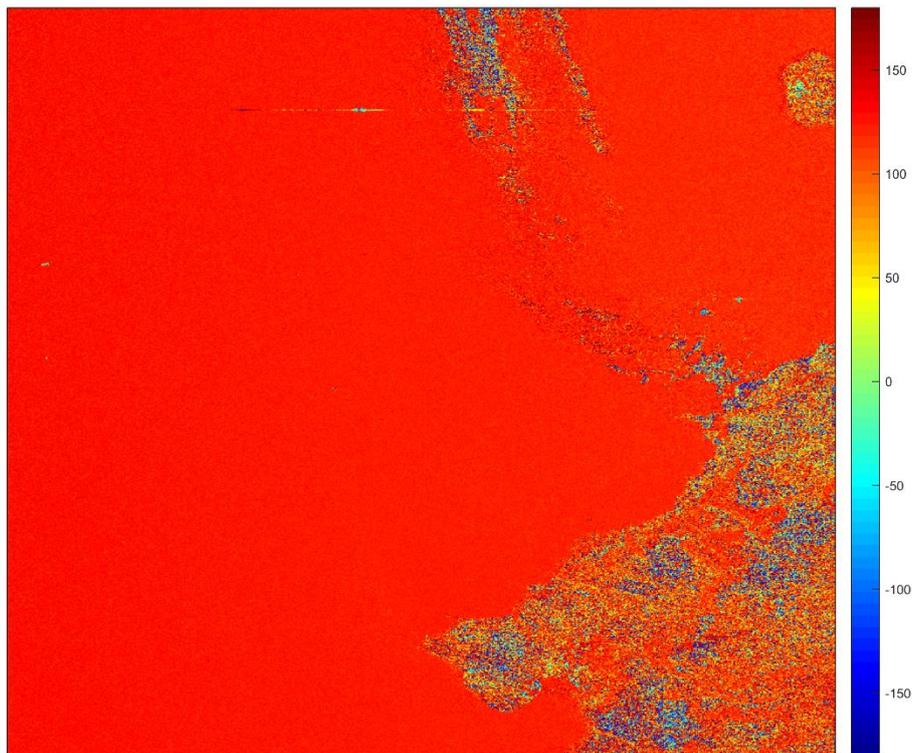


$p$



continua

$\delta_{hv}$



$\mu_c$

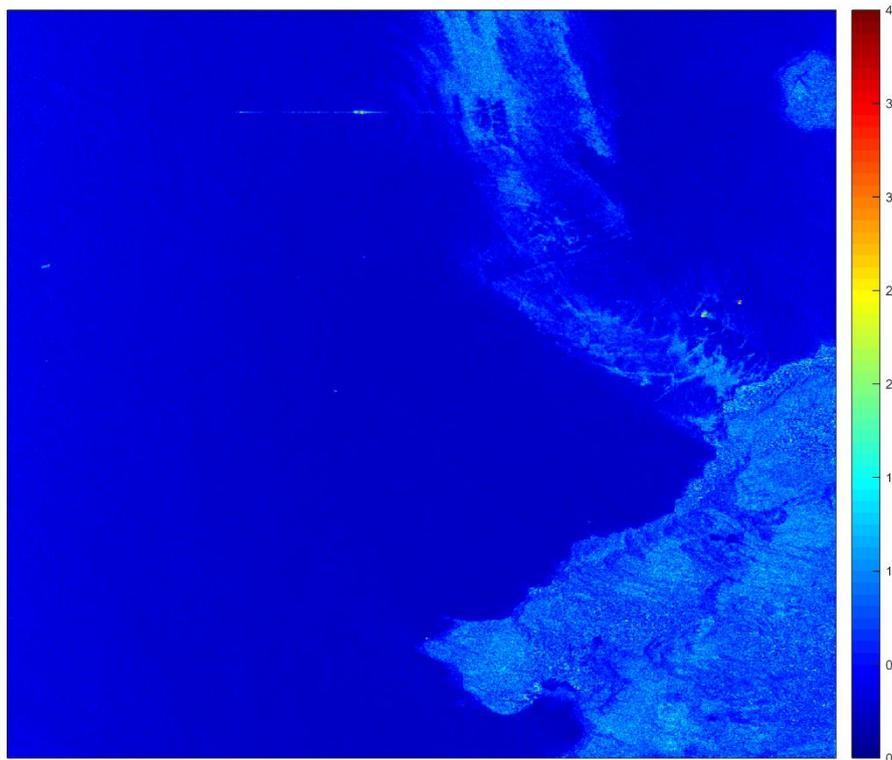
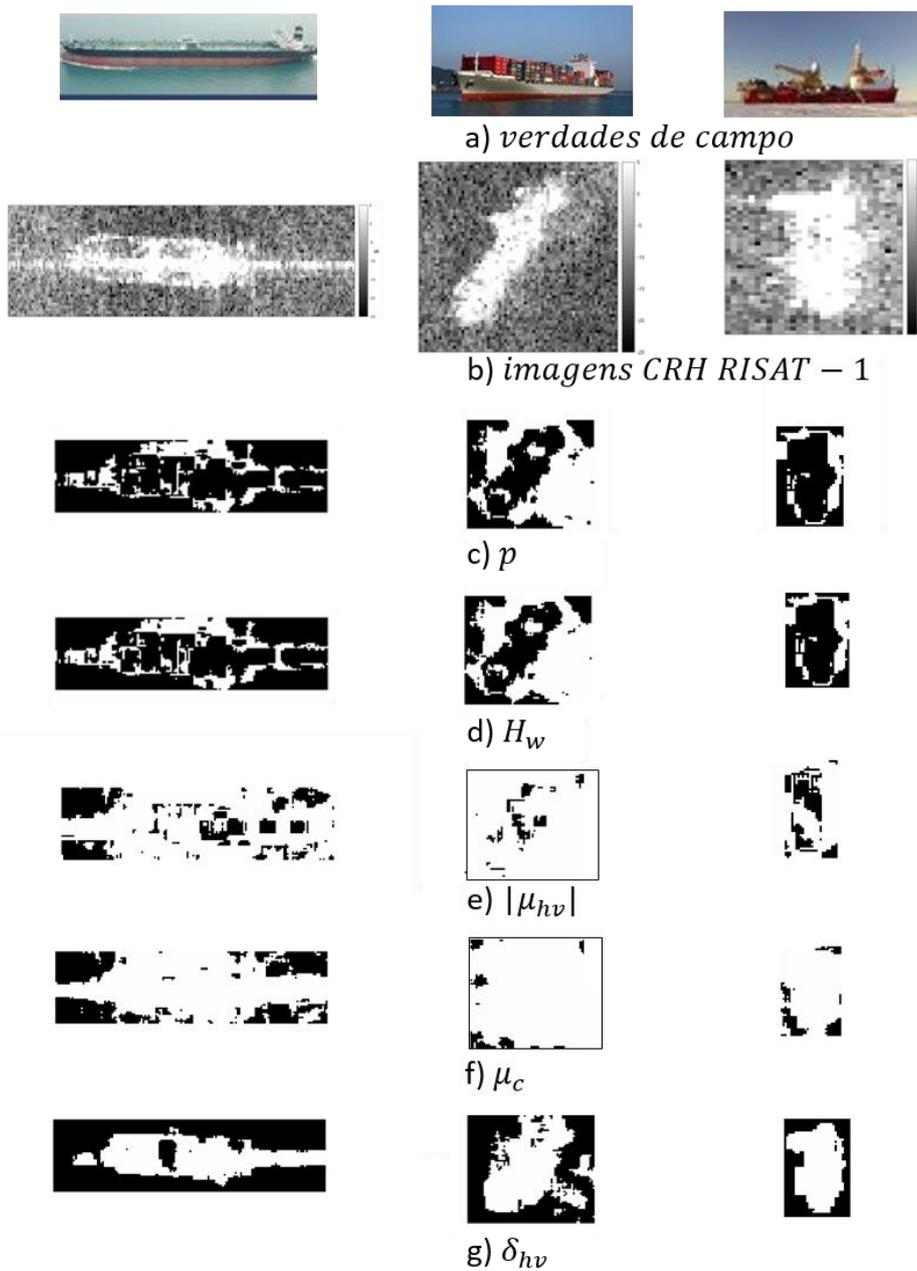


Imagem RISAT-1 – Costa da Cidade do Cabo na África do Sul.. Dados SAR HP reais e os parâmetros polarimétricos HP investigados.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.14 – Resultados da limiarização global na imagem RISAT-1.



