

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Alexandre Becker Campos

ESTUDO SOBRE A DETECÇÃO DE ALVOS EM IMAGENS SAR

Santa Maria, RS
2018

Alexandre Becker Campos

ESTUDO SOBRE A DETECÇÃO DE ALVOS EM IMAGENS SAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Engenharias IV, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

ORIENTADOR: Prof. Natanael Rodrigues Gomes

Santa Maria, RS
2018

Alexandre Becker Campos

ESTUDO SOBRE A DETECÇÃO DE ALVOS EM IMAGENS SAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Engenharias IV, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 16 de julho de 2018:

Natanael Rodrigues Gomes, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Candice Müller, Dra. (UFSM)

Fábio Mariano Bayer, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Neste espaço gostaria de agradecer a tudo e a todos que fizeram este momento ser possível. Agradeço primeiramente a minha família, pelo apoio e confiança depositada em mim nestes anos, superando a distância.

Um agradecimento especial ao Gabriel, que talvez sem seu apoio e amizade nunca teria chego até aqui. Também, com muito carinho, agradeço a todos os colegas de graduação que fizeram parte da minha vida nestes cinco anos. Em especial, aos amigos Eduardo, Marcelo Back, Marcelo Fracaro e Leonardo. Sem vocês, a graduação não teria graça.

Agradeço também a Mariana, por todo o apoio e carinho que recebi em alguns dos momentos mais difíceis. Te desejo tudo que há de melhor neste mundo.

Ao meu orientador, professor Natanael, agradeço pela sua paciência, prestatividade e pela pessoa que és. Neste percurso de dias e noites de discussões a fio na pesquisa, desenvolvi um respeito muito grande pelo profissional e pessoa que o senhor é. Agradeço muito por todos os conselhos, orientações e conversas.

Agradeço imensamente também a cidade de Santa Maria e a Universidade Federal de Santa Maria por tudo o que me proporcionaram. Amigos, histórias e oportunidades que me farão levar esta cidade e universidade para sempre em meu coração.

A todos os amigos que passaram pela minha vida neste período que aqui não foram citados, meu mais sincero obrigado e minhas desculpas pela falta de citação. Não é falta de lembrança, é falta de espaço. Agradeço a todos que passaram pela minha vida e me impactaram de alguma forma, inclusive aos professores que serviram de inspiração profissional e pessoal.

Desejo aqui a todos que foram citados, de forma direta ou não, todo o sucesso e felicidade neste mundo. Muito obrigado.

RESUMO

ESTUDO SOBRE A DETECÇÃO DE ALVOS EM IMAGENS SAR

AUTOR: Alexandre Becker Campos
ORIENTADOR: Natanael Rodrigues Gomes

A utilização de radares do tipo SAR (Synthetic Aperture Radar) vem crescendo nas últimas décadas, se apresentando como uma excelente alternativa para o sensoriamento remoto da Terra e com aplicações variando de exploração espacial até a detecção de mudanças para aplicações militares. Este trabalho é um estudo sobre imagens adquiridas através de radares do tipo SAR e de técnicas para extrair resultados das mesmas. As imagens SAR utilizadas neste estudo são parte da base de dados sueca CARABAS-II, com o objetivo de desenvolver um algoritmo capaz de modelar e detectar mudanças entre elas. O problema da detecção de alvos é formulado matematicamente, assim como a estatística para o modelamento das imagens fornecidas pela base de dados. Uma estatística de teste é apresentada para a aplicação do método de detecção de mudanças utilizando da distribuição Rayleigh bivariada. Metodologias para a detecção de alvos são então desenvolvidas, utilizando tanto uma abordagem de alvo fixo quanto adaptativo. Posteriormente, técnicas de processamento de imagem são apresentadas para a eliminação de falsos alarmes e refinamento do resultado final.

Palavras-chave: Detecção de mudanças. Distribuição Rayleigh bivariada. Processamento de imagem. Radar de abertura sintética. Teste de razão de verossimilhança.

ABSTRACT

A STUDY ON THE DETECTION OF TARGETS IN SAR IMAGES

AUTHOR: Alexandre Becker Campos
ADVISOR: Natanael Rodrigues Gomes

The use of synthetic aperture radars (SAR) has been growing in the last few decades, appearing to be an excellent alternative to Earth's remote sensing and with applications varying from space exploration to change detection applied in the military field. This work is a study about SAR images and techniques to extract results from them. The SAR images that are tested in this study are part of the Swedish database CARABAS-II, with this work aiming to develop an algorithm capable of model and detect changes in those images. The problem of detecting targets is mathematically formulated, as well as the statistics adopted to model the images from the database. One test statistics is presented to employ the change detection method by a bivariate Rayleigh distribution. Methodologies for the target detection are developed, using a fixed and adaptive value for the estimation of the target. Later, image processing techniques are presented to remove false alarms.

Keywords: Bivariate Rayleigh distribution. Change detection. Image processing. Likelihood ratio test. Synthetic aperture radar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Visão geral de um sistema de radar.	13
Figura 2.2 – Aquisição dos sinais refletidos.	15
Figura 2.3 – Imagem SAR 2x3 km obtida pelo CARABAS-II. O bloco de 25 alvos está destacado em vermelho.	17
Figura 3.1 – Regiões de decisão e probabilidades.	21
Figura 3.2 – Comparação entre as distribuições teóricas (linha contínua) e observações reais (histograma).	24
Figura 3.3 – Comparação entre a FDP de Rayleigh e o histograma de uma imagem do banco de dados.	25
Figura 4.1 – Imagem original de vigilância z_V , com alvos destacados em vermelho, e alvos visíveis na imagem.	28
Figura 4.2 – Ilustração da localização dos máximos das imagens de vigilância z_V e diferenças z_D para um par de imagens de referência e vigilância. Os resultados foram dilatados com um elemento estruturante 5x5 (seção 5.1.1) para melhor visualização.	30
Figura 4.3 – Comparação da matriz de alvos M_A com a imagem original de vigilância z_V . Os alvos verdadeiros foram destacados em vermelho e os resultados da matriz M_A foram dilatados com um elemento estruturante 5x5 (seção 5.1.1) para melhor visualização.	31
Figura 4.4 – Diagrama de blocos para a definição de um alvo efetivo adaptativo.	32
Figura 5.1 – Elemento estruturante oito-conectado.	33
Figura 5.2 – Comparação entre o processo de dilatação e erosão utilizando o elemento estruturante oito-conectado.	35
Figura 5.3 – Comparação entre o processo de abertura e fechamento utilizando o elemento estruturante oito-conectado.	36
Figura 5.4 – Filtro CFAR.	37
Figura 6.1 – Comparação da performance de detecção e falsos alarmes para os diferentes valores de alvo efetivo. Cada ponto representa um par de imagens.	40
Figura 6.2 – Comparação entre as imagens de referência, vigilância e resultante para o alvo efetivo fixo.	42
Figura 6.3 – Comparação entre as imagens de referência, vigilância e resultante para alvo efetivo adaptativo ($\lambda_{NP} = 1$).	45
Figura 6.4 – Comparação entre as imagens de referência, vigilância e resultante para alvo efetivo adaptativo ($\lambda_{NP}^b = 8 \times 10^3$).	48
Figura 6.5 – Comparação entre as imagens de referência, vigilância e resultante para alvo efetivo adaptativo utilizando CFAR.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre a resolução espacial de sistemas RAR e SAR.	15
Tabela 6.1 – Resultados para o alvo efetivo $L = 0,625$, $\lambda_{NP} = 1$	41
Tabela 6.2 – Resultados para o alvo efetivo adaptativo e $\lambda_{NP} = 1$. O valor de L encontrado para cada par de imagens também é disposto na tabela.	44
Tabela 6.3 – Comparação entre os resultados com o alvo efetivo considerando uma mudança de limiar λ_{NP}	47
Tabela 6.4 – Resultados obtidos para o alvo efetivo adaptativo com a aplicação de um filtro CFAR.	49
Tabela 6.5 – Comparação da probabilidade de detecção e falsos alarmes por quilômetro quadrado para cada método.	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Especificações da base de dados.	18
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Alvo efetivo
λ_{NP}	Limiar do teste estatístico de acordo com o critério de Neyman-Pearson
N_{FA}	Número de falsos alarmes
P_D	Probabilidade de detecção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	11
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2	A TECNOLOGIA SAR	13
2.1	RADARES E SISTEMAS SAR	13
2.2	A BASE DE DADOS	16
3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	19
3.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	19
3.1.1	As hipóteses	19
3.1.2	O teste de hipótese	20
3.2	ESTATÍSTICA DA IMAGEM	22
3.2.1	Distribuição da imagem	23
3.2.1.1	<i>Distribuição Rayleigh</i>	24
4	METODOLOGIA PARA A DEFINIÇÃO DE UM ALVO EFETIVO	28
4.1	ALVO EFETIVO FIXO	28
4.2	ALVO EFETIVO ADAPTATIVO	29
5	TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM	33
5.1	MORFOLOGIA MATEMÁTICA	33
5.1.1	Dilatação	33
5.1.2	Erosão	34
5.1.3	Abertura e fechamento	35
5.2	NORMALIZAÇÃO CFAR	36
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	38
6.1	METODOLOGIA DE TESTES	38
6.1.1	Detecções para um alvo efetivo fixo	39
6.1.2	Detecções para um alvo efetivo adaptativo	43
6.1.2.1	<i>Alvo efetivo adaptativo com uma variação do limiar λ_{NP}</i>	46
6.1.2.2	<i>Alvo efetivo adaptativo com a aplicação de uma normalização CFAR</i>	49
6.1.3	Comparação de métodos para redução de falsos alarmes empregando um alvo efetivo adaptativo	52
6.2	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	52
7	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem crescido o número de imagens da Terra, em alta qualidade, produzidas por sistemas de radares de abertura sintética (SAR) embarcados em uma variedade de veículos aéreos e espaciais (OLIVER; QUEGAN, 2004). Este crescimento vem desde os anos 50, quando Carl Wiley, da *Goodyear Aircraft Corporation*, observou que existia uma correspondência direta entre a coordenada ao longo da pista de um objeto refletor e do deslocamento de efeito Doppler instantâneo do sinal refletido do objeto para o radar. Ele concluiu que uma análise da frequência dos sinais refletidos poderiam viabilizar uma melhor resolução de azimute que a permitida pelo feixe físico aplicado aos sistemas de radares de abertura real (RAR) daquela época (MCCANDLESS; JACKSON, 2004).

Um radar de abertura sintética é um radar acoplado a uma plataforma móvel. Similar a um radar convencional, ondas eletromagnéticas são sequencialmente transmitidas e a reflexão delas é coletada pela antena do mesmo. Devido a característica móvel do sistema, o tempo de transmissão/recepção é traduzido em posições diferentes. Uma combinação dos sinais recebidos permite a construção de uma abertura visual, sintética, que é muito mais longa que o comprimento da antena física (MOREIRA et al., 2013).

A abertura sintética é capaz de gerar então uma alta resolução de azimute, que é independente de condições climáticas e de iluminação. Tamanha vantagem proporciona a aplicação de sistemas SAR nas áreas da geociência e pesquisas ambientais, mapeamentos, detecção de mudanças, segurança e exploração espacial (MOREIRA et al., 2013).

Inicialmente voltados para sistemas espaciais, a utilização deste radar embarcado em veículos aéreos para aplicações civis e militares ganhou força. Enquanto sistemas civis são voltados para a detecção de alvos naturais e monitoramento, os sistemas militares visam a detecção de objetos construídos pelo homem, como veículos, em ambientes caóticos e com densa vegetação.

Em Lundberg et al. (2006) é apresentado o problema da detecção de alvos em áreas com grande vegetação, utilizando como base o banco de dados obtido em uma campanha realizada pelo CARABAS-II, no norte da Suécia, em 2002. O propósito do levantamento realizado por eles, composto de 24 imagens, é de se obter dados para a detecção de mudanças em diferentes condições de operação.

Neste estudo visa-se melhorar a detecção de alvos em imagens oriundas de radares de tecnologia SAR. Para tal, é analisado um modelo matemático capaz de descrever as imagens trabalhadas e metodologias para a aplicação de um teste estatístico são levantadas.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo o estudo da detecção de alvos em imagens SAR, com a aplicação de um algoritmo capaz de detectar mudanças utilizando como teste o banco de dados sueco CARABAS-II.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Visa-se isolar alvos (neste caso, veículos militares) em meio a uma imagem composta por vegetação, edifícios e lagos. Esta é uma aplicação militar que foi possível graças ao aprimoramento da tecnologia SAR. Trabalhos podem ser vistos nesse sentido em Huang, Ferro-Famil e Reigber (2012), Lundberg et al. (2006), Ulander et al. (2005) e Gomes et al. (2016).

A abordagem utilizada neste trabalho é semelhante à aplicada em Ulander et al. (2005) e Gomes et al. (2016), onde é feita uma análise estatística das imagens, primeiro estudando as características dos dados fornecidos pela base de dados CARABAS-II e os aproximando por uma distribuição capaz de representar as imagens.

As imagens possuem *pixels* que podem ser classificados segundo duas hipóteses: considerando a presença ou não de um alvo. Um valor de alvo deve ser estimado para a classificação dos *pixels* nestas hipóteses e metodologias para tal devem ser desenvolvidas.

Um teste estatístico é aplicado segundo as condições estabelecidas pelas hipóteses visando o maior número possível de detecções corretas e um número reduzido de falsos alarmes (falsas detecções). Para a redução destes falsos alarmes é possível aplicar ferramentas de processamento de imagem.

Desta forma, um algoritmo é desenvolvido tendo como entradas duas imagens, uma de referência e uma de vigilância, produzindo como saída uma imagem que aponta a localização de mudanças (alvos) na imagem de vigilância. Os processos envolvidos para tal são então a definição da distribuição utilizada, as hipóteses levantadas para o equacionamento, a metodologia para a definição de um valor de alvo, a aplicação de um teste estatístico e a utilização de ferramentas de morfologia matemática e processamento de imagem para o refinamento dos resultados.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é dividido em capítulos que visam apresentar a tecnologia SAR, a formulação matemática do problema, métodos para a aplicação da estatística de teste empregada e técnicas de processamento de imagem para refino dos resultados, posteriormente apresentados. Desta forma, o Capítulo 2 traz uma abordagem geral sobre a tecnologia SAR e da base de dados

utilizada. O Capítulo 3 trata dos métodos para o modelamento destas imagens e a estatística utilizada. O Capítulo 4 apresenta duas metodologias para a estimação de um valor de alvo utilizado para o teste estatístico. Ferramentas de processamento de imagem e morfologia matemática são apresentadas no Capítulo 5. Por fim, no Capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos para as abordagens selecionadas de acordo com a base de dados disponível, com a discussão dos mesmos. As conclusões são apresentadas com a discussão do trabalho e propostas futuras.