Limiarização global sobre imagem SAR RISAT-1. (a) Detecção de três navios com verdade de campo. (b) Imagens intensidade CRH (transmissão Circular à direita e recepção na Horizontal). (c)-(g) Resultados das limiarizações sobre os parâmetros HP  $p$ ,  $H_w$ ,  $|\mu_{hv}|$ ,  $\mu_c$  e  $\delta_{hv}$ , respectivamente.

Fonte: Produção do autor.

Os resultados obtidos com a limiarização global sobre os parâmetros  $\mu_c$  e  $\delta_{hv}$  demonstram-se semelhantes em relação aos resultados com as emulações. Nos demais parâmetros, observa-se que as respostas esperadas foram encontradas nas

bordas dos navios, isto é, nos pixels que fazem borda com o mar. Os pixels internos ao agrupamento relativos aos navios apresentam valores similares aos pixels do mar. Há ainda a necessidade de obterem-se maiores averiguações porque suas respostas não se apresentam como aquelas obtidas com as emulações.

#### 4.5. Caracterização de alvos

Para realizar a caracterização dos alvos metálicos, realizou-se uma APC. A intenção é verificar quais parâmetros podem ser usados de modo complementar, ou seja, busca-se evitar a redundância de informações. A análise foi realizada em pares, por exemplo entre,  $p$  e  $\mu_c$ , ou entre  $|\mu_{hv}|$  e  $\mu_c$ . Depois, verificou-se qual parâmetro apresenta maior contribuição para as informações contidas na primeira PC, isto é, qual parâmetro apresenta a maior correlação com a primeira PC.

Dos resultados obtidos na Tabela 4.8, nota-se que  $\delta_{hv}$  é o parâmetro que se diferencia, pois de fato a natureza da informação que porta (tipos de rebatimento do sinal retroespalhado) difere-se dos demais. Apesar de  $\mu_c$  apresentar correlação tão elevada quanto os demais parâmetros, o tipo que informação que indica é de rugosidade da cena, considerando informação de fase e de potência. Por último, o parâmetro  $p$  é selecionado por apresentar uma correlação inversa em relação a  $\mu_c$ , ou seja, quando os valores em  $p$  aumentam (diminuem), diminuem (aumentam) em  $\mu_c$ . Além deste caráter complementar, o conceito de grau de polarização é mais fácil de compreender e de interpretar do que com o coeficiente de correlação complexa ( $|\mu_{hv}|$ ), o qual também apresentou comportamento semelhante a  $p$ . A entropia da onda ( $H_w$ ) foi descartada por apresentar redundância de informações com  $\mu_c$ .

Portanto, com os três parâmetros HP selecionados ( $\mu_c$ ,  $p$  e  $\delta_{hv}$ ) é possível analisar os elementos de uma superfície quanto ao tipo de rebatimento sofrido pelo sinal retroespalhado; quanto à variação da quantidade de elementos em uma área e quanto à intensidade de sinal retornado, ou seja, a rugosidade; e quanto tal superfície rugosa é capaz de despolarizar a onda retroespalhada.

Tabela 4.8 – Correlação entre a primeira PC e os parâmetros HP.

Valores da correlação entre a primeira PC formada pelo par de parâmetros HP $p$ e $\mu_c$ e seus respectivos componentes, indicando a contribuição de cada um deles sobre esta PC.		
	$p$	$\mu_c$
1ª PC	-0,9080	0,9823
Valores da correlação entre a primeira PC formada pelo par de parâmetros HP $H_w$ e $\mu_c$ e seus respectivos componentes, indicando a contribuição de cada um deles sobre esta PC.		
	$H_w$	$\mu_c$
1ª PC	0,9228	0,9641
Valores da correlação entre a primeira PC formada pelo par de parâmetros HP $ \mu_{hv} $ e $\mu_c$ e seus respectivos componentes, indicando a contribuição de cada um deles sobre esta PC.		
	$ \mu_{hv} $	$\mu_c$
1ª PC	-0,9396	0,9601
Valores da correlação entre a primeira PC formada pelo par de parâmetros HP $\delta_{hv}$ e $\mu_c$ e seus respectivos componentes, indicando a contribuição de cada um deles sobre esta PC.		
	$\delta_{hv}$	$\mu_c$
1ª PC	-0,7962	0,3072

A Figura 4.15 mostra o navio imageado confirmado através de verdade de campo. Ressalta-se que a Figura 4.15c apresenta um corte na imagem SAR, canal intensidade CRH, destacando este navio que está com a mesma orientação da imagem óptica. Esse é um navio petroleiro com dimensões de 332 x 60m e de aproximadamente 20m de altura<sup>17</sup>. Possui apenas duas grandes estruturas verticais, a superestrutura à ré da embarcação e elementos como guindastes à meia nau. O resto do convés apresenta tubulações rasteiras em comparação a estas outras estruturas mencionadas. A Tabela 4.9 apresenta os dados descritivos dos três navios encontrados na imagem RISAT-1. O Apêndice B mostra os resultados das caracterizações polarimétricas para os três navios mencionados na Tabela 4.9.

<sup>17</sup> Marine Traffic: <http://www.marinetraffic.com/>

Tabela 4.9 – Dados descritivos dos navios encontrados na imagem RISAT-1.

	<b>Navio #1</b>	<b>Navio #2</b>	<b>Navio #3</b>
<b>Nome</b>	SAMCO EUROPE	BUDAPEST BRIDGE	ERNEST SHACKLETON
<b>Tipo</b>	Petroleiro	Contentor	Carga geral
<b>Largura</b>	332 m	286 m	80 m
<b>Comprimento</b>	60 m	35 m	17 m
<b>Calado</b>	19 m	12,2 m	7,3 m
<b>Velocidade</b>	0,6 kt	0 kt	11,2 kt
<b>Direção</b>	006°	111°	212°

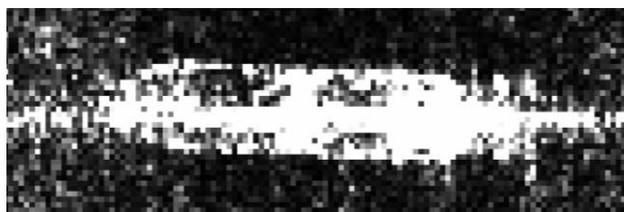
Figura 4.15 – Navio SANCO EUROPE<sup>18</sup> – verdade de campo.



a)



b)



c)

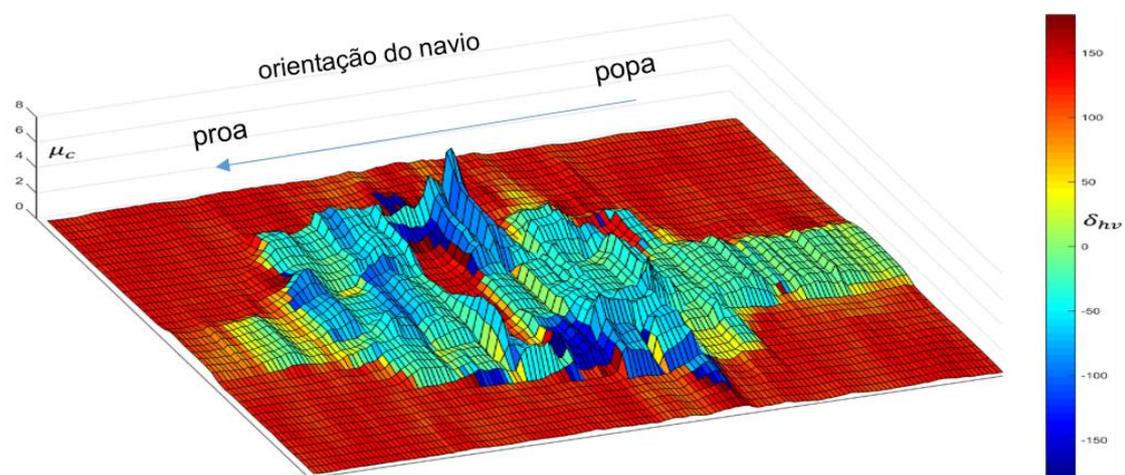
Fonte: Produção do autor.

---

<sup>18</sup> Photo bucket: [http://s65.photobucket.com/user/Visseraa/media/Part-2/SAMCOASIA19-Jan-2005015\\_.jpg.html](http://s65.photobucket.com/user/Visseraa/media/Part-2/SAMCOASIA19-Jan-2005015_.jpg.html)

A Figura 4.16 apresenta uma visualização 3D entre as seguintes combinações: relação entre rugosidade e tipo de *bouncing* (Figura 4.16a); relação entre áreas polarizadas/despolarizadas e o tipo de *bouncing* (Figura 4.16b); e relação entre a rugosidade de uma área e seu grau de polarização equivalente (Figura 4.16c). Alguns cuidados devem ser tomados ao analisar tais imagens. Primeiro, o navio apresenta uma saturação do sinal retroespalhado à frente (menor intensidade) e atrás (na forma de uma esteira) e devem ser ignorados. Segundo, o navio está representado na forma 3D de modo mais oval em virtude das características do gráfico. Assim, nota-se que as estruturas mais verticais causam maior despolarização e também estão associadas ao rebatimento múltiplo em números ímpares (*odd bouncing*). Em função do ângulo de incidência e da orientação do navio ao radar, à meia nau, encontra-se uma área mais plana que proporcionou um rebatimento duplo (Figura 4.16 -  $\mu_c \sim 0$  e  $\delta_{hv} > 0$ ) e que manteve a onda polarizada (Figura 4.16b -  $p \sim 0.8$ ). Ainda em função do ângulo de incidência, a superestrutura do navio (ponte de comando) apresenta-se com grande retorno de sinal, mas muito polarizado (Figura 4.16c -  $\mu_c \sim 4$  e  $p \sim 0.8$ ).

Figura 4.16 – Caracterização do navio conforme os pares de parâmetros polarimétricos  $\mu_c$ ,  $p$  e  $\delta_{hv}$ .

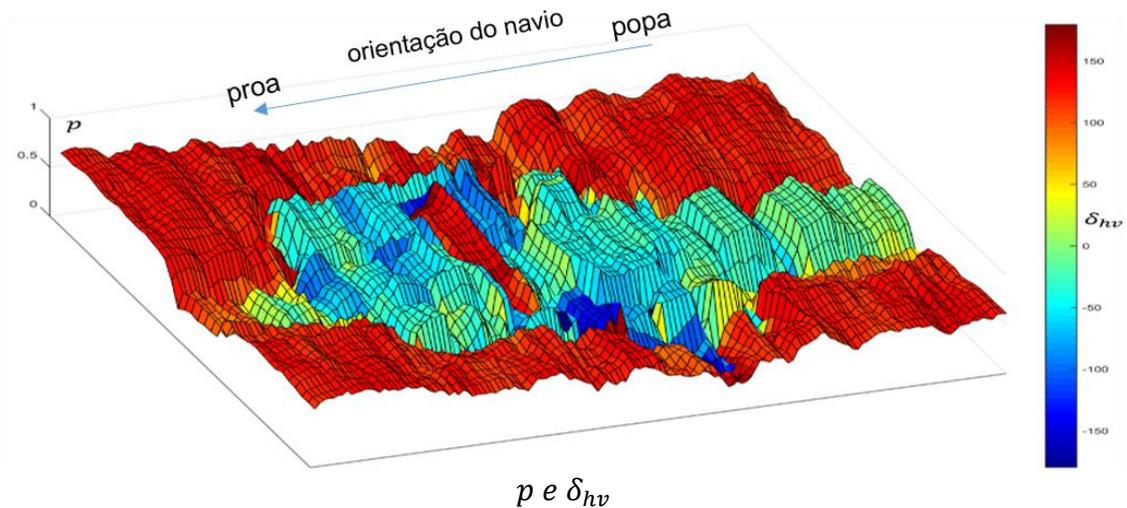


$\mu_c$  e  $\delta_{hv}$

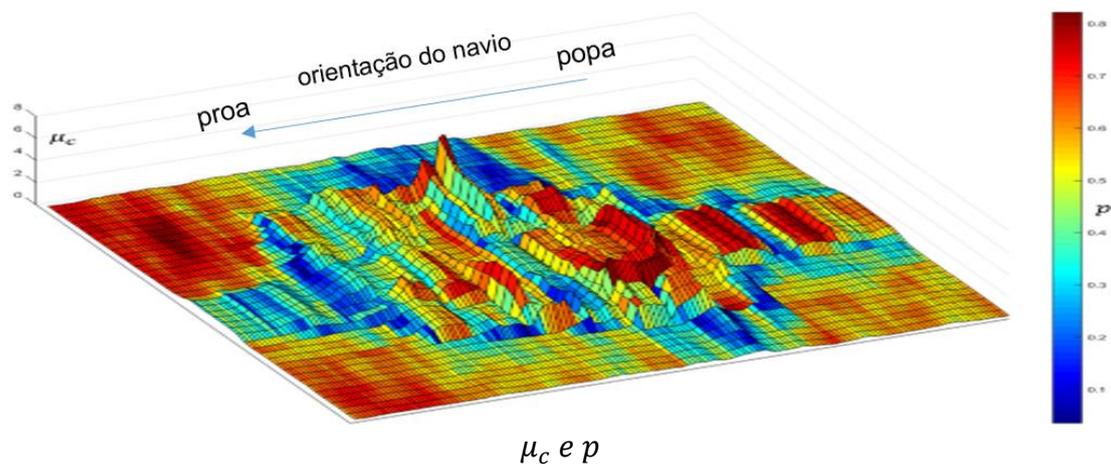
a) relação entre rugosidade ( $\mu_c$ ) e tipo de *bouncing* ( $\delta_{hv}$ )

continua

continuação e final – Figura 4.16



b) relação entre áreas polarizadas/ despolarizadas ( $p$ ) e o tipo de *bouncing* ( $\delta_{hv}$ )



c) relação entre a rugosidade de uma área ( $\mu_c$ ) e seu grau de polarização equivalente ( $p$ )

Fonte: Produção do autor.

Por fim, ratifica-se que estes parâmetros ( $\delta_{hv}$ ,  $p$ , e  $\mu_c$ ) são robustos, tanto para a detecção de alvos quanto para caracterizar diferentes elementos em suas superfícies, inclusive classificando-os conforme suas respostas polarimétricas. A tecnologia CP SAR para observação da Terra por satélites ainda é, entretanto, relativamente nova e os sensores disponíveis ainda são de caráter experimental, porém as pesquisas confirmam sua utilidade e serão muito úteis, porque permitirão a observação de áreas maiores através de recursos polarimétricos disponíveis anteriormente apenas para modos FP de pequena cobertura na superfície.

## 5 CONCLUSÕES

Neste estudo, a arquitetura SAR HP é explorada para detectar alvos metálicos sobre a superfície do mar. Primeiro, a sensibilidade dos parâmetros HP em respeito aos alvos metálicos sobre o mar contra as condições de estado de mar e da característica dos alvos são analisados. Um novo índice, RSPoIF, a Sensibilidade Relativa de Feições Polarimétricas, é proposto para determinar objetivamente a variabilidade do *background* oceânico. Esta análise mostra que os parâmetros HP apresentam diferentes comportamentos em respeito à detecção de alvos e ao estado de agitação do mar. Isto esclarece o fato de que a ocorrência de Falsos Alarmes (FA) é dependente tanto do estado do mar, quanto do forte retroespalhamento de certos tipos de fenômenos oceânicos.

Propõe-se a nova métrica DoST, dependência do estado do mar e características do alvo, para avaliação objetiva de desempenho de detectores, a qual permite verificar a influência seja do estado do mar, seja das características da superfície dos alvos.