2 A TECNOLOGIA SAR

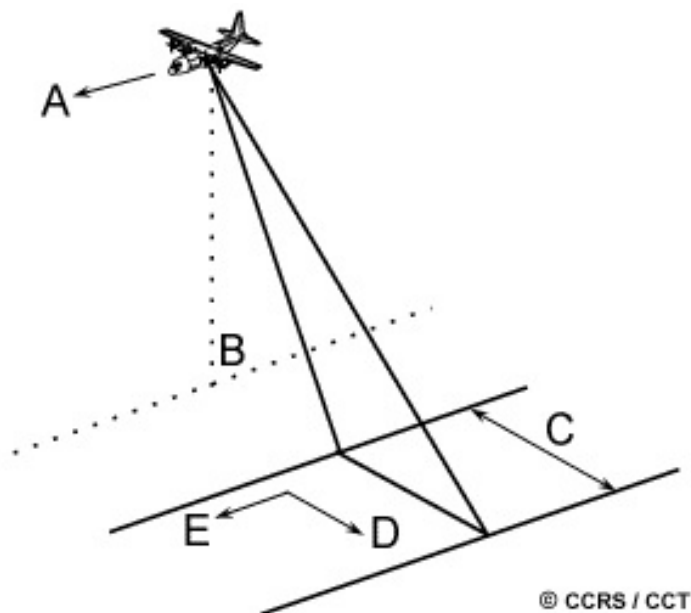
Neste capítulo é apresentada uma visão geral sobre radares e a tecnologia SAR, dos princípios de funcionamento até a formação das imagens. Também é apresentado o banco de dados utilizado para os resultados presentes no Capítulo 6.

2.1 RADARES E SISTEMAS SAR

Um radar é, essencialmente, um mecanismo medidor de distância ou alcance. Consiste basicamente de um transmissor, um receptor, uma antena e um sistema eletrônico capaz de processar e adquirir dados. O transmissor gera sucessivos pulsos em intervalos regulares que são focados pela antena em um feixe, que ilumina a superfície em um ângulo oblíquo ao movimento da plataforma. A antena recebe uma porção da energia transmitida refletida por vários objetos dentro do feixe iluminado, com a localização destes podendo ser determinada medindo o atraso de tempo entre a transmissão do pulso e a recepção do eco dos diferentes alvos. Com a plataforma se movendo para a frente, gravando e processando o sinal recebido, se constrói uma imagem bidimensional da superfície (CCRS, 2016).

A Figura 2.1 apresenta um sistema de radar embarcado em um avião e uma identificação para os conceitos de navegação.

Figura 2.1 – Visão geral de um sistema de radar.



A plataforma se move para frente na direção de voo (A) com a nadir (B) diretamente abaixo. O feixe de micro-ondas é transmitido oblíquo a direção de voo e ilumina uma faixa (C) paralela a nadir. *Range* (D) se refere a dimensão transversal perpendicular a direção de voo, enquanto o azimute (E) refere a dimensão ao longo da pista paralela à direção de voo (CCRS, 2016). A imagem tem então uma geometria de vista lateral.

O *range*, então, é a distância do objeto refletido, sendo a resolução de *range* de um radar a habilidade de distinguir dois objetos separados por uma distância mínima. Se os objetos estão separados adequadamente, cada um será localizado em uma célula de resolução diferente e será distinguível. Se não, a informação do radar será uma combinação complexa da energia refletida pelos dois objetos (MCCANDLESS; JACKSON, 2004).

A resolução de *range* pode ser descrita como na Equação 2.1, onde ela é função da largura de banda β do pulso (ou da largura de pulso transmitido τ) e da velocidade da luz c .

$$R_{range} = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2\beta} \quad (2.1)$$

A maior parte dos radares modernos transmitem um pulso modelado em frequência chamado *chirp*. A utilização de um pulso modelado em frequência ao invés de amplitude permite aumentar a resolução de *range* do sistema.

O transmissor varia a frequência do pulso do radar linearmente em uma determinada gama de frequências, com essa variação determinando a largura de banda de radio frequência (RF) do sistema. O comprimento e comportamento do *chirp* são baseados nas capacidades de *hardware* do radar (potência do pulso de RF, frequência de repetição de pulso (PRF), conversão de amostragem analógica-digital (A/D)) e dos requerimentos para a resolução de *range* (MCCANDLESS; JACKSON, 2004).

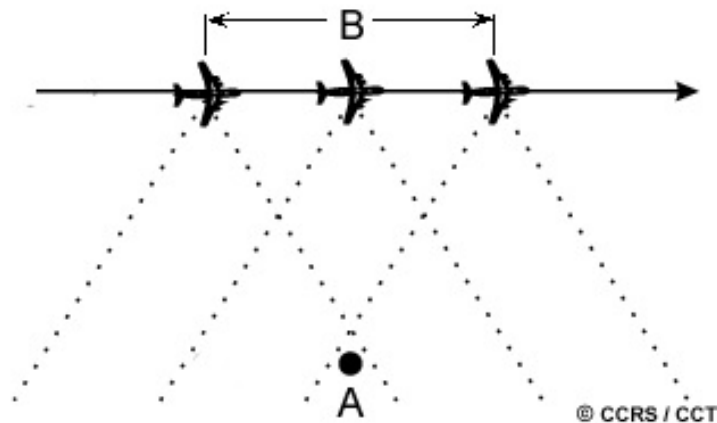
Além da resolução de *range*, outra característica fundamental de um radar é a resolução de azimute. Em RARs e sensores óticos, a resolução é obtida através das dimensões físicas da abertura. Assim, a resolução de azimute de um RAR é uma função do comprimento de onda λ , do *range* (R) do alvo e da dimensão da antena l , como visto na Equação 2.2 (MCCANDLESS; JACKSON, 2004).

$$R_{azimute(RAR)} = \frac{\lambda}{l} \times R \quad (2.2)$$

A partir da Equação 2.2, uma melhor resolução de azimute pode ser atingida através de um aumento da frequência (diminuindo o comprimento de onda), do comprimento da antena ou diminuindo o *range* do alvo. Estes fatores são, porém, impraticáveis no espaço. Em radares aerotransportados, antenas são usualmente limitadas em um ou dois metros; para satélites elas podem ter entre dez a quinze metros em comprimento.

Para superar este empecilho, o movimento da plataforma e um tratamento especial para a gravação e processamento dos ecos recebidos são utilizados para simular uma antena muito maior. A Figura 2.2 ilustra o processo do voo.

Figura 2.2 – Aquisição dos sinais refletidos.



Fonte: Adaptado de CCRS (2016).

Quando o alvo (A) entra no feixe do radar, os ecos refletidos de cada pulso transmitido começam a ser gravados e o processo continua até enquanto o alvo está no feixe. O ponto onde o alvo deixa o feixe determina o comprimento (B) da antena sintética (CCRS, 2016). A resolução, então, é determinada pela largura de banda Doppler do sinal e a utilização deste processo caracteriza um sistema de radar com abertura sintética (SAR).

Em Marino (2010), a Equação 2.3 mostra a resolução de azimute para sistemas SAR após a compressão dos dados.

$$R_{azimute(SAR)} = \frac{l}{2} \quad (2.3)$$

Pela análise da Equação 2.3, a resolução melhora quando a dimensão efetiva l diminui. A Tabela 2.1 sumariza as diferenças na resolução entre sistemas RAR e SAR.

Tabela 2.1 – Comparação entre a resolução espacial de sistemas RAR e SAR.

Direção espacial	RAR	SAR
Azimute	$\frac{\lambda \times R}{l}$	$\frac{l}{2}$
Range	$\frac{c}{2\beta}$	$\frac{c}{2\beta}$

Fonte: Adaptado de McCandless e Jackson (2004).

Um SAR consiste de um sistema que inclui blocos convencionais de radares como antena, transmissor, receptor, um sistema de alta tecnologia para a coleta de dados provendo um histórico de fases de Doppler e um similarmente avançado processador de sinais capaz de fazer uma imagem deste histórico. Assim, o sistema consiste de uma união entre um radar e tecnologias de processamento de sinal (MCCANDLESS; JACKSON, 2004).

Em Moreira et al. (2013) é apresentado então um resumo sobre o sistema. Sistemas SAR

possuem uma geometria de imagem de vista lateral e são baseadas em um radar pulsante instalado em uma plataforma com movimento. O sistema de radar transmite pulsos eletromagnéticos com alta potência e recebe o eco do sinal refletido em uma forma sequencial. Valores típicos da frequência de repetição de pulso variam de centenas até milhares de Hertz em sistemas aéreos e espaciais, respectivamente. A largura de faixa varia tipicamente de poucos quilômetros até 20 km em sistemas aéreos e de 30 a 500 km em sistemas espaciais. O pulso transmitido interage com a superfície da Terra e apenas uma porção é retransmitido para a antena receptora, que pode ser a mesma que a transmissora (radar monoestático) ou uma diferente (radar bi ou multiestático). A amplitude e fase do sinal refletido depende das propriedades físicas (i.e., geometria, rugosidade) e elétricas (i.e, permissividade) da imagem do objeto.

Os dados crus obtidos pelo SAR não são uma imagem já que seus pontos estão espalhados em *range* (pelo pulso de longa frequência) e pelo azimute (pelo feixe real se movendo pelo alvo durante o tempo de exposição) (MCCANDLESS; JACKSON, 2004). Estes dados então são processados de forma a gerar uma matriz de dados bidimensional de amostras complexas. Cada amostra tem sua parte real e imaginária, assim tendo um valor de amplitude e fase. A primeira dimensão corresponde a direção de *range* (*fast time*) e a segunda ao azimute, também chamada de *slow time* (MOREIRA et al., 2013).

O processamento destas imagens, porém, é complexo. Todos os pontos que existem no feixe em cada instante de pulso são superimpostos e criam um complexo padrão de interferência que não pode ser interpretado em termos de alvos e a localização dos mesmos. Ainda, presentes nestes dados estão distorções e perturbações entre a plataforma de coleta e a terra (MCCANDLESS; JACKSON, 2004).

Em CCRS (2016) e Marino (2010) são abordadas as potenciais perturbações e distorções em detalhe. Ainda, em Curlander e McDonough (1991) são apresentadas ferramentas para a correção destes problemas, como a utilização da transformada de Fourier.

2.2 A BASE DE DADOS

Em Lundberg et al. (2006) é apresentado o conjunto de imagens SAR utilizado. Ele faz parte da base de dados sueca CARABAS-II, que utiliza uma faixa de banda de frequência muito elevada (VHF). Tal base de dados é resultado de uma campanha de testes no norte da Suécia, em 2002, com o propósito de obter dados para a detecção de mudanças em diferentes condições de operação. Foram conduzidas dezessete missões, resultando em 150 voos sobre a área do terreno.

CARABAS-II é um sistema de segunda geração SAR com banda ultra-larga, transportado pelo ar, projetado e operado pela Agência Sueca de Pesquisa em Defesa (FOI). O sistema transmite ondas de rádio HH polarizadas (transmissão horizontal e recepção horizontal) entre 20-90 MHz, correspondendo a comprimentos de onda entre 3,3 m e 15 m (LUNDBERG et al.,

2006). Em Hellsten et al. (1996) é tratado sobre o desenvolvimento e projeto do sistema.

A área utilizada para os testes foi a localidade militar de RFN Vidsele, localizada no norte da Suécia. A área de testes incluía principalmente áreas florestadas, mas também lagos, campos e construções (LUNDBERG et al., 2006).

Um exemplo de imagem obtida pode ser visto na Figura 2.3. Nela pode-se observar a presença de 25 alvos, número constante em todas as imagens obtidas. Os alvos são veículos militares de três tamanhos: dez TGB11 com dimensões 4,4x1,9x2,2 m, oito TGB30 com dimensões 6,8x2,5x3,0 m e sete TGB40 com dimensões 7,8x2,5x3,0 m (comprimento x largura x altura).

Figura 2.3 – Imagem SAR 2x3 km obtida pelo CARABAS-II. O bloco de 25 alvos está destacado em vermelho.



Fonte: Adaptado da base de dados CARABAS-II.

A base de dados consiste de 24 imagens SAR de amplitude, onde a informação da fase

foi removida tirando o valor absoluto dos dados. Cada imagem foi georreferenciada para o sistema de referência sueco RR92 e cobre uma área de tamanho 2x3 km. O tamanho do *pixel* é de 1x1 m, fazendo com que a imagem tenha 3000 linhas e 2000 colunas (LUNDBERG et al., 2006).

Em Lundberg et al. (2006) as imagens são organizadas como de vigilância e de referência segundo o critério no Quadro 2.1. As notações de missão e voo condizem com as notações empregadas na classificação das imagens na base de dados, sendo elas respeitadas posteriormente no Capítulo 6.

Quadro 2.1 – Especificações da base de dados.

Par de imagens	Imagem de vigilância		Imagem de referência		Área (km ²)	Nº de alvos conhecidos
	Missão	Voo	Missão	Voo		
1	2	1	3	1	6	25
2	3	1	4	1	6	25
3	4	1	5	1	6	25
4	5	1	2	1	6	25
5	2	2	4	2	6	25
6	3	2	5	2	6	25
7	4	2	2	2	6	25
8	5	2	3	2	6	25
9	2	3	5	3	6	25
10	3	3	2	3	6	25
11	4	3	3	3	6	25
12	5	3	4	3	6	25
13	2	4	3	4	6	25
14	3	4	4	4	6	25
15	4	4	5	4	6	25
16	5	4	2	4	6	25
17	2	5	4	5	6	25
18	3	5	5	5	6	25
19	4	5	2	5	6	25
20	5	5	3	5	6	25
21	2	6	5	6	6	25
22	3	6	2	6	6	25
23	4	6	3	6	6	25
24	5	6	4	6	6	25
Total					144	600

Fonte: Adaptado de Lundberg et al. (2006).

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo é tratado sobre a formulação matemática do problema de detecção de mudanças relacionado à base de dados apresentada na Seção 2.2. O problema é primeiro formulado em termos de hipóteses e um teste estatístico é apresentado de forma a testá-las.

3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O método da detecção de mudanças com uma regra estatística foi selecionado para abordar o problema da detecção de alvos em imagens SAR. Em Radke et al. (2005) é abordado a técnica de forma geral e a regra de decisão do algoritmo de detecção de mudanças como um teste estatístico de hipótese.

Para a aplicação do método de detecção de mudanças, tendo em vista a base de dados utilizada, são consideradas como entradas duas imagens SAR georreferenciadas, com valores apenas de amplitude, que cobrem a mesma área mas são adquiridas durante diferentes missões. As imagens são classificadas como de referência e vigilância e o objetivo é combiná-las de forma a suprimir objetos presentes nas duas imagens e dar destaque aos objetos vistos apenas na imagem de vigilância.

3.1.1 As hipóteses

As imagens são compostas por florestas, construções, lagos e alvos. Desta forma, é possível assumir que cada *pixel*, tanto da imagem de referência quanto a de vigilância, é composto por um elemento comum, um ruído aleatório e possivelmente um alvo.

Abordagens e nomenclaturas semelhantes são utilizadas em Lundberg et al. (2006), Ulander et al. (2005) e Gomes et al. (2016) para definir a composição e rótulo das imagens. Consideram-se os subscritos r e v para imagens SAR de referência e vigilância, respectivamente. O elemento comum é denotado como *clutter*¹ c , o ruído como n e alvos como s . Assim, o par correspondente de alvos, *clutter* e ruído são dispostos como na Equação 3.1:

$$\vec{s} = \begin{bmatrix} s_r \\ s_v \end{bmatrix}; \quad \vec{c} = \begin{bmatrix} c_r \\ c_v \end{bmatrix}; \quad \vec{n} = \begin{bmatrix} n_r \\ n_v \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

A decisão da ocorrência ou não de uma mudança em um dado *pixel* x corresponde a escolha de uma das duas hipóteses concorrentes: a hipótese nula H_0 ou a hipótese alternativa

¹Sinais ou ecos não desejados que interferem na observação de sinais desejados.

H_1 , correspondendo a não-ocorrência e a ocorrência de mudança, respectivamente (RADKE et al., 2005).

Desta forma, utilizando da Equação 3.1, duas hipóteses são levantadas: a hipótese nula, H_0 , que considera que não houve mudanças entre as duas imagens analisadas; e a hipótese alternativa, H_1 , considerando que há uma mudança. A ocorrência de uma mudança está relacionada diretamente com a presença de um alvo na imagem SAR analisada. As hipóteses são matematicamente expressas na Equação 3.2:

$$\begin{aligned} H_0 : \vec{z}_0 &= \begin{bmatrix} r_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_r + n_r \\ c_v + n_v \end{bmatrix} \\ H_1 : \vec{z}_1 &= \begin{bmatrix} r_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_r + n_r + s_r \\ c_v + n_v + s_v \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Na Equação 3.2 os subscritos “0” e “1” indicam a hipótese considerada, sendo o primeiro representando a hipótese nula e o segundo a hipótese alternativa. Ambos os vetores complexos \vec{z}_0 e \vec{z}_1 contêm uma imagem SAR de referência e vigilância, denotadas por r e v , respectivamente.

3.1.2 O teste de hipótese

Mais do que formular hipóteses sobre o comportamento da imagem, é necessário formular um teste estatístico capaz de verificar sua validade e, desta forma, atingir os resultados de detecção esperados.

Em Kay (1998) é tratado sobre o teste de hipótese simples, onde as funções densidade de probabilidade de ambas as hipóteses são conhecidas. As duas principais abordagens para tal são a abordagem clássica, baseada no teorema de Neyman-Pearson, e a abordagem Bayesiana, baseada na minimização do risco de Bayes. Ainda segundo Kay (1998), sistemas de radares e sonares tipicamente utilizam o critério de Neyman-Pearson.

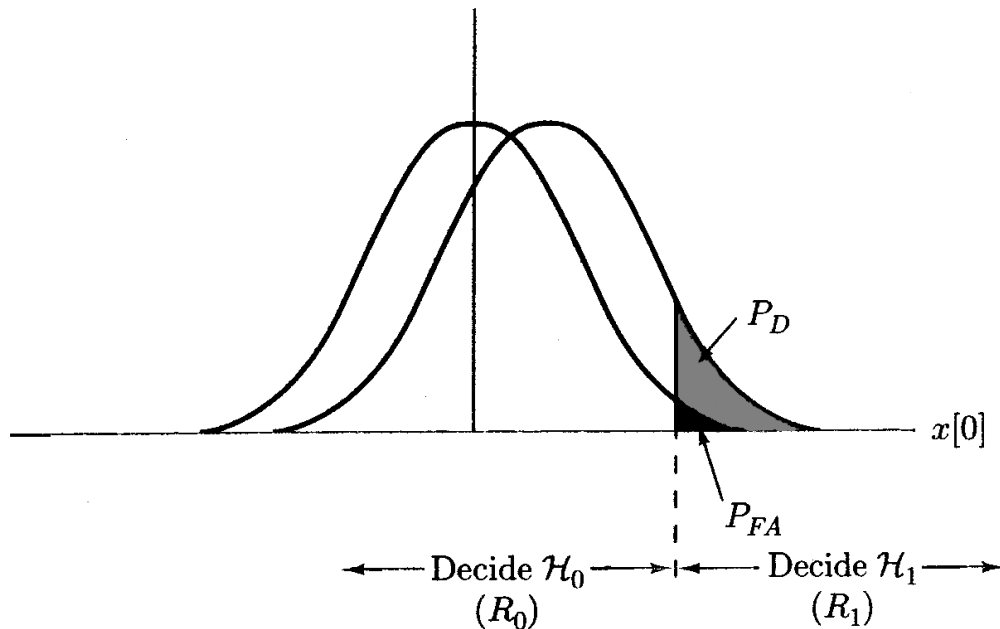
O detector de Neyman-Pearson compara os dados das hipóteses com um valor de limiar. Nesta comparação é possível a ocorrência de dois tipos de erros. Se for decidido pela hipótese H_1 porém H_0 é a verdadeira, ocorre um erro do tipo I. Por outro lado, caso seja decidido por H_0 enquanto H_1 é verdade, é um erro do tipo II. A notação $P(H_i; H_j)$ indica a probabilidade de decidir H_i quando H_j é verdade. Os dois tipos de erros são inevitáveis, porém podem ser intercambiados de acordo com o valor de limiar. A probabilidade de erro do tipo I ($P(H_1; H_0)$) decresce de acordo com o aumento da probabilidade de erro do tipo II ($P(H_0; H_1)$). Não é possível reduzir ambas as probabilidades de erro simultaneamente, sendo uma abordagem típica o projeto de um detector que mantém uma das probabilidades fixa enquanto minimiza a outra (KAY, 1998).

A probabilidade de falso alarme, denotada por P_{FA} , é $P(H_1; H_0)$. Busca-se que esta seja

um valor baixo pelas suas consequências em um radar. Caso detecte-se, falsamente, que um veículo inimigo está presente, um ataque pode ser iniciado de forma errônea. Para o projeto de um detector ótimo, então, busca-se minimizar o outro erro $P(H_0;H_1)$, equivalente a maximizar $1 - P(H_0;H_1)$. O último é simplesmente $P(H_1;H_1)$ e é chamado probabilidade de detecção (P_D). Assim, a abordagem de Neyman-Pearson visa maximizar $P_D = P(H_1;H_1)$ de acordo com uma constante $P_{FA} = P(H_1;H_0)$ (KAY, 1998).

A Figura 3.1 apresenta as regiões de decisão de acordo com duas funções densidade de probabilidade.

Figura 3.1 – Regiões de decisão e probabilidades.



Fonte: Adaptado de Kay (1998).

Assim, segundo Kay (1998) e Ulander et al. (2005), é apresentada a estatística de teste utilizada neste trabalho na Equação 3.3, a partir do teste de razão de verossimilhanças de Neyman-Pearson.

$$\Lambda(z) = \frac{P(\vec{z}|H_1)}{P(\vec{z}|H_0)} \underset{H_1}{\overset{H_0}{\geq}} \lambda_{NP} \quad (3.3)$$

Em que $P(\vec{z}|H_1)$ é a probabilidade condicional de \vec{z} dada a hipótese H_1 e $P(\vec{z}|H_0)$ a probabilidade condicional dada a hipótese H_0 . A estatística de teste acima é orientada a confirmar a hipótese alternativa H_1 caso o valor de limiar λ_{NP} seja superado.

3.2 ESTATÍSTICA DA IMAGEM

A aplicação do teste estatístico depende da distribuição dos *pixels* das imagens. Desta forma, é necessário encontrar a distribuição estatística teórica que melhor descreva o comportamento destes em um sistema real.

Os *pixels* das imagens de referência e vigilância sob a hipótese nula são chamados de r_0 e v_0 , respectivamente. Sob a hipótese alternativa, que considera uma mudança \vec{s} , são chamados de r_1 e v_1 . Por se tratar de uma base de dados onde há informações apenas da magnitude da imagem, as expressões na Equação 3.4 são analisadas quando testa-se H_0 e H_1 .

$$\begin{aligned} |r_0| &= |c_r + n_r| \\ |v_0| &= |c_v + n_v| \\ |r_1| &= |c_r + n_r + s_r| \\ |v_1| &= |c_v + n_v + s_v| \end{aligned} \tag{3.4}$$

Apenas a distribuição sob H_0 da estatística de teste é conhecida. Para contornar este empecilho, em Ulander et al. (2005) as imagens, após um pré-processamento, são aproximadas por uma distribuição Gaussiana bivariada com média diferente de zero. A distribuição da estatística de teste resultante, conforme o critério de Neyman-Pearson, recai em uma distribuição Gaussiana.

Entretanto, segundo Gomes et al. (2016), a distribuição da estatística de teste sob H_1 pode ser aproximada pela distribuição correspondente sob H_0 a partir da subtração do valor de alvo \vec{s} . Esta abordagem é utilizada neste trabalho por apresentar melhores resultados comparativamente.

Assim, a partir da Equação 3.4, a formulação adequada para a estatística de teste, considerando valores complexos, é apresentada na Equação 3.5.

$$\begin{aligned} |r_1 - s_r| &= |r_0| \\ |v_1 - s_v| &= |v_0| \end{aligned} \tag{3.5}$$

Considerando que apenas os valores de $|r_1|$ e $|v_1|$ são conhecidos, a equação deve ser reformulada em termos do valor absoluto dos *pixels* r_1 e v_1 . Para tal é utilizado da desigualdade triangular presente na subtração de módulos. De acordo com o teorema, apresentado em Stewart (2012), $|a - b| \geq |a| - |b|$. A correção desta desigualdade exige uma compensação, denotada por α_r para a referência e α_v para a imagem de vigilância, apresentada na Equação 3.6.

$$\begin{aligned} |r_1| - \alpha_r |s_r| &= |r_0| \\ |v_1| - \alpha_v |s_v| &= |v_0| \end{aligned} \tag{3.6}$$

Por considerar apenas a variação na imagem de vigilância, o valor de alvo s_r em v_0 é considerado nulo. Ainda, faz-se a estimação da mudança detectada na imagem de vigilância

não mais em termos do valor verdadeiro de alvo s_v e sim do valor de alvo efetivo $L = \alpha_v |s_v|$. Finalmente, a Equação 3.7 é considerada para uma distribuição dada a hipótese H_1 .

$$\begin{aligned} |r_1| &= |r_0| \\ |v_1| - L &= |v_0| \end{aligned} \quad (3.7)$$

O valor de L deve ser estimado de forma a adequar a distribuição da estatística de teste sob H_1 para a distribuição correspondente sob H_0 . Além disso, estabelece um critério para a aplicação da estatística de teste definindo um valor mínimo de mudança considerado.

3.2.1 Distribuição da imagem

Em Oliver e Quegan (2004) é apresentado um modelo sobre como pode ser vista cada célula de dispersão. No modelo, apresentado na Equação 3.8, cada célula de dispersão é a soma das ondas interagindo com o alvo e sendo refletida com uma mudança de fase e amplitude.

$$Ae^{i\phi} = \sum_{k=1}^N A_k e^{i\phi_k} \quad (3.8)$$

Segundo Oliver e Quegan (2004), para um número alto de objetos iluminados pelo radar estatisticamente idênticos:

- 1) A componente em fase e quadratura observada, $z_1 = A \cos \phi$ e $z_2 = A \sin \phi$, serão duas variáveis aleatórias independentes com distribuição Gaussiana com valor médio zero e variância $\sigma/2$ determinada pelas amplitudes A_k , tendo assim uma função densidade de probabilidade dada pela Equação 3.9:

$$P_{z_1, z_2}(z_1, z_2) = \frac{1}{\pi\sigma} \exp\left(-\frac{z_1^2 + z_2^2}{\sigma}\right) \quad (3.9)$$

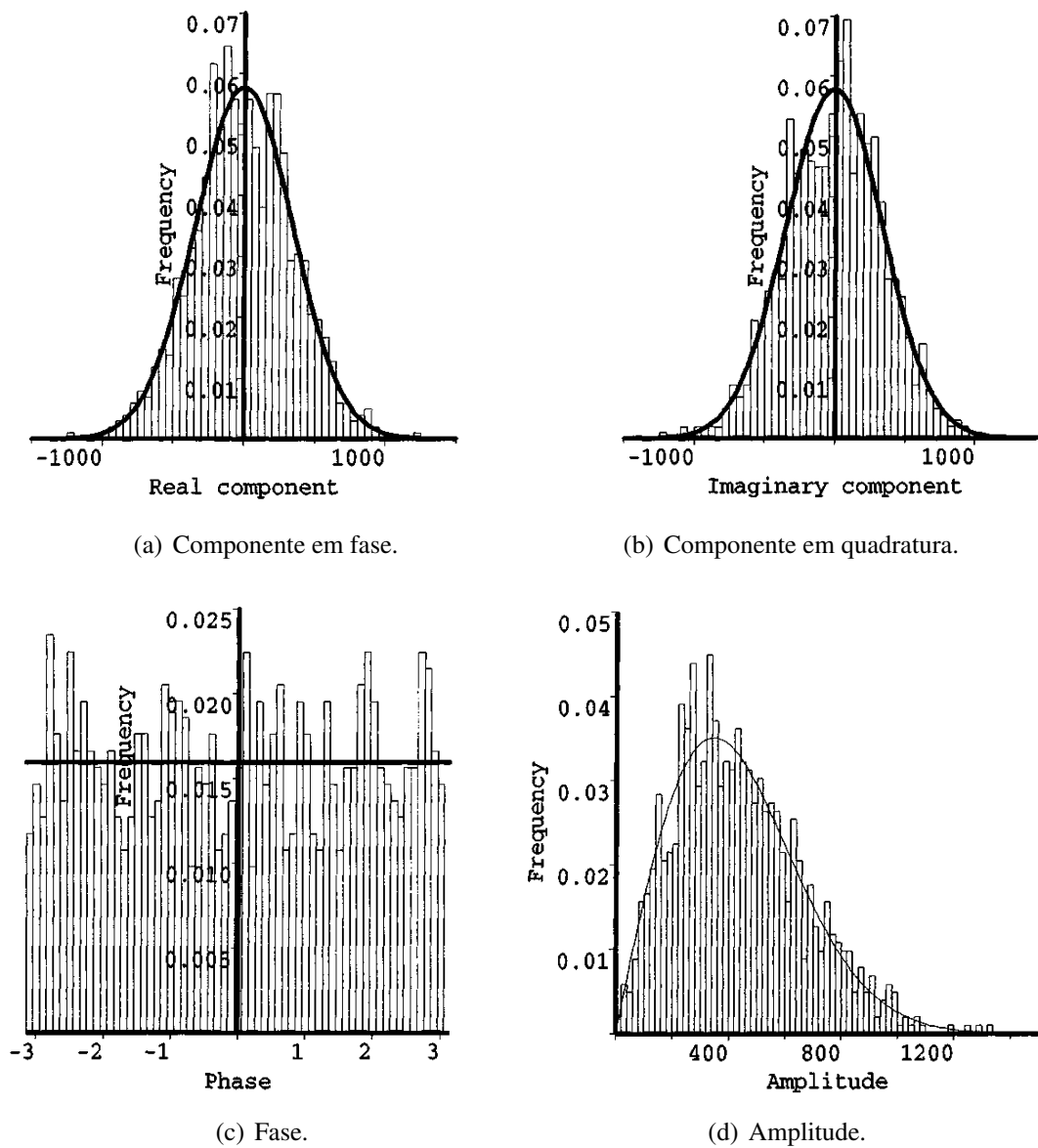
- 2) A fase ϕ observada será uniformemente distribuída em $[-\pi, \pi]$.
- 3) A amplitude A terá uma distribuição Rayleigh, para $A \geq 0$, dada pela Equação 3.10:

$$P_A(A) = \frac{2A}{\sigma} \exp\left(-\frac{A^2}{\sigma}\right) \quad (3.10)$$

Com valor médio $\frac{\sqrt{\pi\sigma}}{2}$ e desvio padrão $\sqrt{\left(1 - \frac{\pi}{4}\right)\sigma}$.