O parâmetro  $|\mu_{hv}|$ , módulo do coeficiente de correlação complexa, apresenta a melhor performance em termos de detecção de alvos, mas resulta em muitos FA quando ocorrem elevados estados de mar. O parâmetro  $\delta_{hv}$ , a diferença de fase entre as componentes h e v, não apresenta grande sensibilidade à variação do *background* oceânico, mas permite detectar apenas alguns tipos de alvos (aqueles que apresentam estruturas que propiciam os mecanismos de *odd* e de *even bouncing*).

Seguindo a análise de sensibilidade, uma abordagem CFAR não-supervisionada é proposta para explorar os parâmetros  $|\mu_{hv}|$  e  $\mu_c$  a razão de polarização circular, uma vez que resultam nas maiores taxas de FA quando limiares globais são empregados. Entretanto, em praticamente todos os casos, verifica-se que uma seleção local de um *threshold* é suficiente para separar alvo do *background* oceânico.

Os experimentos realizados neste estudo demonstraram que os dados SAR HP, emulados a partir de dados reais na banda L e na banda C, apresentam

um desempenho muito bom para as detecções, sugerindo que a arquitetura HP seja usada para a detecção de alvos metálicos no mar.

Este estudo demonstrou que o índice RSPoIF pode ser utilizado para estimar o estado do mar e/ou a escala de Beaufort, apresentando coerência quando comparados entre si. Os parâmetros  $|\mu_{hv}|$  e  $H_w$ , o módulo do coeficiente de correlação complexa e a entropia da onda, respectivamente, devido às suas sensibilidades, apresentaram a melhor correspondência, por exemplo, quando seus índices RSPoIF correspondem aos níveis Alto ou Muito Alto, na escala de Beaufort, corresponderá aos níveis 5 (mar agitado) ou 6 (mar grosso). Portanto, o índice RSPoIF pode ser utilizado para tais estimações quando não se possui dados complementares ou quando sua precisão é muito baixa, pois a sensibilidade dos parâmetros HP representam adequadamente o estado de agitação oceânica.

Os parâmetros HP demonstraram-se robustos para a detecção de alvos e o uso de limiares globais ratificam tal capacidade. Os mesmos limiares utilizados nas emulações foram aplicados às imagens HP reais do RISAT-1, obtendo-se praticamente os mesmos resultados. Entretanto, parâmetros como entropia da onda ( $H_w$ ), grau de polarização ( $p$ ) e coeficiente de correlação complexa ( $|\mu_{hv}|$ ) merecem maiores investigações.

Os parâmetros HP  $\delta_{hv}$ ,  $\mu_c$  e  $p$  permitem respectivamente uma caracterização eficiente em termos de tipo de rebatimento da onda retroespalhada, do nível de rugosidade de uma área em superfície e do estado de polarização desta onda eletromagnética retroespalhada correspondente a tal área. Os parâmetros HP apresentam diferentes comportamentos conforme o estado de agitação do mar e podem ser utilizados complementarmente entre si tanto para fins de detecção, quanto de caracterização da resposta polarimétrica de alvos metálicos. A tecnologia CP, através da arquitetura HP aqui estudada, demonstrou que muitos progressos ainda podem ser feitos para investigações de grandes áreas oceânicas através de recursos polarimétricos à semelhança dos equivalentes FP.

Ressaltamos que o trabalho aqui apresentado é, segundo nossa melhor avaliação da literatura, a primeira tentativa de exploração de polarimetria compacta para aplicações de monitoramento oceânico e com a ênfase na detecção de alvos no mar, e que tenta ir além das técnicas tradicionais de processamento digital de imagens, incorporando a influência das condições ambientais marinhas nas análises do *skill* dos diferentes parâmetros para a detecção.

Como trabalhos futuros, indica-se o aprimoramento da métrica RSPoIF, principalmente para relacioná-los com maior precisão às verdades de campo e associá-los com maior acurácia ao estado do mar, ao vento, à altura das ondas e ao *swell*. Estudos de localização de *breaking waves* e ondas internas poderão fazer uso da metodologia de cálculo e do próprio índice RSPoIF. Técnicas de classificação poderão ser desenvolvidas em proveito das possibilidades não só de detecção, mas também de caracterização dos alvos metálicos. Uma nova decomposição polarimétrica poderá ser considerada através da exploração de parâmetros HP/CP.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMOON, M.; BOZORGI, A.; REZAI-RAD, G. New method for ship detection in synthetic aperture radar imagery based on the human visual attention system. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, n. 1, p. 7159901–7159916, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.7.071599>>.
- AN, W.; XIE, C.; YUAN, X. An Improved Iterative Censoring Scheme for CFAR Ship Detection With SAR Imagery. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 52, n. 8, p. 4585–4595, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6650059>>.
- ATTEIA, G. E.; COLLINS, M. J. On the use of compact polarimetry SAR for ship detection. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 80, p. 1–9, jun. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271613000294>>. Acesso em: 10 nov. 2015.
- BOERNER, W.-M.; MOTT, A.; LUNEBURG, E.; LIVINGSTONE, C.; BRISCO, B.; PATERSON, S. Polarimetry in radar remote sensing: basic and applied concepts. In: HENDERSON, FLOYD; LEWIS, A. (Ed.). **Principles and applications of imaging radar**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- BORN, M.; WOLF, E. Interference and diffraction with partially coherent light. In: **Principles of optics**. London: Cambridge University Press, 1980.
- BRASIL. **Estratégia Nacional de Defesa - END**. Brasília: Ministério da Defesa, 2008.
- BRASIL. **Programa Estratégico de Sistemas Espaciais – PESE**. Brasília: Ministério da Defesa, 2012a.
- BRASIL. **Programa Nacional de Atividades Espaciais - PNAE: 2012 - 2021**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2012b. .
- CHEN, P.; YANG, J.; REN, L. A new detection method of oil rigs in SAR imagery. In: Proc. SPIE 8891, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XIII. 2013. 889104. doi:10.1117/12.2028962.
- CLOUDE, S. R.; GOODENOUGH, D. G.; CHEN, H. Compact Decomposition Theory. **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**, v. 9, n. 1, p. 28–32, 2012.

COLLINS, M. J.; DENBINA, M.; MINCHEW, B.; JONES, C. E.; HOLT, B. On the Use of Simulated Airborne Compact Polarimetric SAR for Characterizing Oil&#x2013;Water Mixing of the Deepwater Horizon Oil Spill. **Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of**, v. 8, n. 3, p. 1062–1077, 2015.

COSTA, A. N.; PAES, R. L.; ZAWADZKI, M.; GERALDO, D. Scenario analysis as a decision-support tool: a maritime patrol case of study. In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA (XVII SIGE), 17., 2015, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: ITA, 2015.

CRISP, D. J. **The state-of-the-art in ship detection in synthetic aperture radar imagery**. Edinburg: Australian Government – Department of Defence. Intelligence, Surveillance and Reconnaissance Division (ISR), 2004. .

CUI, Y.; YANG, J.; YAMAGUCHI, Y. CFAR ship detection in SAR images based on lognormal mixture models. In: INTERNATIONAL ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR (AP SAR), 3., 2011, Seoul. **Proceedings...** Seoul: IEEE, 2011. CUI, Y.; YANG, J.; YAMAGUCHI, Y.; SINGH, G.; PARK, S.-E.; KOBAYASHI, H. On semiparametric clutter estimation for ship detection in synthetic aperture radar images. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 51, n. 5, p. 3170–3180, 2013.

DANKLMAYER, A.; CHANDRA, M.; LUNEBURG, E. Principal component analysis in radar polarimetry. **Advances in Radio Science**, v. 4, n. 3, p. 399–400, 2005.

DE, S.; KUMAR, V.; RAO, Y. S. Crop classification using RISAT-1 hybrid polarimetric SAR Data. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR (EUSAR 2014), 10., 2014, Berlim, Germani. **Proceedings...**Berlim: VDE Verlag GmbH, 2014.

EL-DARYMLI, K.; MCGUIRE, P.; POWER, D.; MOLONEY, C. Target detection in synthetic aperture radar imagery: a state-of-the-art survey. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, n. 01598, p. 01598–1 – 01598–35, 2013.