Em Oliver e Quegan (2004) é apresentado a Figura 3.2, que ilustra uma comparação entre as distribuições teóricas para estas observações com imagens de teste reais.

Figura 3.2 – Comparação entre as distribuições teóricas (linha contínua) e observações reais (histograma).



Fonte: Adaptado de Oliver e Quegan (2004).

Se tratando do fato de que a base de dados utilizada traz apenas dados de amplitude e a partir dos resultados obtidos em Gomes et al. (2016), se utiliza então a distribuição Rayleigh para a representação dos dados disponíveis.

3.2.1.1 Distribuição Rayleigh

Em Papoulis e Pillai (2002), a representação da distribuição Rayleigh univariada pela sua função densidade de probabilidade (FDP) é dada pela Equação 3.11.

$$f(h; \sigma) = \frac{h}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.11)$$

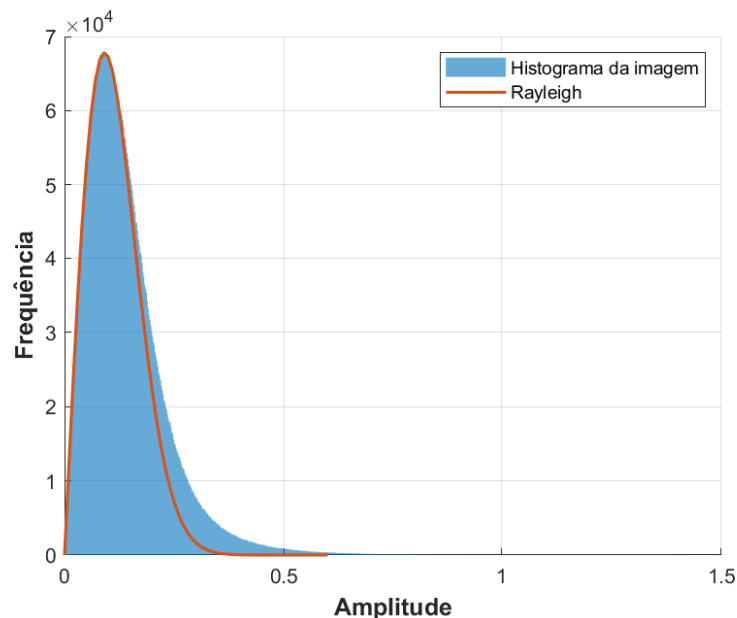
Em que h denota a amplitude da imagem e σ é o parâmetro escalar da função densidade de probabilidade, sendo $\sigma > 0$.

A estimação do parâmetro σ é discutida em Mkolesia, Kikawa e Shatalov (2016). No artigo é apresentado a estimação via os métodos de máxima verossimilhança, mínimos quadrados diferenciais e razão de frequência. O último também é aplicado em Moya et al. (2005). O método é dado pela Equação 3.12.

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{h_2^2 - h_1^2}{2(\ln f_1 h_2 - \ln f_2 h_1)}} \quad (3.12)$$

Em que f_1 e f_2 são frequências locais com amplitudes h_1 e h_2 , respectivamente. O método consiste da razão destas frequências que se originam da Equação 3.11. Este resultado é utilizado para a comparação apresentada na Figura 3.3, tendo como base o banco de dados disponível e a Equação 3.11.

Figura 3.3 – Comparação entre a FDP de Rayleigh e o histograma de uma imagem do banco de dados.



Fonte: Próprio autor.

A comparação da Figura 3.3 confirma o esperado por Oliver e Quegan (2004), em especial na Figura 3.2(d). A distribuição Rayleigh na forma de sua densidade de probabilidade apresenta um comportamento semelhante às imagens disponíveis na base de dados, sendo então a suposição de uma distribuição Rayleigh para as hipóteses uma consideração razoável.

Para a aplicação do teste de razão de verossimilhanças da Equação 3.3 são necessárias as funções densidade de probabilidade sob ambas as hipóteses consideradas. Em Simon e Alouini (2005) é apresentada a função densidade de probabilidade da distribuição Rayleigh bivariada, como na Equação 3.13.

$$p_{R_1, R_2}(r_1, \Omega_1; r_2, \Omega_2 | \rho) = \frac{4r_1 r_2}{\Omega_1 \Omega_2 (1 - \rho)} \times \exp\left(-\frac{1}{1 - \rho} \left(\frac{r_1^2}{\Omega_1} + \frac{r_2^2}{\Omega_2}\right)\right) \times I_0\left(\frac{2\sqrt{\rho} r_1 r_2}{(1 - \rho)\sqrt{\Omega_1 \Omega_2}}\right), \quad r_1, r_2 \geq 0 \quad (3.13)$$

Em que Ω_1 , Ω_2 e ρ podem ser calculados de acordo com os estimadores dispostos na Equação 3.14.

$$\hat{\Omega}_i = \overline{r_i^2}, \quad i = 1, 2$$

$$\hat{\rho} = \frac{\text{cov}(r_1^2, r_2^2)}{\sqrt{\text{var}(r_1^2)\text{var}(r_2^2)}} \quad (3.14)$$

Para dados onde há apenas o valor de amplitude conhecido, na Equação 3.13 faz-se o coeficiente de correlação ρ como ρ^2 . Desta forma, como apresentado em Gomes et al. (2016), levando em consideração a Equação 3.2, a densidade de probabilidade sob a hipótese nula H_0 considerando uma distribuição Rayleigh bivariada é formulada segundo a Equação 3.15.

$$P(|\vec{z}_0| | H_0) = \frac{4|r_0||v_0|}{\hat{\Omega}_r \hat{\Omega}_v (1 - \hat{\rho}^2)} \times \exp\left(-\frac{\left(\frac{|r_0|}{\sqrt{\hat{\Omega}_r}}\right)^2 + \left(\frac{|v_0|}{\sqrt{\hat{\Omega}_v}}\right)^2}{(1 - \hat{\rho}^2)}\right) \times I_0\left(\frac{\hat{\rho}}{1 - \hat{\rho}^2} \frac{2|r_0||v_0|}{\sqrt{\hat{\Omega}_r \hat{\Omega}_v}}\right) \quad (3.15)$$

A densidade de probabilidade Rayleigh bivariada sob a hipótese alternativa H_1 é de maneira semelhante formulada a partir das Equações 3.15 e 3.7. Assim, a expressão, considerando apenas a disponibilidade da amplitude, é disposta na Equação 3.16.

$$\begin{aligned}
P(|\vec{z}_1||H_1) &= \frac{4|r_1|(|v_1| - \hat{L})}{\hat{\Omega}_r \hat{\Omega}_v (1 - \hat{\rho}^2)} \times \\
&\quad \exp\left(-\frac{\left(\frac{|r_1|}{\sqrt{\hat{\Omega}_r}}\right)^2 + \left(\frac{|v_1| - \hat{L}}{\sqrt{\hat{\Omega}_v}}\right)^2}{(1 - \hat{\rho}^2)}\right) \times \\
&\quad I_0\left(\frac{\hat{\rho}}{1 - \hat{\rho}^2} \frac{2|r_1|(|v_1| - \hat{L})}{\sqrt{\hat{\Omega}_r \hat{\Omega}_v}}\right) \quad (3.16)
\end{aligned}$$

Nas Equações 3.15 e 3.16 são utilizadas as imagens de referência r e vigilância v para o cálculo dos estimadores $\hat{\Omega}_r$, $\hat{\Omega}_v$ e $\hat{\rho}$, como exposto na Equação 3.14. I_0 é a função de Bessel modificada de ordem zero e \hat{L} é o estimador do valor de alvo efetivo L .

Assumindo então uma função densidade de probabilidade Rayleigh bivariada, o teste da Equação 3.3 pode ser aplicado de acordo com as Equações 3.15 e 3.16, de forma a se obter a expressão da Equação 3.17:

$$\Lambda(\vec{z}) = \frac{|v_1| - \hat{L}}{|v_0|} \times \exp\left(\frac{\left(\frac{|v_0|}{\sqrt{\hat{\Omega}_v}}\right)^2}{1 - \hat{\rho}^2} - \frac{\left(\frac{|v_1| - \hat{L}}{\sqrt{\hat{\Omega}_v}}\right)^2}{1 - \hat{\rho}^2}\right) \times \frac{I_0\left(\frac{\hat{\rho}}{1 - \hat{\rho}^2} \frac{2|r_1|(|v_1| - \hat{L})}{\sqrt{\hat{\Omega}_r \hat{\Omega}_v}}\right)}{I_0\left(\frac{\hat{\rho}}{1 - \hat{\rho}^2} \frac{2|r_0||v_0|}{\sqrt{\hat{\Omega}_r \hat{\Omega}_v}}\right)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \lambda_{NP} \quad (3.17)$$

A Equação 3.17 então apresenta a estatística de teste utilizada para a aplicação do algoritmo de detecção de mudanças. O valor de limiar λ_{NP} é o fator determinante do teste estatístico, confirmando o *pixel* como um possível alvo caso o ultrapasse. O valor ótimo de limiar é obtido através da manipulação da estatística de teste até que uma constante possa ser estimada a partir da distribuição da estatística de teste. Neste trabalho, para fins de simplificação, o valor de limiar λ_{NP} é estimado de forma empírica.

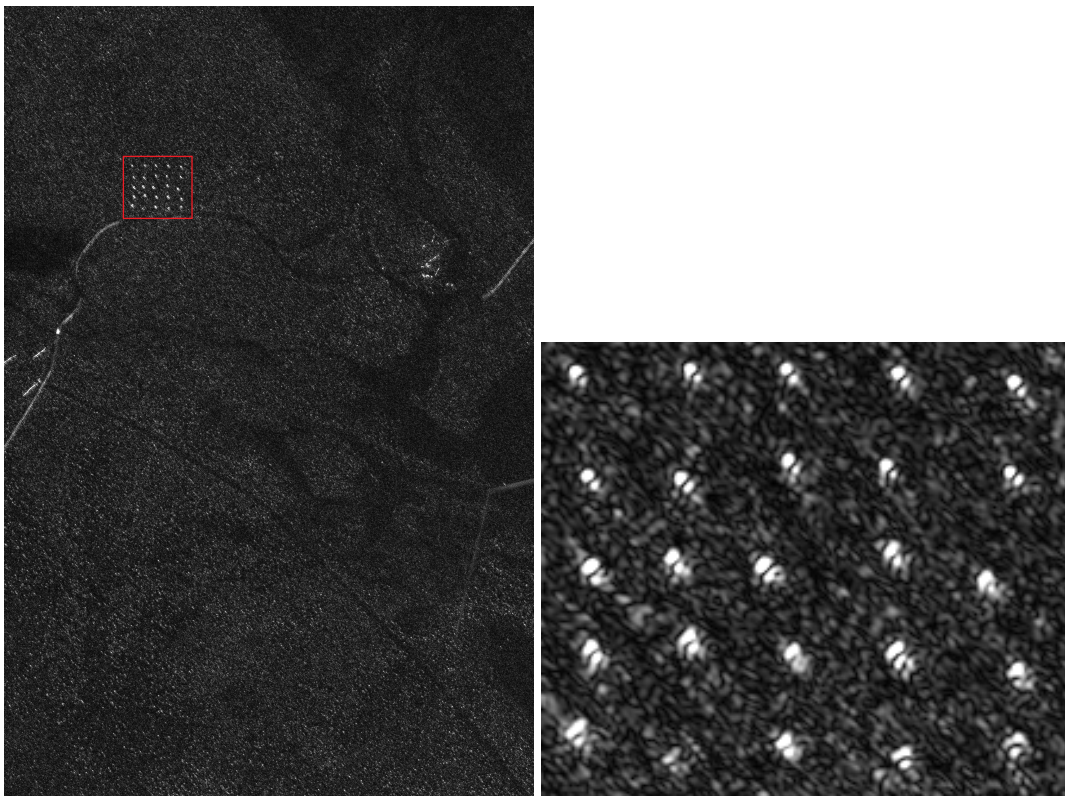
4 METODOLOGIA PARA A DEFINIÇÃO DE UM ALVO EFETIVO

Neste capítulo é abordado o problema da definição do valor de alvo efetivo utilizado para a aplicação da estatística de teste vista no Capítulo 3. Neste trabalho desenvolveu-se duas metodologias para a estimação de um valor de alvo efetivo com base nas características da base de dados utilizada.

4.1 ALVO EFETIVO FIXO

A Figura 4.1 apresenta uma imagem do banco de dados utilizado. A partir da análise da intensidade dos *pixels* presentes na Figura 4.1(b) e suas redondezas, é possível encontrar valores que apresentem uma boa compatibilidade com os alvos a serem detectados. Este processo pode ser feito para cada par de imagens ou até mesmo para todo o conjunto de imagens, visando encontrar um valor constante de alvo efetivo para a aplicação da estatística de teste.

Figura 4.1 – Imagem original de vigilância z_V , com alvos destacados em vermelho, e alvos visíveis na imagem.



(a) Imagem de vigilância.

(b) Alvos aproximados.

4.2 ALVO EFETIVO ADAPTATIVO

Para a estimativa de alvos que levem em conta as variações em cada par de imagens, foi tomada a seguinte formulação da Equação 4.1:

$$z_V - z_R = z_D, \quad (4.1)$$

Em que z_V é a imagem de vigilância, com cada *pixel* podendo corresponder à hipótese H_0 ou H_1 dependendo da presença ou não de um alvo, e z_R é a imagem de referência. O resultado da diferença, z_D , é denominado imagem de diferenças.

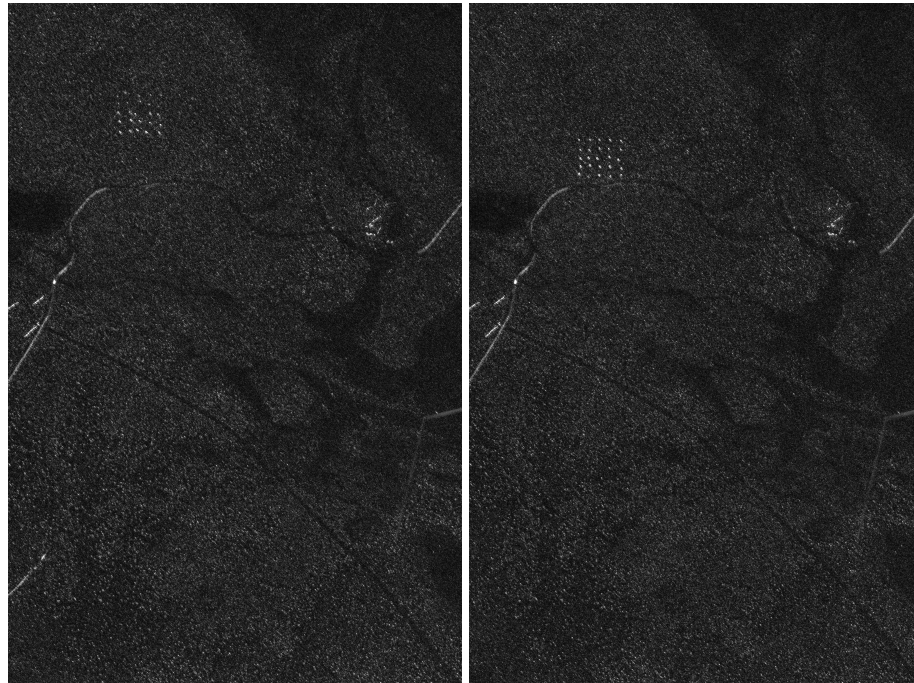
A probabilidade de existência de um alvo é maior para:

1. Valores maiores em z_V : um valor alto de amplitude caracteriza um objeto com alta refletância e, portanto, um possível alvo a ser detectado.
2. Valores maiores em z_D : um valor alto na matriz de diferenças indica uma grande variação entre as imagens de referência e vigilância e, portanto, um possível alvo a ser detectado.

Um método para encontrar estes valores altos sem a estipulação de parâmetros é a partir da análise dos valores das linhas e colunas que compõe as imagens z_V e z_D , determinando o maior valor presente em cada linha e coluna das imagens analisadas.

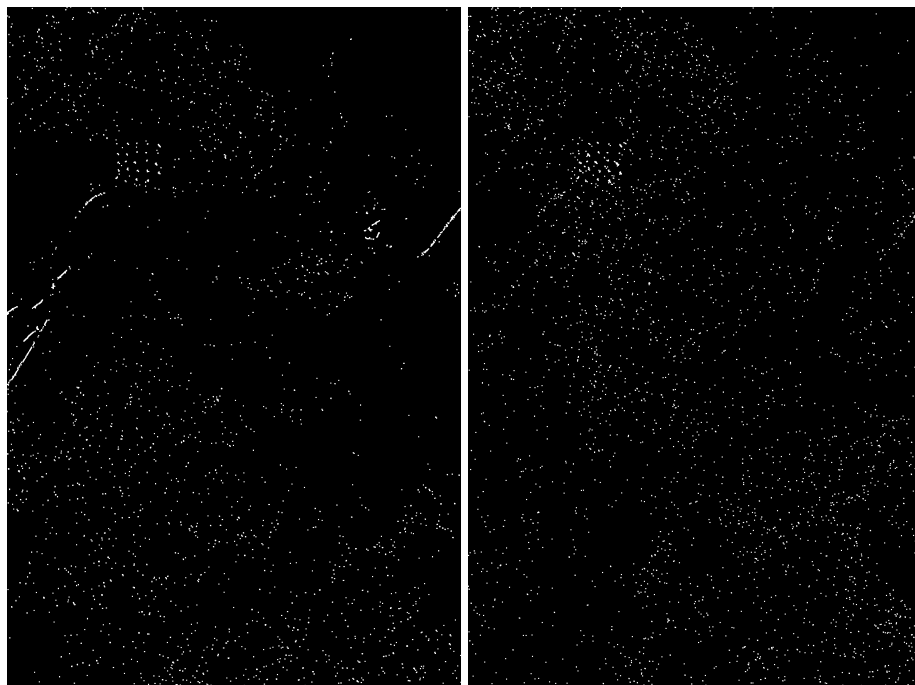
Uma matriz binária é empregada para expressar a localização destes valores máximos. A Figura 4.2 ilustra o resultado do levantamento dos máximos para o par de imagens número 1 do Quadro 2.1.

Figura 4.2 – Ilustração da localização dos máximos das imagens de vigilância z_V e diferenças z_D para um par de imagens de referência e vigilância. Os resultados foram dilatados com um elemento estruturante 5x5 (seção 5.1.1) para melhor visualização.



(a) Imagem de referência.

(b) Imagem de vigilância.



(c) Localização dos máximos da imagem de vigilância.

(d) Localização dos máximos da imagem de diferenças.

Fonte: Próprio autor.

Cruza-se então a localização dos máximos das matrizes de vigilância e de diferenças,

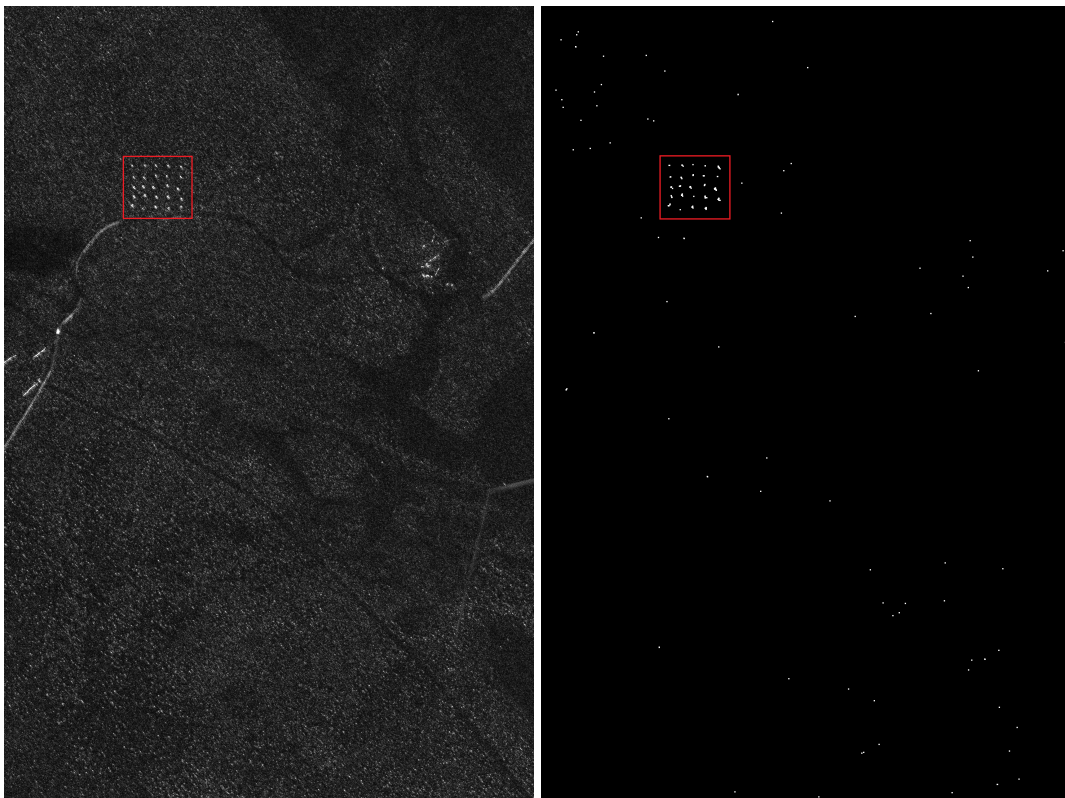
visando garantir não apenas que somente os valores mais altos de variação entre as imagens estão sendo considerados, mas também que estas variações ocorram em uma amplitude mais alta, reduzindo assim a possibilidade da consideração de um ruído.

Para a matriz de máximos da imagem de vigilância dá-se o nome de M_V e para a matriz de máximos da imagem de diferenças dá-se o nome de M_D . A matriz interpolação entre M_V e M_D , resultado do produto escalar (ponto a ponto) entre ambas, é chamada de matriz de alvos M_A (Equação 4.2).

$$M_A = M_V \bullet M_D \quad (4.2)$$

A Figura 4.3 compara os resultados da matriz de alvos M_A com a imagem de vigilância original.

Figura 4.3 – Comparação da matriz de alvos M_A com a imagem original de vigilância z_V . Os alvos verdadeiros foram destacados em vermelho e os resultados da matriz M_A foram dilatados com um elemento estruturante 5×5 (seção 5.1.1) para melhor visualização.



(a) Imagem de vigilância original.

(b) Matriz de alvos.

Fonte: Próprio autor.

Pela análise da Figura 4.3 é possível perceber que os alvos conhecidos na imagem de vigilância foram em grande parte representados na matriz de alvos.

A matriz de localização binária M_A é então multiplicada ponto a ponto com a imagem

de vigilância z_V de forma a se obter os valores reais dos *pixels* levantados pela matriz M_A . Desta matriz resultante entre a multiplicação de ambas, retira-se o valor mínimo encontrado. O valor mínimo da matriz resultante garante que todas as variações significativas validadas sejam avaliadas pela estatística de teste (Equação 3.17).

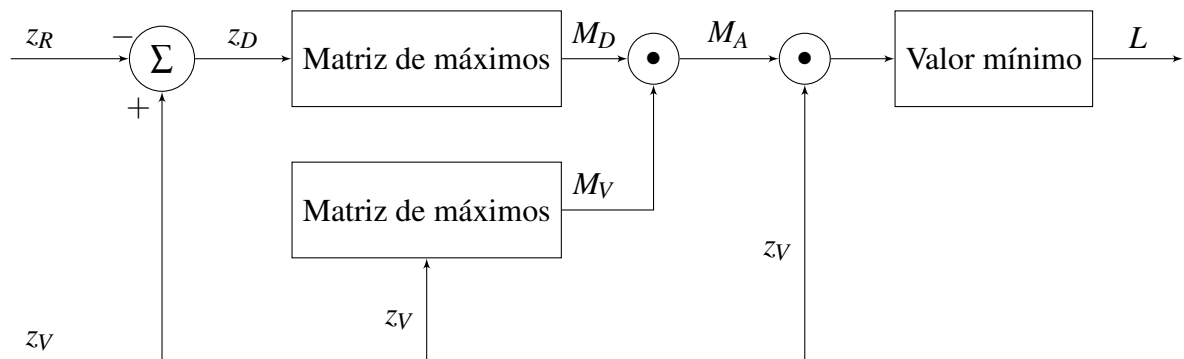
Desta forma, o valor de alvo estimado corresponde diretamente ao menor valor de *pixel* encontrado na interpolação da matriz de alvos para a imagem de vigilância. Assim,

$$z_{V(pixel)} - L = 0$$

para o primeiro *pixel* que satisfaça as condições.

A Figura 4.4 demonstra o processo proposto acima.

Figura 4.4 – Diagrama de blocos para a definição de um alvo efetivo adaptativo.



Fonte: Próprio autor.

Vu et al. (2018)

5 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Neste capítulo são apresentadas duas ferramentas para o processamento de imagens. Primeiramente é abordado o conceito de morfologia matemática e suas operações. Após, apresenta-se a técnica de normalização de índice de falso alarme constante (CFAR).

5.1 MORFOLOGIA MATEMÁTICA

Uma ferramenta interessante dentro da esfera do processamento de imagem para a utilização em radares é a morfologia matemática. No pós-processamento da imagem a utilização de elementos estruturantes aplicados em uma técnica morfológica adequada pode reduzir consideravelmente o número de falsas detecções de um radar.

Em Gonzalez, Woods e Eddins (2009), é apresentado o conceito de morfologia matemática como uma ferramenta ligada a forma e estrutura de uma região da imagem. A teoria da técnica é atrelada à teoria de conjuntos e neste capítulo é desenvolvida para imagens binárias.

Algoritmos morfológicos geralmente são baseados nas operações primitivas de dilatação e erosão e na combinação destas em operações maiores como de fechamento e abertura. Estas técnicas utilizam um elemento estruturante (conjunto, definido em forma e tamanho) que é comparado, a partir de uma transformação, aos conjuntos desconhecidos da imagem (FACON, 2011). A Figura 5.1 apresenta um elemento estruturante oito-conectado ou quadrado. Sua utilização é bastante comum por estabelecer conexões em todas as direções a partir do *pixel* central, denotado pelo círculo.

Figura 5.1 – Elemento estruturante oito-conectado.

1	1	1
1	①	1
1	1	1

Fonte: Próprio autor.

5.1.1 Dilatação

A operação primitiva de dilatação δ , segundo apresentado em Facon (2011), pode ser definida como na Equação 5.1.

$$\delta^B(z) = \{x \in z : B_x \cap z \neq \emptyset\} \quad (5.1)$$

A Equação 5.1 representa a dilatação de uma imagem z por um elemento estruturante B . B_x é o elemento estruturante B transladado na posição x .

O elemento estruturante B_x , posicionado e centrado em cada *pixel* x de z , desliza na imagem z e verifica uma possível interseção com a vizinhança de x . Caso seja verdadeiro, o ponto central na imagem resultante será considerado um *pixel* relevante e será marcado como tal. Caso contrário, ele será considerado como irrelevante e será apagado (FACON, 2011).

A aplicação mais básica para a operação de dilatação é no preenchimento de lacunas. Os *pixels* são dilatados de acordo com o elemento estruturante e , devido ao seu aumento em espaço, acabam ocupando vazios ou falhas nas redondezas anteriores ao processo.