ELLIS, J.; DOGARIU, A. On the degree of polarization of random electromagnetic fields. **Optics Communications**, v. 253, n. 4-6, p. 257–265, set. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401805005080>>. Acesso em: 3 nov. 2015.

FENG, J.; JIAO, L.; ZHANG, X.; YANG, D. Bag-of-visual-words based on clonal selection algorithm for SAR image classification. **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**, v. 8, n. 4, p. 691–695, 2011.

FERRARA, G.; MIGLIACCIO, M.; NUNZIATA, F.; SORRENTINO, A. Generalized-K (GK)-based observation of metallic objects at sea in full-resolution Synthetic Aperture Radar (SAR) data: a multipolarization study. **Oceanic Engineering, IEEE Journal of**, v. 36, n. 2, p. 195–204, 2011.

FOULKES, S. B.; BOOTH, D. M. Ship detection in ERS and RADARSAT imagery using a self-organising Kohonen neural network. In: CONF. SHIP DETECTION IN COASTAL WATERS, 2000, Digby, Nova Scotia Canada. **Proceedings...** Digby, Nova Scotia Canada: IEEE, 2000.

GAO, G.; WANG, X.; LAI, T. Detection of Moving Ships Based on a Combination of Magnitude and Phase in Along-Track Interferometric SAR—Part I: SIMP Metric and Its Performance. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 53, n. 7, p. 3565–3581, 2015a.

GAO, G.; WANG, X.; LAI, T. Detection of Moving Ships Based on a Combination of Magnitude and Phase in Along-Track Interferometric SAR #x2014;Part II: Statistical Modeling and CFAR Detection. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 53, n. 7, p. 3582–3599, 2015b.

Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/ielx7/36/7056619/07010033.pdf?tp=&arnumber=7010033&isnumber=7056619>\n<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7010033>>.

GIL, J. J. Polarimetric characterization of light and media. **European Physical Journal of Applied Physics**, v. 40, n. 1, p. 1–47, 2007.

GUIDA, M.; LONGO, M.; LOPS, M. Biparametric CFAR procedures for lognormal clutter. **Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on**, v. 29, n. 3, p. 798–809, 1993.

HERSBACH, H.; STOFFELEN, A.; DE HAAN, S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 112, n. C3, p. n/a–n/a, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2006JC003743>>.

HOU, B.; CHEN, X.; JIAO, L. Multilayer CFAR detection of ship targets in very high resolution SAR images. **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**, v. 12, n. 4, p. 811–815, 2015. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6942175>>.

HOWARD, D.; SIMON, R.; BRANKIN, R. Target detection in SAR imagery by genetic programming. **Advances in Engineering Software**, v. 30, n. 5, p. 303–311, 1999.

ISOGUCHI, O.; SHIMADA, M. An L-band ocean geophysical model function derived from PALSAR. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 47, n. 7, p. 1925–1936, 2009.

JI, K.; XING, X.; ZHAO, Z.; ZOU, H.; SUN, J. A refined ship segmentation method in SAR imagery. In: SPIE 8918, MIPPR 2013: AUTOMATIC TARGET RECOGNITION AND NAVIGATION, 2013, Wuhan, China. **Proceedings...** Wuhan, China, 2013. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2031494>>.

KUMAR, L. J. V.; KISHORE, J. K.; RAO, P. K. Unsupervised classification based on decomposition of RISAT-1 images for oil spill detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTING, COMMUNICATIONS AND INFORMATICS (ICACCI), 2013, Mysore, India. **Proceedings...** Mysore, India: IEEE, 2013.

LANG, H.; ZHANG, J.; ZHANG, T.; ZHAO, D.; MENG, J. Hierarchical ship detection and recognition with high-resolution polarimetric synthetic aperture radar imagery. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 8, 2014. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000338492900001>.

LEE, J.-S.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging: from basics to applications**. 1. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2009.

LENG, X.; JI, K.; YANG, K.; ZOU, H. A Bilateral CFAR algorithm for ship detection in SAR images. **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**, v. 12, n. 7, p. 1536–1540, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7069218>>.

LI, H.; PERRIE, W.; HE, Y.; LEHNER, S.; BRUSCH, S. Target detection on the ocean with the relative phase of compact polarimetry SAR. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 51, n. 6, p. 3299–3305, 2013.

LI, L.; WANG, J. SAR image ship detection based on Ant Colony optimization. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON IMAGE AND SIGNAL PROCESSING (CISP), 5., 2012, Chongqing, Sichuan, China. **Proceedings...** Chongqing: IEEE, 2012.

LIU, C.; VACHON, P. W.; GELING, G. W. Improved ship detection with airborne polarimetric SAR data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 31, p. 122–131, 2005.

LORENZZETTI, J. A.; PAES, R. L.; GHERARDI, D. F. M. A performance comparison of a CFAR ship detection algorithm using Envisat, Radarsat, Cosmo-SkyMed, and TerraSAR-X images. In: INTERNATIONAL WORKSHOP IN ADVANCES OF SAR OCEANOGRAPHY. ENVISAT ERS MISSIONS, 3., 2010, Frascati. **Proceedings...** Frascati. , 2010.

MA, W.; SHANG, R. Image classification based on clonal selection algorithm. **Advances in Natural Computation - Lectures Notes in Computer Science**, v. 4221, n. Part I, p. 927–934, 2006.

MANDEL, L.; WOLF, E. Second-order coherence theory of scalar wavefields. In: **Optical Coherence and Quantum Physics**. New York: Cambridge University Press, 1995.

MARINO, A.; CLOUDE, S. R.; WOODHOUSE, I. H. Detecting Depolarizing targets using a new geometrical perturbation filter. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR (EUSAR), 8., 2010, Eurogress, Aachen, Germany. **Proceedings...** Aachen: EUSAR, 2010

MARQUES, R. C. P.; MEDEIROS, F. N. S.; USHIZIMA, D. M. Target detection in SAR images based on a level set approach. **Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), IEEE Transactions on**, v. 9, n. 2, p. 214–222, 2009.

MAZZARELLA, F.; VESPE, M.; SANTAMARIA, C. SAR ship detection and self-reporting data fusion based on traffic knowledge. **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**, v. 12, n. 8, p. 1685–1689, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7093130>>.

MENG, X. W. Performance analysis of OS-CFAR with binary integration for weibull background. **Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on**, v. 49, n. 2, p. 1357–1366, 2013.

MIGLIACCIO, M.; NUNZIATA, F.; BUONO, A. SAR polarimetry for sea oil slick observation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 12, p. 3243–3273, 2015. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2015.1057301>>.

MIGLIACCIO, M.; NUNZIATA, F.; MONTUORI, A.; LI, X.; PICHEL, W. G. A Multifrequency polarimetric SAR processing chain to observe oil fields in the Gulf of Mexico. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 49, n. 12, p. 4729–4737, 2011.

MIGLIACCIO, M.; NUNZIATA, F.; MONTUORI, A.; PAES, R. L. Single-look complex COSMO-SkyMed SAR data to observe metallic targets at sea. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE**, v. 5, n. 3, p. 893–901, 2012.

MISRA, T.; KIRANKUMAR, A. S. RISAT-1 : Configuration and Performance Evaluation 2 . Imaging Capability. In: GENERAL ASSEMBLY AND SCIENTIFIC SYMPOSIUM (URSI GASS), 31., 2014, Beijing. **Proceedings...** Beijing: IEEE, 2014.

NOVAK, L. M.; SECHTIN, M. B.; CARDULLO, M. J. Studies of target detection algorithms that use polarimetric radar data. **Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on**, v. 25, n. 2, p. 150–165, 1989.

NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M.; BROWN, C. E. Reflection Symmetry for polarimetric observation of man-made metallic targets at sea. **Oceanic Engineering, IEEE Journal of**, v. 37, n. 3, p. 384–394, 2012.

NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M.; GAMBARDELLA, A. Pedestal height for sea oil slick observation. **Radar, Sonar & Navigation, IET**, v. 5, n. 2, p. 103–110, 2011.

OSTRO, S. J. Planetary radar astronomy. **Reviews of Modern Physics**, v. 65, n. 4, p. 1235–1279, 1993.

OUCHI, K.; HWANG, S. I. Improvement of ship detection accuracy by SAR multilook cross-correlation technique using adaptative CFAR. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 2010), 2010, Honolulu, Hawaii, USA. **Proceedings...** Honolulu: IEEE, 2010.

PAES, R. L. **Detecção de alvos na superfície do mar utilizando imagens sar orbitais**. 2009. 146 p. (INPE-16600-TDI/1586). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em:<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/35QDJS5>>. Acesso em: 22 fev. 2016. . Disponível em: <<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/35QDJS5>>>.

PAES, R. L.; BUONO, A.; NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M. On the sensitivity analysis of the compact-polarimetry SAR architectures for maritime targets detection . In: REMOTE SENSING OF THE OCEAN, SEA ICE, COASTAL WATERS, AND LARGE WATER REGIONS 2014, **Proceedings...** . SPIE 2014. doi:10.1117/12.2070678 Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/12.2070678>>.

PAES, R. L.; BUONO, A.; NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M. On the sensitivity of Hybrid-Polarity features for Arctic and Antarctic regions: preliminary results. I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 3804-3811. Internet. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3JM4C5B>>. Acesso em: 22 fev. 2016.

PAES, R. L.; BUONO, A.; NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M.; LORENZZETTI, J. A. Compact-Polarimetry for oil basins observation. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 3804-3811. Internet. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3JM4C5B>>. Acesso em: 22 fev. 2016. 2015b.

PAES, R. L.; BUONO, A.; NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M.; VELOTTO, D.; LEHNER, S.; MISRA, T.; RAVOORI, N.; KLYENHANS, W.; OTTO, K. A ship detection experiment: the case of South Africa. In: ESA POLinSAR 2015, Frascati. **Proceedings...** Frascati: ESA, 2015c.

PAES, R. L.; LORENZZETTI, J. A.; GHERARDI, D. F. M. Patrulha Marítima apoiada por técnica de extração de informações de dados de satélites. In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA (IX SIGE), 10., 2007, Sao Jose dos Campos. **Anais...** Sao Jose dos Campos: ITA, 2007.

PAES, R. L.; LORENZZETTI, J. A.; GHERARDI, D. F. M. Ship detection using TerraSAR-X images in the Campos Basin (Brazil). **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**, v. 7, n. 3, p. 545–548, 2010.

PAES, R. L.; MEDEIROS, I. P. Investigation of entropy nets induced by oblique decision trees for target detection in ocean SAR. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONVERGENCE AND HYBRID INFORMATION TECHNOLOGY (ICHIT 2012), 2012, Daejeon. **Proceedings...** Daejeon: Springer, 2012.

PAES, R. L.; NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M. Hybrid-polarimetry architecture to observe metallic targets at sea. In: ENVIRONMENTAL ENERGY AND STRUCTURAL MONITORING SYSTEMS (EESMS), 2014, Naples, Italy. **workshop...** Naples:IEEE, 2014.

PAES, R. L.; NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M. On the capability of hybrid-polarity features to observe metallic targets at sea. **Oceanic Engineering, IEEE Journal of**, v. PP, n. 99, p. 1–16, 2015.

PAES, R. L.; PAGAMISSE, A. Wavelets and decision trees for target over sea surface using Cosmo-SkyMed SAR data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONVERGENCE AND HYBRID INFORMATION TECHNOLOGY (ICHIT 2011), Daejeon. **Proceedings...** Daejeon: Springer, 2011.

PICHEL, W. G.; CLEMENTE-COLON, P.; WACKERMAN, C. C.; FRIEDMAN, K. S. Ship and Wake Detection. In: HOLT, B. (Ed.). **Synthetic aperture radar - marine user's manual**. [s.l: s.n.]p. 277–304.

RANEY, R. K. Hybrid-Polarity SAR Architecture. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 2006), 2006, Denver. **Proceedings...** Denver:IEEE, 2006.

RANEY, R. K. A perspective on compact polarimetry. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter**, p. 12–18, 2011.

RANEY, R. K.; CAHILL, J. T. S.; PATTERSON, G. W.; BUSSEY, D. B. J. The m-chi decomposition of hybrid dual-polarimetric radar data. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012), 2012, Munich. **Proceedings...** Munich: IEEE, 2012.

RANEY, R. K.; SPUDIS, P. D.; BUSSEY, B.; CRUSAN, J.; JENSEN, J. R.; MARINELLI, W.; MCKERRACHER, P.; NEISH, C.; PALSETIA, M.; SCHULZE, R.; SEQUEIRA, H. B.; WINTERS, H. The Lunar Mini-RF Radars: Hybrid Polarimetric Architecture and Initial Results. **Proceedings of the IEEE**, v. 99, n. 5, May, 2011.

SCHMITT, A.; WENDLEDER, A.; HINZ, S. The Kennaugh element framework for multi-scale, multi-polarized, multi-temporal and multi-frequency SAR image preparation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 102, p. 122–139, abr. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271615000246>>. Acesso em: 20 out. 2015.

SCHULER, D. L.; LEE, J.-S.; HOPPEL, K. W. Polarimetric SAR image signatures of the ocean and Gulf Stream features. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 31, n. 6, p. 1210–1221, 1993.

SHIRVANY, R.; CHABERT, M.; TOURNERET, J. Y. Estimation of the degree of polarization for hybrid/compact and linear dual-pol SAR intensity images: Principles and applications. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 51, n. 1, p. 539–551, 2013.

SHIRVANY, R.; CHABERT, M.; TOURNERET, J.-Y. Ship and Oil-Spill Detection Using the Degree of Polarization in Linear and Hybrid/Compact Dual-Pol SAR. **Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of**, v. 5, n. 3, p. 885–892, 2012.

SOUYRIS, J. C.; STACY, N.; AINSWORTH, T.; LEE, J. S.; DUBOIS-FERNANDEZ, P. SAR compact polarimetry (CP) for earth observation and planetology: concept and challenges. In: **ESA Special Publication**, Frascati. : ESA, 2007.

SUN, Y.; ZHANG, B.; WANG, C.; WU, F. Ship detection based on eigenvalue-eigenvector decomposition and OS-CFAR detector. In: International Conference on Computer Vision in Remote Sensing (CVRS), 2012, Xiamen, China. Xiamen, China: IEEE, 2012. .

TIAN, S.; WANG, C.; ZHANG, H. Ship detection method for single-polarization synthetic aperture radar imagery based on target enhancement and nonparametric clutter estimation. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 21, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.9.096073>>.

TOUZI, R.; CHARBONNEAU, F. Characterization of target symmetric scattering using polarimetric SARs. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 40, n. 11, p. 2507–2516, 2002.

TOUZI, R.; HURLEY, J.; VACHON, P. W. Optimization of the Degree of Polarization for Enhanced Ship Detection Using Polarimetric RADARSAT-2. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 53, n. 10, p. 5403–5424, 2015.

VAN DEN BROEK, B.; DEN BREEJEN, E.; DEKKER, R.; SMITH, A. Change detection and maritime situation awareness in channel area - Feasibility of spaceborne SAR for maritime situation awareness. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012), 2012, Munich. **Proceedings...** Munich: IEEE, 2012

VAN ZYL, J. J.; ZEBKER, H. A.; ELACHI, C. Imaging radar polarization signatures: Theory and observation. **Radio Science**, v. 22, n. 4, p. 529–543, 7 jul. 1987. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/RS022i004p00529>>. Acesso em: 3 nov. 2015.

VELOTTI, D.; NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M.; LEHNER, S. Dual-Polarimetric TerraSAR-X SAR Data for Target at Sea Observation. **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**, v. 10, n. 5, p. 1114–1118, 2013a.