5.1.2 Erosão

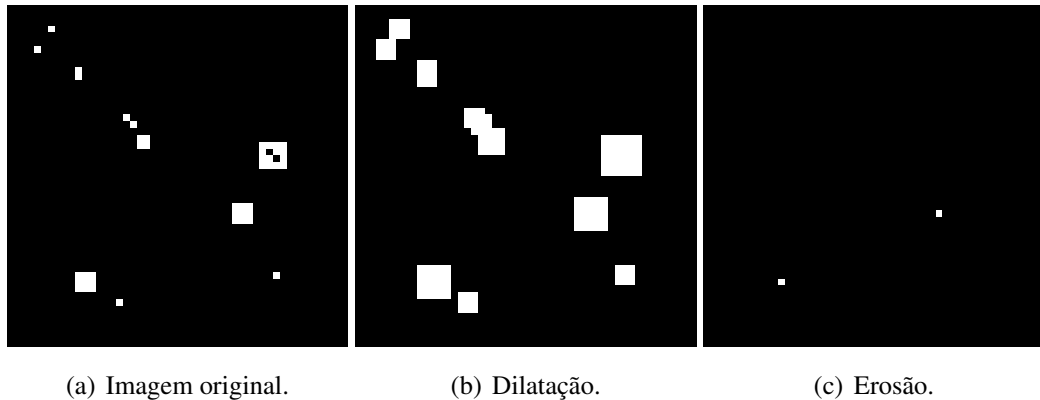
A operação binária ε é apresentada em Facon (2011) como na Equação 5.2:

$$\varepsilon^B(z) = \{x \in \mathcal{E} : B_x \subset z\} \quad (5.2)$$

Onde \mathcal{E} é um conjunto não-vazio. Deve-se deslizar o elemento estruturante B sobre a imagem z e para cada *pixel* x verificar a configuração de sua vizinhança em relação à estrutura de B . O elemento estruturante B_x , posicionado e centrado no *pixel* x de z , tenta aparelhar-se com a vizinhança de x . Cada *pixel* relevante de B_x deve se encontrar na mesma posição na vizinhança de x . Caso seja verificado, o *pixel* x na imagem erodida será considerado um *pixel* relevante e será preservado. Caso contrário, ele será considerado irrelevante e será apagado (FACON, 2011). Um uso da erosão é para eliminar detalhes irrelevantes (em termos de tamanho) em uma imagem binária (GONZALEZ; WOODS; EDDINS, 2009).

A Figura 5.2 apresenta as diferenças entre uma operação de dilatação e erosão utilizando o mesmo elemento estruturante apresentado na Figura 5.1, comparando com uma imagem que apresenta uma estrutura quadrada 2×2 e 4×4 (com falhas), uma estrutura 2×1 , duas estruturas quadradas 3×3 e seis *pixels* isolados.

Figura 5.2 – Comparação entre o processo de dilatação e erosão utilizando o elemento estruturante oito-conectado.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.2 é possível notar que na operação de erosão apenas os quadrados 3×3 são mantidos, e apenas pelo *pixel* central. Na operação de dilatação houve uma expansão dos *pixels*, inclusive englobando as falhas no quadrado 4×4 .

5.1.3 Abertura e fechamento

As operações morfológicas de abertura e fechamento são uma combinação das operações primitivas de dilatação e erosão.

A operação de abertura geralmente suaviza o contorno de um objeto e elimina protruções. Em Facon (2011) a abertura γ de uma imagem z pelo elemento estruturante B é apresentada como na Equação 5.3.

$$\gamma^B(z) = \delta^B(\varepsilon^{\tilde{B}}(z)) \quad (5.3)$$

Onde \tilde{B} representa o transposto de B obtido por simetria central pela origem do sistema de referência. Assim, a operação de abertura de uma imagem z por B é a erosão de z por B , seguido pela dilatação do resultado por B (GONZALEZ; WOODS; EDDINS, 2009).

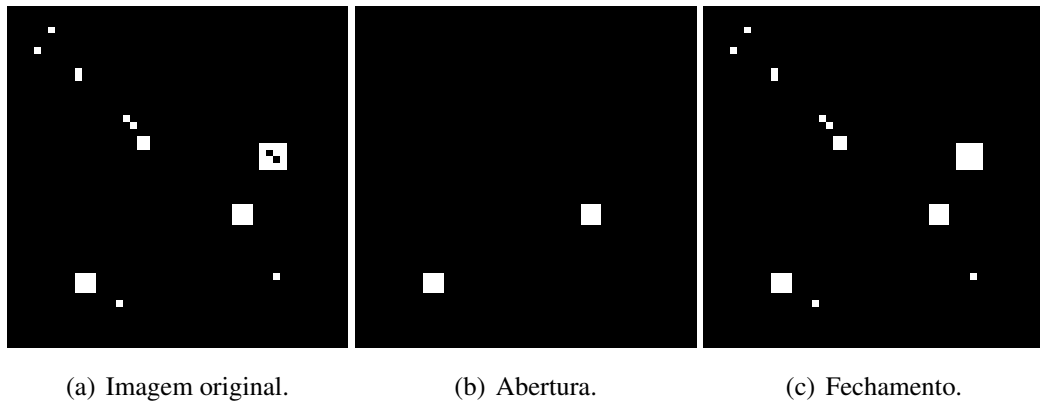
Na operação de fechamento visa-se a eliminação de pequenos buracos, preencher falhas no contorno e conectar *pixels* não muito distantes. Em Facon (2011) é apresentada a operação de fechamento ϕ de uma imagem z por B da Equação 5.4.

$$\phi^B(z) = \varepsilon^B(\delta^{\tilde{B}}(z)) \quad (5.4)$$

Onde \tilde{B} é novamente o transposto de B obtido por simetria central pela origem do sistema de referência. Assim, o fechamento de uma imagem z por B é a dilatação de z por B , seguido pela erosão do resultado por B (GONZALEZ; WOODS; EDDINS, 2009).

A Figura 5.3 apresenta uma comparação entre as operações de abertura e fechamento com um elemento estruturante oito-conectado.

Figura 5.3 – Comparação entre o processo de abertura e fechamento utilizando o elemento estruturante oito-conectado.



Fonte: Próprio autor.

Pela análise das Figuras 5.2 e 5.3 é possível notar que as operações combinatórias (fechamento e abertura) tendem a apresentar um resultado mais suave em comparação às operações primitivas de dilatação e erosão. No caso da abertura são mantidos os quadrados 3×3 , únicos com estrutura igual ou maior que o elemento estruturante, e no fechamento há o preenchimento das lacunas sem uma deformação maior na estrutura da imagem.

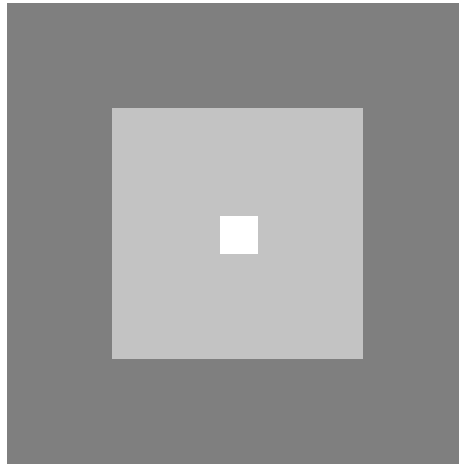
5.2 NORMALIZAÇÃO CFAR

Uma alternativa para evidenciar alvos e suprimir parte do fundo da imagem em aplicações de radares é a utilização da normalização CFAR após a aplicação do teste estatístico.

A normalização é aplicada para encontrar um valor de limiar adequado que pode ser aplicado globalmente visando uma probabilidade de falsos alarmes constante. Um filtro CFAR é utilizado para estimar a estatística local do fundo da imagem resultante de teste (LUNDBERG et al., 2006).

A imagem normalizada é produzida centralizando o filtro em cada *pixel* da imagem resultante de teste e estimando a média e desvio padrão dos *pixels* dentro do quadro estabelecido no filtro (LUNDBERG et al., 2006). A Figura 5.4 apresenta a configuração de um filtro CFAR.

Figura 5.4 – Filtro CFAR.



Fonte: Próprio autor.

A região em cinza escuro representa o quadro de fundo da imagem considerado, o cinza claro um quadro de guarda e o branco o *pixel* de teste. A utilização de um quadro de guarda no entorno de um *pixel* de teste é para a garantia de consideração apenas de valores do fundo da imagem.

O processo de normalização CFAR produz uma imagem resultante que atribui um novo valor de *pixel* da imagem de teste de acordo com a Equação 5.5.

$$h = \frac{h_t - \mu_b}{\sqrt{V_b}} \quad (5.5)$$

Onde h_t é o valor de amplitude do *pixel* resultante do teste da Equação 3.17. μ_b e V_b dizem respeito à média e variância do fundo da imagem (quadro cinza escuro), respectivamente. A imagem resultante do filtro pode ser então binarizada a partir de um valor de gatilho.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são dispostos os resultados obtidos da aplicação do método de detecção de mudanças do Capítulo 3 utilizando a base de dados apresentada na Seção 2.2. É utilizado do Capítulo 4 para a estimação de L e é apresentado o desempenho do algoritmo para o alvo efetivo fixo e adaptativo. Após, são aplicadas mudanças no valor de limiar λ_{NP} e técnicas de processamento de imagem do Capítulo 5 visando reduzir falsos alarmes. A comparação e discussão dos resultados são dispostos no fim do capítulo.

6.1 METODOLOGIA DE TESTES

As imagens de referência e vigilância são inseridas no ambiente de programação segundo a ordem do Quadro 2.1. Após, segundo os métodos para a definição de um valor de L abordados no Capítulo 4, é selecionado um valor de alvo efetivo.

O valor de L selecionado é pertinente para o critério de decisão para o processamento ou não dos *pixels* (aplicação da Equação 3.17). O sistema abaixo expõe as condições utilizadas.

$$|v_1| - L = \begin{cases} |v_1| - L, & \text{se } v_1 \geq L \\ |v_1|, & \text{se } v_1 < L \end{cases}$$

O sistema acima possibilita então duas possíveis conclusões:

- 1) Caso o valor de alvo efetivo L seja inferior ou igual ao valor do *pixel* testado, o *pixel* v_1 da imagem de vigilância é subtraído do valor de alvo efetivo para se adequar à distribuição Rayleigh (Seção 3.2). O teste estatístico da Equação 3.17 então é aplicado, tendendo a gerar valores elevados para uma mudança real entre as imagens e um valor baixo e até mesmo inferior a um para elementos presentes em ambas as imagens.
- 2) Caso o valor de alvo efetivo L seja superior ao valor do *pixel* testado, o *pixel* v_1 da imagem de vigilância é considerado um ponto pertencente ao fundo da imagem, mantendo o seu valor original e tendo como resultado da Equação 3.17 o valor um, que o classifica como se não houvesse mudança.

O valor de limiar λ_{NP} da Equação 3.17 é então, neste trabalho, estimado empiricamente de forma a se obter uma melhor definição de alvos segundo o item 1) acima. O resultado do teste é então uma imagem binária distinguindo possíveis alvos do fundo da imagem.

O objetivo do teste é de se obter o maior número de detecções possível dentre os 25 alvos que mudam de posição entre as duas imagens testadas. Além disso, visa-se o menor número de falsos alarmes possível, que são as falsas detecções de alvos (mudanças) entre os pares.

6.1.1 Detecções para um alvo efetivo fixo

Para a definição de valores plausíveis de alvo efetivo foi adotada a metodologia exibida na Seção 4.1, sendo estimados quatro valores de L com passo de 0,125 entre eles. A análise de performance levou em conta o número de falsos alarmes e detecções, de forma semelhante a Ulander et al. (2005).

O cálculo da probabilidade de detecção P_D , dado que são conhecidos 25 alvos para cada par de imagens, pode ser visto na Equação 6.1.

$$P_D = \frac{N_D}{25}, \quad (6.1)$$

Em que N_D é o número de detecções dado o par de imagens testado e o alvo efetivo utilizado.

Para a performance de falsos alarmes foi considerada a Equação 6.2. O número de falsos alarmes detectado é somado à unidade pela condição onde o número de falsos alarmes é nulo. A soma é dividida pela área das imagens, de 6 km^2 . O resultado foi apresentado de forma logarítmica para melhor visualização dos dados.

$$M_{FA} = \log_{10} \left(\frac{N_{FA} + 1}{6} \right), \quad (6.2)$$

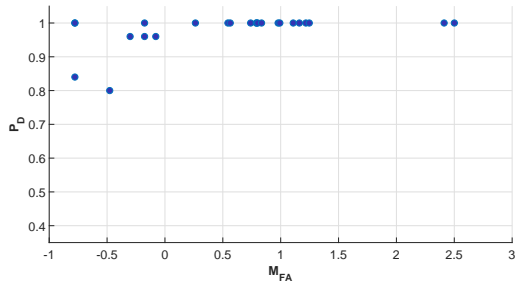
Em que M_{FA} é a medida logarítmica do número de falsos alarmes usada para comparação, sendo N_{FA} o número real de falsos alarmes obtidos pelo teste.

Os valores de alvos efetivos testados variaram de $L = 0,5$ até $L = 0,875$, com passos de 0,125. O valor de limiar para a Equação 3.17 foi mantido como 1,0 para todos os testes realizados nesta subseção.

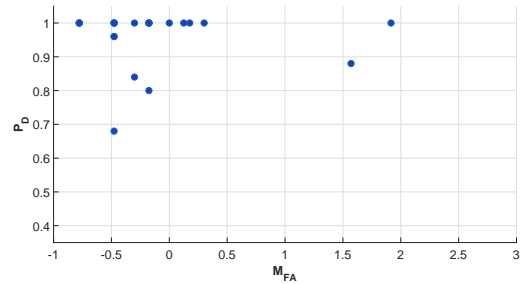
Após a binarização da imagem resultante do teste estatístico, foi utilizada a operação de dilatação (Seção 5.1.1) com um elemento estruturante 5×5 . A utilização da operação se justifica pelo comportamento dos *pixels* dos alvos, que devido ao teste acabam de forma dispersa. O elemento estruturante escolhido representa uma área maior que o maior veículo a ser detectado, normalizando então o tamanho do alvo e obtendo os melhores resultados.

Assim, para fins de comparação visual, foram produzidos os gráficos da Figura 6.1 utilizando das Equações 6.1 e 6.2 para cada par de imagem testado sob o alvo efetivo utilizado.

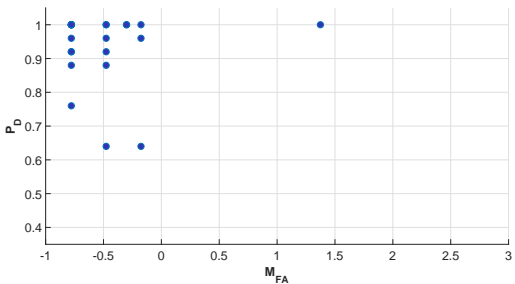
Figura 6.1 – Comparação da performance de detecção e falsos alarmes para os diferentes valores de alvo efetivo. Cada ponto representa um par de imagens.