- VELOTTO, D.; NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M.; LEHNER, S. A robust symmetry-based approach to exploit TerraSAR-X dual-pol data for targets at sea observation. (ESA-ESRIN, Ed.) In: ESA POLinSAR WORKSHOP, 2013, Frascati. Proceedings... Frascati: ESA, 2013b.
- VELOTTO, D.; SOCCORSI, M.; LEHNER, S. Azimuth Ambiguities Removal for Ship Detection Using Full Polarimetric X-Band SAR Data. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 52, n. 1, p. 76–88, 2014.
- WANG, C.; JIANG, S.; ZHANG, H.; WU, F.; ZHANG, B. Ship Detection for High-Resolution SAR Images Based on Feature Analysis. **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**, v. 11, n. 1, p. 119–123, 2014a.
- WANG, Y.; LI, H.; ZHANG, Y.; GUO, L. Marine target detection in quad-pol synthetic aperture radar imagery based on the relative phase of cross-polarized channels. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 96092, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.9.096092>>.
- WANG, Z.; ZHANG, H.; WANG, C.; WU, F. Ship surveillance with Radarsat-2 ScanSAR. In: SAR IMAGE ANALYSIS, MODELING, AND TECHNIQUES, 14., 2014. **Proceedings.....**2014b. Proc. SPIE 9243. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/12.2067153>>.
- WEI, J.; LI, P.; YANG, J.; ZHANG, J.; LANG, F. A new automatic ship detection method using I-band polarimetric SAR imagery. **Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of**, v. 7, n. 4, p. 1383–1393, 2014.
- YANG, C.-S.; KIM, T.-H.; HONG, D.; AHN, H.-W. Design of integrated ship monitoring system using SAR, RADAR, and AIS. In: OCEAN SENSING AND MONITORING, 5., 2013. **Proceedings...** 2013. Proc. SPIE 8724. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2018017>>.
- YANG, D.; JIAO, L.; GONG, M.; LIU, F. Artificial immune multi-objective SAR image segmentation with fused complementary features. **Information Sciences**, v. 181, n. 13, p. 2797–2812, 2011.
- YANG, D.; JIAO, L.; GONG, M.; SI, X.; LI, J.; FENG, J. An effective immune multi-objective algorithm for SAR imagery segmentation. In: MIPPR2009: MULTISPECTRAL IMAGE ACQUISITION AND PROCESSING, 2009., China. **Proceedings...** China: 2009. Proc. of SPIE 7494,
- YEREMY, M.; CAMPBELL, J. W. M.; MATTAR, K.; POTTER, T. Ocean surveillance with polarimetric SAR. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.

27, p. 328–344, 2001.

YIN, J.; YANG, J.; ZHANG, X. On the ship detection performance with compact polarimetry. In: RADAR CONFERENCE (RADAR), 2011, Kansas City, MO. **Proceedings...** Kansas City, MO: IEEE, 2011.

YIN, J.; YANG, J.; ZHOU, Z.-S.; SONG, J. The Extended Bragg Scattering Model-Based Method for Ship and Oil-Spill Observation Using Compact Polarimetric SAR. **Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of**, v. 8, n. 8, p. 3760–3772, 2015.

YU, Y.; WANG, B.; ZHANG, L. Hebbian-based neural networks for bottom-up visual attention and its applications to ship detection in SAR images. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL INFORMATION PROCESSING (ICONIP 2009), 2009, Bangkok. **Proceedings...** Bangkok: Elsevier, 2009.

ZEBKER, H. A.; VANZYL, J. J. Imaging Radar Polarimetry - a Review. **Proceedings of the IEEE**, v. 79, n. 11, p. 1583–1606, 1991. Disponível em: <<Go to ISI>://A1991GV34900002>.

ZHAO, Z.; JI, K.; XING, X.; ZOU, H. Adaptive CFAR detection of ship targets in high resolution SAR imagery. In: MULTISPECTRAL IMAGE ACQUISITION, PROCESSING, AND ANALYSIS (MIPPR 2013), 2013. **Proceedings....** 2013.SPIE 8917,doi:10.1117/12.2030299<<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2030299>>.

ZHAOYING, H.; JINSONG, C. A review of ship detection algorithms in polarimetric SAR images. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING (ICSP '04), 2004, Montreal, Quebec, Canada. **Proceedings..** Montreal, Quebec, Canada: IEEE, 2004.



**APÊNDICE A - ARTIGO CIENTIFICO DO TIPO COMPLETO PUBLICADO NO  
*IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING***

On the Capability of Hybrid-Polarity Features to Observe Metallic Targets at  
Sea

Paes, R.L.; Nunziata, F. ; Migliaccio, M.

Volume: PP , Número: 99, Páginas: 1 - 16

ISSN : 0364-9059

DOI: 10.1109/JOE.2015.2424751

Data de publicação: 22 de Maio de 2015

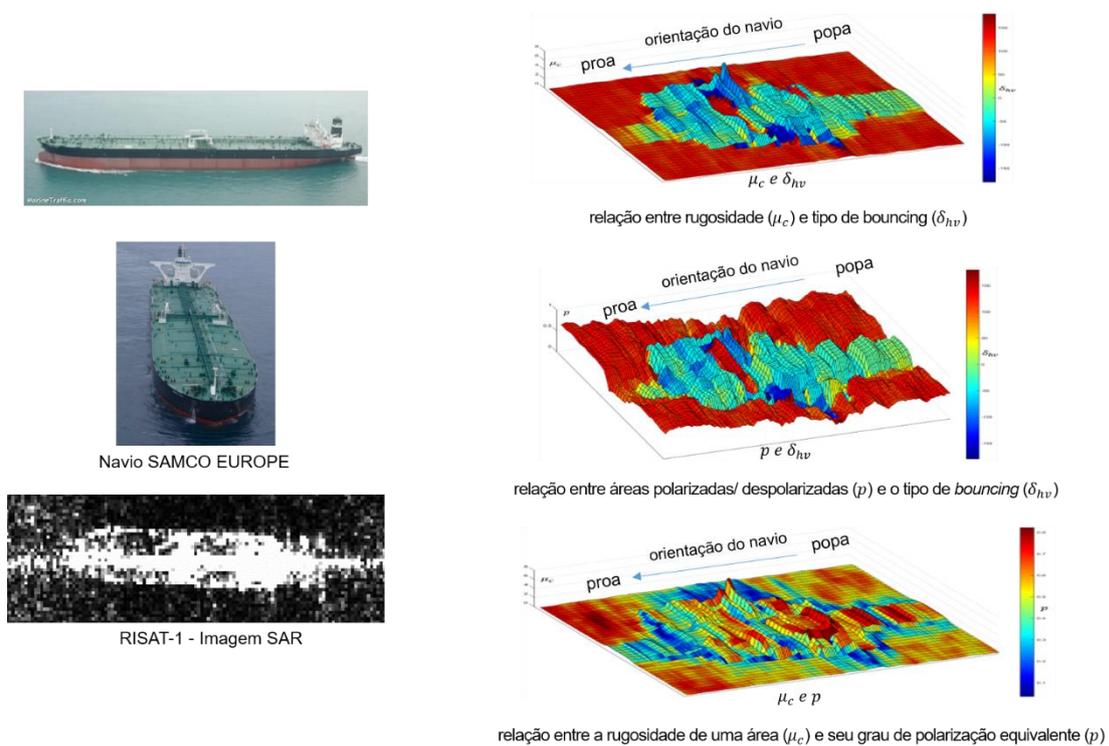


# APÊNDICE B- RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES POLARIMÉTRICAS PARA OS NAVIOS ENCONTRADOS NA IMAGEM RISAT-1

Tabela B.1 – Descrição do navio SAMCO EUROPE

Nome	Tipo	Dimensões	Calado	Velocidade	Direção
SAMCO EUROPE	Petroleiro	332 x 60 m	19 m	0,6 kt	006°

Figura B.1 – Caracterização polarimétrica do navio SAMCO EUROPE

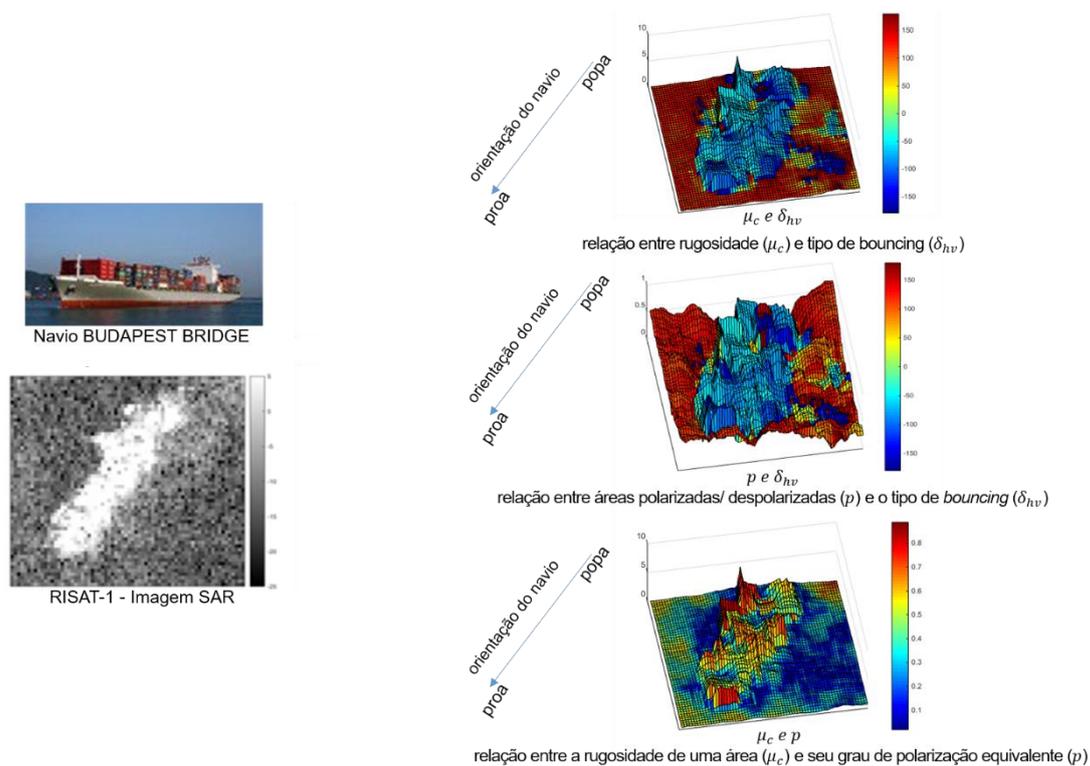


Fonte: Produção do autor.

Tabela B.2 – Descrição do navio BUDAPEST BRIDGE

Nome	Tipo	Dimensões	Calado	Velocidade	Direção
BUDAPEST BRIDGE	Contentor	286 x 35 m	12,2 m	0 kt	111°

Figura B.2 – Caracterização polarimétrica do navio BUDAPEST BRIDGE

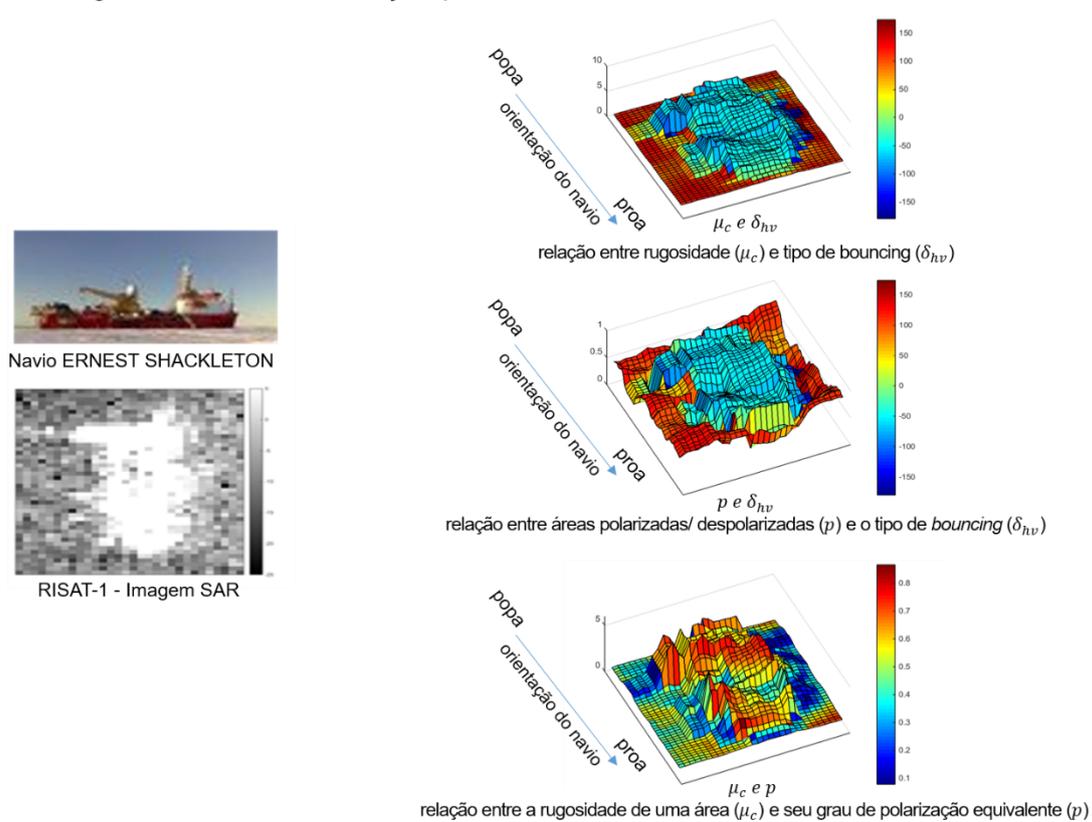


Fonte: Produção do autor.

Tabela B.3 – Descrição do navio ERNEST SHACKLETON

Nome	Tipo	Dimensões	Calado	Velocidade	Direção
ERNEST SHACKLETON	Carga geral	80 x 17 m	7,3 m	11,2 kt	212°

Figura B.3 – Caracterização polarimétrica do navio ERNEST SHACKLETON



Fonte: Produção do autor.



## ANEXO A – ESCALA DE BEAUFORT PARA FORÇA DO VENTO

Escala de Beaufort	Limites de veloc vento (m/s)	Termos descritivos do vento §	Termos descritivos do vento (inglês) §§	Provável altura das ondas (m)
0	<1	Calmaria	<i>Calm</i>	-
1	1 – 3	Bafagem	<i>Light Air</i>	0,1
2	4 – 6	Aragem	<i>Light Breeze</i>	0,2 – 0,3
3	7 – 10	Fraco	<i>Gentle Breeze</i>	0,6 – 1,0
4	11 – 16	Moderado	<i>Moderate Breeze</i>	1,0 – 1,5
5	17 – 21	Fresco	<i>Fresh Breeze</i>	2,0 – 2,5
6	22 – 27	Muito Fresco	<i>Strong Breeze</i>	3,0 – 4,0
7	28 – 33	Forte	<i>Near Gale</i>	4,0 – 5,5
8	34 – 40	Muito Forte	<i>Gale</i>	5,5 – 7,5
9	41 – 47	Duro	<i>Severe Gale</i>	7,0 – 10,0
10	48 – 55	Muito Duro	<i>Storm</i>	9,0 – 12,5
11	56 – 63	Tempestuoso	<i>Violent Storm</i>	11,5 – 16,0
12	>64	Furacão	<i>Hurricane</i>	>14,0

Fonte: § [https://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/refer/escala\\_beaufort.htm](https://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/refer/escala_beaufort.htm)

§§ <http://www.metoffice.gov.uk/guide/weather/marine/beaufort-scale>



## ANEXO B – ESCALA DE DOUGLAS PARA O ESTADO DO MAR

Escala de Douglas	Provável altura das ondas (m)	Termos descritivos do mar*	Termos descritivos do mar (inglês)**
0	-	Calmo	<i>Calm (glassy)</i>
1	0 - 0,10	Encrespado	<i>Calm (rippled)</i>
2	0,10 - 0,50	Suave	<i>Smooth</i>
3	0,50 - 1,25	Fraco	<i>Slight</i>
4	1,25 - 2,50	Moderado	<i>Moderate</i>
5	2,50 - 4	Grosso	<i>Rough</i>
6	4 - 6	Muito grosso	<i>Very rough</i>
7	6 - 9	Alto	<i>High</i>
8	9 - 14	Muito alto	<i>Very high</i>
9	Além de 14	Excepcional	<i>Phenomenal</i>

Fonte: \* <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/refer/mar.htm>

\*\* <http://www.nautica.it/info/docs/douglas.htm>