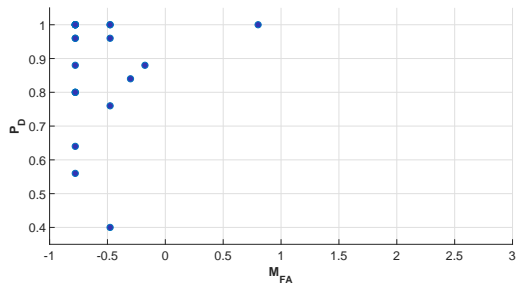
(a) $L = 0,5$.



(b) $L = 0,625$.



(c) $L = 0,75$.



(d) $L = 0,875$.

Fonte: Próprio autor.

Pela análise da Figura 6.1 foi selecionado o valor de alvo efetivo $L = 0,625$. Isso se deve ao fato do alvo efetivo demonstrar um alto índice de detecção para grande parte dos pares de imagens selecionados e apresentar comparativamente aos demais valores de L um índice de falsos alarmes aceitável. A Tabela 6.1 apresenta os resultados para o alvo efetivo 0,625 de forma detalhada. A ordem de teste e apresentação dos resultados para os pares de imagens segue o Quadro 2.1.

Tabela 6.1 – Resultados para o alvo efetivo $L = 0,625$, $\lambda_{NP} = 1$.

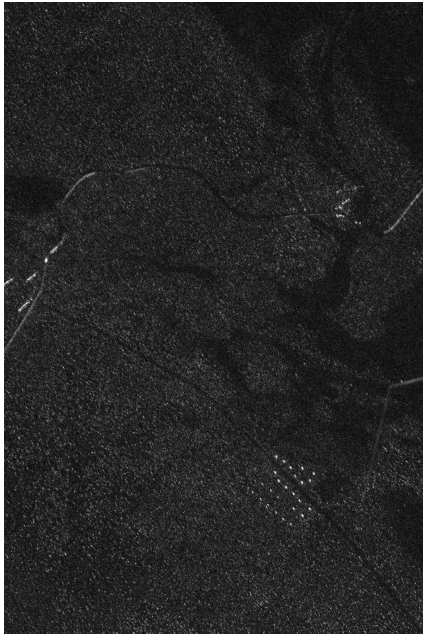
Par de imagens	Nº de detecções	Nº de falsos alarmes
1	25	1
2	25	7
3	25	1
4	25	11
5	24	1
6	25	0
7	24	1
8	20	3
9	25	8
10	25	2
11	25	3
12	25	3
13	25	0
14	25	0
15	21	2
16	17	1
17	25	1
18	22	222
19	25	5
20	25	493
21	25	1
22	25	3
23	25	0
24	25	1
Total	578	770

Fonte: Próprio autor.

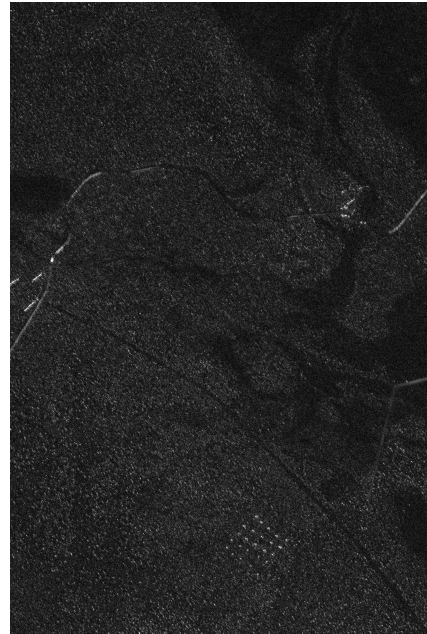
O somatório total de alvos presentes nas 25 imagens é de 600 veículos (Quadro 2.1). Desta forma, a Tabela 6.1 indica que o índice de detecção do algoritmo para o alvo efetivo fixo de 0,625 é de 96,33%.

A Figura 6.2 apresenta uma comparação entre a imagem de referência, vigilância e resultante do método de detecção de mudanças. O par de imagens selecionado para a demonstração é o de número 24.

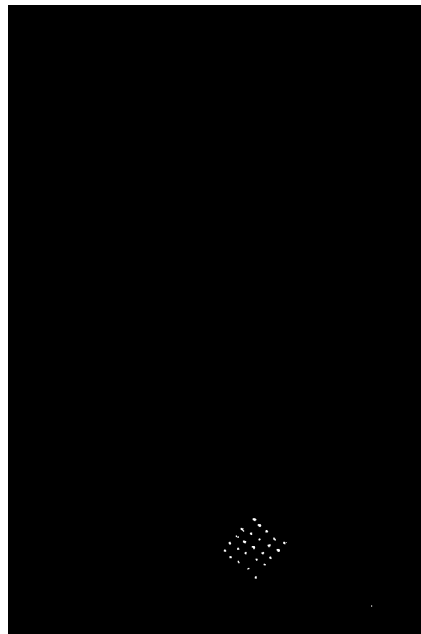
Figura 6.2 – Comparação entre as imagens de referência, vigilância e resultante para o alvo efetivo fixo.



(a) Imagem de referência.



(b) Imagem de vigilância.



(c) Imagem resultante.

Fonte: Próprio autor.

É possível identificar na Figura 6.2 a presença de 25 alvos em formação idêntica a apre-

sentada na imagem de vigilância. Desta forma, o índice de detecção para este par de imagens é de 100%. Ainda, há a presença de uma falsa detecção logo à direita da formação.

6.1.2 Detecções para um alvo efetivo adaptativo

Utilizando agora da Seção 4.2, foi implementado o algoritmo proposto capaz de estimar um valor de L para cada par de imagem testado. Da mesma forma que na seção anterior, o valor de limiar λ_{NP} foi mantido como unitário e uma operação de dilatação com elemento estruturante 5×5 foi utilizada. A Tabela 6.2 apresenta os resultados para o alvo efetivo adaptativo.

Embora o índice de detecção seja de 97,5%, há uma grande presença de falsos alarmes se comparado com a Tabela 6.1. Nota-se também que o valor de alvo efetivo apresenta grande variação entre os pares de imagens testados, indicando que uma análise de alvo efetivo a partir da natureza de cada par de imagem tende a representar melhor o comportamento dos alvos a serem detectados.

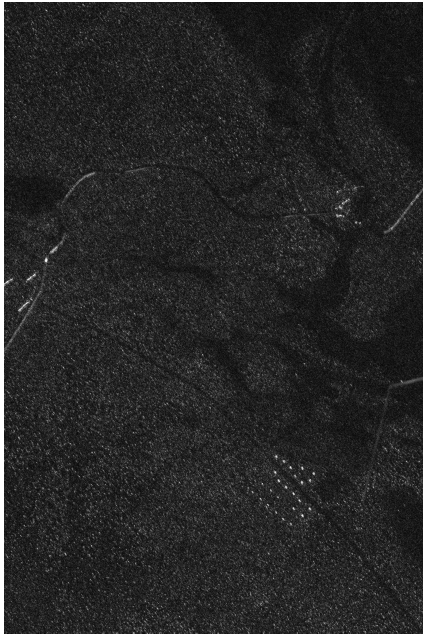
Tabela 6.2 – Resultados para o alvo efetivo adaptativo e $\lambda_{NP} = 1$. O valor de L encontrado para cada par de imagens também é disposto na tabela.

Par de imagens	L	Nº de detecções	Nº de falsos alarmes
1	0,411418	25	489
2	0,486197	25	88
3	0,450299	25	81
4	0,430664	25	269
5	0,439213	24	4
6	0,5151	25	0
7	0,513906	24	2
8	0,50846	21	0
9	0,446254	25	347
10	0,393749	25	671
11	0,440062	25	200
12	0,443871	25	379
13	0,625322	25	0
14	0,513229	25	0
15	0,54803	23	0
16	0,524338	18	0
17	0,437681	25	437
18	0,398599	25	6458
19	0,408034	25	851
20	0,357018	25	8595
21	0,396464	25	163
22	0,452652	25	104
23	0,413596	25	404
24	0,439862	25	96
Total		585	19638

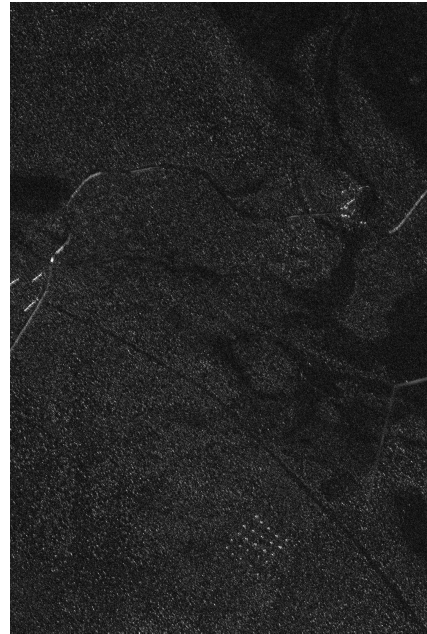
Fonte: Próprio autor.

A Figura 6.3 mostra a comparação entre as imagens de referência, vigilância e resultante, novamente utilizando o par de número 24.

Figura 6.3 – Comparação entre as imagens de referência, vigilância e resultante para alvo efetivo adaptativo ($\lambda_{NP} = 1$).



(a) Imagem de referência.



(b) Imagem de vigilância.



(c) Imagem resultante.

Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 6.3, embora o índice de detecções para este par ainda seja de 100%,

é possível perceber uma alta taxa de falsas detecções. Devido à alta taxa de falsos alarmes encontradas no método, as seções a seguir visam diminuir este número empregando uma variação do valor de limiar λ_{NP} e técnicas de pós-processamento de imagem.

6.1.2.1 Alvo efetivo adaptativo com uma variação do limiar λ_{NP}

Visando reduzir o número elevado de falsos alarmes da Subseção 6.1.2, é variado o valor de limiar λ_{NP} . A variação deste valor introduz um critério adicional de seleção a partir do teste estatístico da Equação 3.17. Para este teste, o valor de limiar foi aumentado para $\lambda_{NP}^a = 2 \times 10^3$ e $\lambda_{NP}^b = 8 \times 10^3$ de forma empírica. Os resultados estão dispostos na Tabela 6.3.

A Tabela 6.3 indica o comportamento esperado com um aumento do limiar. Embora reduza drasticamente o número de falsos alarmes, é difícil determinar um valor de λ_{NP} que preserve um número de detecções alto. Comparando com o índice de detecção de 97,5% com o limiar unitário, há uma queda para 97% e 96,16% para os limiares λ_{NP}^a e λ_{NP}^b , respectivamente.

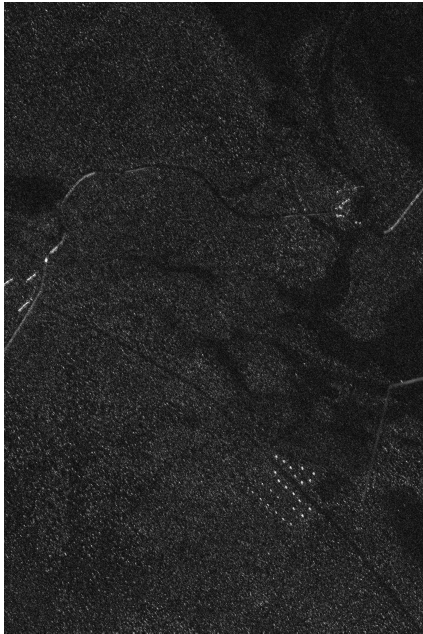
Tabela 6.3 – Comparação entre os resultados com o alvo efetivo considerando uma mudança de limiar λ_{NP} .

Par de imagens	L	$N_D (\lambda_{NP}^a)$	$N_{FA} (\lambda_{NP}^a)$	$N_D (\lambda_{NP}^b)$	$N_{FA} (\lambda_{NP}^b)$
1	0,411418	25	11	25	3
2	0,486197	25	13	25	5
3	0,450299	25	9	25	4
4	0,430664	25	24	25	16
5	0,439213	24	2	24	1
6	0,5151	25	0	25	0
7	0,513906	25	1	24	2
8	0,50846	21	0	21	0
9	0,446254	25	17	25	10
10	0,393749	25	10	25	3
11	0,440062	25	14	25	11
12	0,443871	25	19	25	6
13	0,625322	25	0	23	0
14	0,513229	25	0	25	0
15	0,54803	22	1	22	1
16	0,524338	18	0	18	0
17	0,437681	25	13	25	4
18	0,398599	22	296	20	136
19	0,408034	25	24	25	8
20	0,357018	25	521	25	232
21	0,396464	25	13	25	7
22	0,452652	25	17	25	8
23	0,413596	25	15	25	4
24	0,439862	25	9	25	4
Total		582	1029	577	465

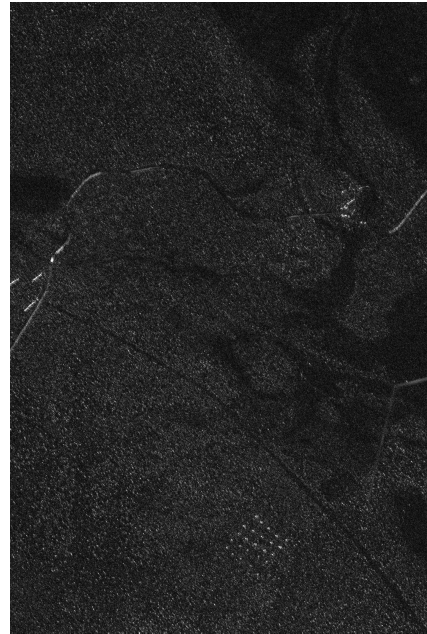
Fonte: Próprio autor.

A Figura 6.4 demonstra a comparação entre as imagens de referência, vigilância e resultante para o limiar λ_{NP}^b , utilizando o par de imagens número 24. Nela, é possível perceber a presença dos 25 alvos e agora apenas quatro falsos alarmes em comparação com os 96 anteriores.

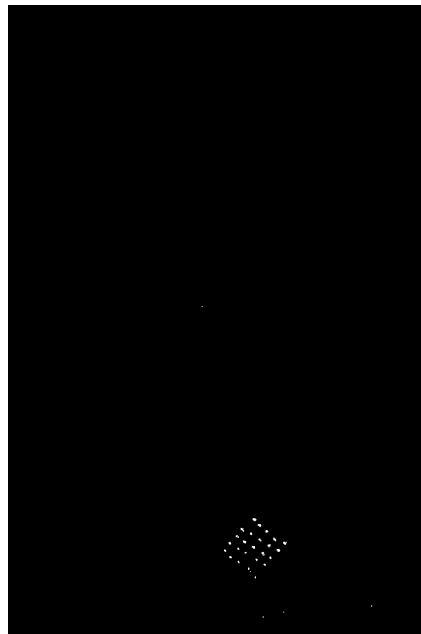
Figura 6.4 – Comparação entre as imagens de referência, vigilância e resultante para alvo efetivo adaptativo ($\lambda_{NP}^b = 8 \times 10^3$).



(a) Imagem de referência.



(b) Imagem de vigilância.



(c) Imagem resultante.

Fonte: Próprio autor.

6.1.2.2 Alvo efetivo adaptativo com a aplicação de uma normalização CFAR

Visando um melhor desempenho no pós-processamento da imagem, a utilização de um filtro CFAR é considerada. Seguindo os trabalhos apresentados em Lundberg et al. (2006) e Ulander et al. (2005), foi optado por uma banda de guarda de 19×19 e uma banda de teste de 31×31 *pixels*, devido ao tamanho dos veículos (alvos) presentes no banco de dados utilizado.

Foi utilizado da matriz resultante para o limiar λ_{NP}^a e aplicado uma normalização CFAR com valor de gatilho de 3×10^4 . A Tabela 6.4 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 6.4 – Resultados obtidos para o alvo efetivo adaptativo com a aplicação de um filtro CFAR.

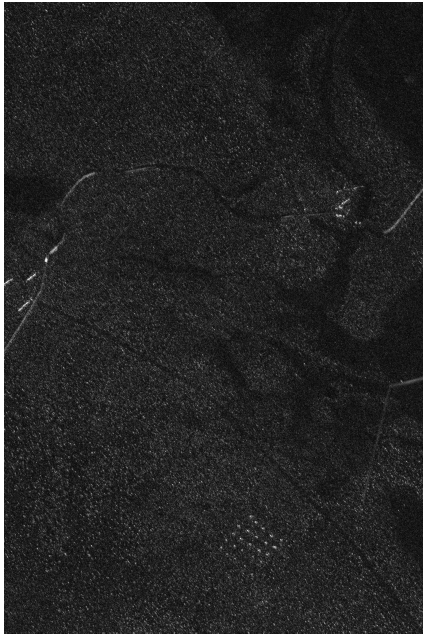
Par de imagens	L	Nº de detecções	Nº de falsos alarmes
1	0,411418	25	3
2	0,486197	25	3
3	0,450299	25	3
4	0,430664	25	8
5	0,439213	24	1
6	0,515100	25	0
7	0,513906	24	2
8	0,508460	21	0
9	0,446254	25	6
10	0,393749	25	2
11	0,440062	25	6
12	0,443871	25	6
13	0,625322	23	0
14	0,513229	25	0
15	0,548030	22	1
16	0,524338	18	0
17	0,437681	25	2
18	0,398599	20	63
19	0,408034	25	7
20	0,357018	25	111
21	0,396464	25	7
22	0,452652	25	7
23	0,413596	25	4
24	0,439862	25	4
Total		577	246

Nota-se uma visível redução de falsos alarmes em comparação com os resultados anteriores. Em fato, o número de falsos alarmes caiu em 47,1% em comparação com o mesmo limiar sem a aplicação do CFAR. Ainda, esta redução não afeta o número de detecções, que da mesma forma apresenta um índice de 96,17%.

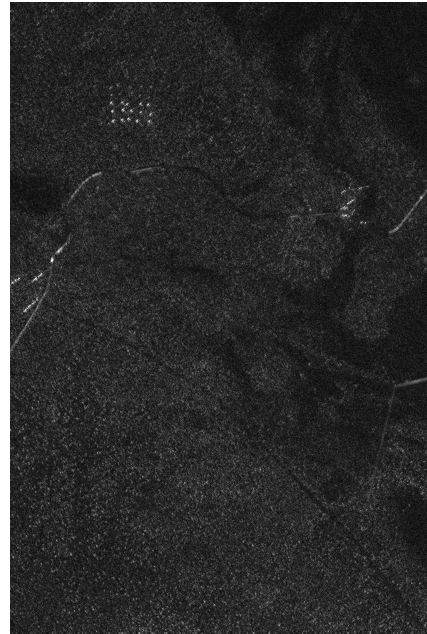
É interessante perceber que o filtro CFAR tem maior impacto nos pares que apresentam uma taxa elevada de falsos alarmes, notoriamente o par 18 e 20. A Figura 6.5 apresenta uma comparação para o par 18, com a imagem de referência e vigilância do par e os resultados sem e com a utilização da normalização CFAR.

Embora o índice de detecção para este par seja de apenas 80%, o índice de detecção é o mesmo para os dois resultados (com e sem a normalização). Ainda assim, os falsos alarmes caem de 136 para 63, uma redução de 53,7%.

Figura 6.5 – Comparação entre as imagens de referência, vigilância e resultante para alvo efetivo adaptativo utilizando CFAR.



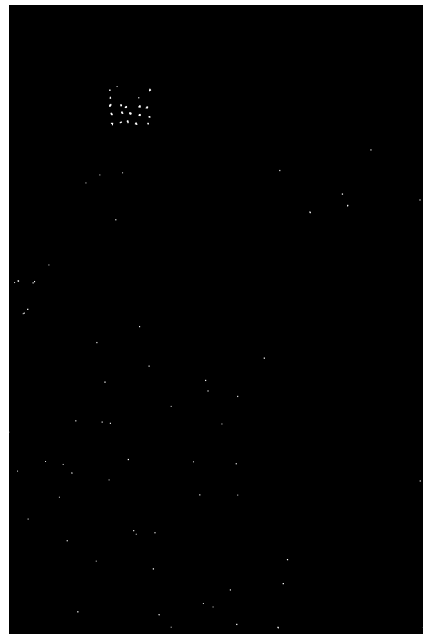
(a) Imagem de referência.



(b) Imagem de vigilância.



(c) Imagem resultante sem CFAR.



(d) Imagem resultante com CFAR.

Fonte: Próprio autor.

6.1.3 Comparação de métodos para redução de falsos alarmes empregando um alvo efetivo adaptativo

A Tabela 6.5 apresenta uma comparação dos métodos empregados neste trabalho para a diminuição de falsos alarmes. Os métodos são comparados em função da sua probabilidade de detecção P_D e número de falsos alarmes por quilômetro quadrado $FAR = N_{FA}/6$.

Tabela 6.5 – Comparação da probabilidade de detecção e falsos alarmes por quilômetro quadrado para cada método.

Método empregado	P_D	FAR
Alvo efetivo fixo $L = 0,625$, $\lambda_{NP} = 1$	96,33%	5,35
Alvo efetivo adaptativo, $\lambda_{NP} = 1$	97,50%	136,37
Alvo efetivo adaptativo com variação do limiar λ_{NP} (λ_{NP}^b)	96,16%	3,23
Alvo efetivo adaptativo com normalização CFAR	96,16%	1,70

Fonte: Próprio autor.

É possível observar a melhora em nível de falsos alarmes com a utilização de um filtro CFAR, sendo um método comumente utilizado pela literatura como visto em Lundberg et al. (2006), Ulander et al. (2005) e Gomes et al. (2016). Em comparação com o padrão, que utilizava um limiar λ_{NP} unitário, os falsos alarmes reduziram em 98,75%.

6.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ambas as técnicas de estimação de alvo efetivo apresentaram um bom nível de detecção para o problema considerado. Visualizando diretamente as Tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, nota-se que uma grande fonte de falsos alarmes são os pares de imagens 18 e 20. O segundo par citado representa 64,02% dos falsos alarmes encontrados para o alvo efetivo fixo, enquanto representa 45,12% da quantidade de falsos alarmes encontrados para o alvo efetivo adaptativo com filtro CFAR.

Uma possível explicação para o alto número de falsos alarmes no par de imagens número 20 é que, de acordo com as especificações apresentadas em Lundberg et al. (2006), as imagens foram tiradas com um ângulo de 230°. Tal ângulo posicionou a antena em direção a uma estação de TV localizada perto da região, podendo ter afetado a qualidade da aquisição das imagens devido à interferências em alta frequência.

Ainda sim, a Tabela 6.2 apresenta bons resultados com um índice de detecção de 96,16% e um número total de falsos alarmes de 246, mesmo com uma aplicação simples da normalização. Um refinamento no filtro e valores de limiar, além de técnicas de pré-processamento da imagem podem ser empregadas para atingir resultados ainda melhores.

É importante ressaltar, também, que não foi aplicado um filtro CFAR para a análise com alvo efetivo fixo. A utilização de um alvo fixo com ferramentas de pré e pós-processamento de imagem já está presente na literatura em trabalhos como Ulander et al. (2005), para uma distribuição Gaussiana bivariada, e em Gomes et al. (2016) para uma distribuição Rayleigh bivariada. O levantamento do alvo adaptativo fixo no contexto deste trabalho é para a demonstração de uma possível metodologia de teste e servir como um parâmetro de desempenho do algoritmo empregado.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudada a tecnologia SAR, mais especificamente o problema da detecção de alvos em folhagem com uma técnica de detecção de mudanças utilizando um teste de verossimilhança. De acordo com a base de dados disponível, foi selecionado a distribuição Rayleigh bivariada, equacionada em função do alvo efetivo L .

Além da introdução do conceito de alvo efetivo, este trabalho visou estudar as variáveis envolvidas para a realização do teste estatístico. Foi estudado a estimação do valor de L , com uma contribuição deste trabalho sendo um método para a estimação deste valor a partir de cada par de imagens em teste. O método apresentado tem potencial para ser melhor explorado e pesquisas futuras podem e devem ser desenvolvidos de forma a se extrair o maior desempenho a partir dos dados levantados pela matriz de alvos M_A .

Um alvo efetivo para todo o banco de dados foi também estimado, de forma a apresentar um método comum na literatura e servir de parâmetro para o algoritmo empregado. Comparando o alvo fixo com o adaptativo percebe-se que, apesar do primeiro apresentar uma boa eficácia, uma verdadeira contribuição ao problema de detecção de alvos (utilizando de uma distribuição que represente apenas a hipótese nula) passa pela estimação de um valor de L que acompanhe as variações apresentadas em cada par de imagem. Este resultado é visível pelo comportamento dos pares testados e que seu resultado ótimo (alta probabilidade de detecção e baixo número de falsos alarmes) é obtido para diferentes valores de alvo efetivo.

Ainda, foram levantados métodos de processamento de imagem para um melhor refinamento dos resultados. Estes métodos foram comparados em termos de detecções e número de falsos alarmes, com a utilização de uma normalização CFAR sendo uma excelente alternativa para a redução do segundo mantendo uma taxa de acertos constante.

Para o seguimento e melhora deste trabalho deve-se buscar, também, novas distribuições que representem melhor o comportamento dos *pixels* das imagens em termos da sua amplitude. Pela Figura 3.3, que apresenta a comparação entre uma imagem do banco de dados e a função densidade de probabilidade de Rayleigh, é possível perceber que há espaço para melhorias para a total adequação do método estatístico às imagens. As distribuições K e Gamma apresentam um grau maior de liberdade em comparação à Rayleigh, que apresenta apenas um (parâmetro σ da Equação 3.11). Com um maior número de parâmetros é possível adaptar a curva para melhor representar os dados disponíveis.

A distribuição Gaussiana também não deve ser descartada, como apresentada em Ulander et al. (2005). Porém, sua aplicação tende a ter melhores resultados com uma base de dados complexa. Neste sentido, a validação do método apresentado neste trabalho para a estimação de um alvo efetivo adaptativo em imagens que apresentem valores complexos também é desejada e encorajada.

A busca por uma distribuição que seja capaz de representar não apenas a hipótese nula,

mas o verdadeiro comportamento de uma imagem que contenha alvos, também é um ponto chave de pesquisa. Estudos nesse sentido podem ter origem a partir da análise da matriz de alvos M_A , introduzida neste trabalho, com um devido refinamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CCRS. **Fundamentals of Remote Sensing**. Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, 2016. Acessado em 09 jun 2018. Disponível em: <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf>.

CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. **Synthetic aperture radar**. [S.l.]: John Wiley & Sons New York, NY, USA, 1991. v. 396.

FACON, J. A morfologia matemática e suas aplicações em processamento de imagens. In: WVC - WORKSHOP DE VISÃO COMPUTACIONAL, VII., 2011, Curitiba. **Morfologia Matemática**. Paraná, 2011. Acesso em: 17/6/2018. Disponível em: <<https://www.ppgia.pucpr.br/~facon/Books/2011WVCMinicurso2Morfo.pdf>>.

GOMES, N. R. et al. Likelihood ratio test for incoherent wavelength-resolution sar change detection. In: IEEE. **Radar (RADAR), 2016 CIE International Conference on**. [S.l.], 2016. p. 1–4.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; EDDINS, S. L. **Digital Image Processing Using MATLAB**. [S.l.]: Gatesmark Publishing, 2009.

HELLSTEN, H. et al. Development of vhf carabas ii sar. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Radar Sensor Technology**. [S.l.], 1996. v. 2747, p. 48–61.

HUANG, Y.; FERRO-FAMIL, L.; REIGBER, A. Under-foliage object imaging using sar tomography and polarimetric spectral estimators. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, IEEE, v. 50, n. 6, p. 2213–2225, 2012.

KAY, S. M. Fundamentals of statistical signal processing, vol. ii: Detection theory. **Signal Processing**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.

LUNDBERG, M. et al. A challenge problem for detection of targets in foliage. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIII**. [S.l.], 2006. v. 6237, p. 62370K.

MARINO, A. New target detector based on geometrical perturbation filters for polarimetric synthetic aperture radar (pol-sar). The University of Edinburgh, 2010.

MCCANDLESS, S.; JACKSON, C. R. Principles of synthetic aperture radar. **SAR Marine User's Manual**, National Oceanic and Atmospheric Administration: Washington, District of Columbia, USA, p. 1–23, 2004.

MKOLESIA, A.; KIKAWA, C.; SHATALOV, M. Estimation of the rayleigh distribution parameter. **Transylvanian Review Journal**, v. 24, n. 8, p. 1158–1163, 2016.

MOREIRA, A. et al. A tutorial on synthetic aperture radar. **IEEE Geoscience and remote sensing magazine**, IEEE, v. 1, n. 1, p. 6–43, 2013.

MOYA, A. et al. Frequency ratio method for seismic modeling of γ doradus stars. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 432, n. 1, p. 189–198, 2005.

OLIVER, C.; QUEGAN, S. **Understanding synthetic aperture radar images**. [S.l.]: SciTech Publishing, 2004.

PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. **Probability, random variables, and stochastic processes.** [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2002.

RADKE, R. J. et al. Image change detection algorithms: a systematic survey. **IEEE transactions on image processing**, IEEE, v. 14, n. 3, p. 294–307, 2005.

SIMON, M. K.; ALOUINI, M.-S. **Digital communication over fading channels.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005. v. 95.

STEWART, J. **Essential calculus: Early transcendentals.** [S.l.]: Cengage Learning, 2012.

ULANDER, L. M. et al. Change detection for low-frequency sar ground surveillance. **IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation**, IET, v. 152, n. 6, p. 413–420, 2005.

VU, V. T. et al. Bivariate gamma distribution for wavelength-resolution sar change detection. **PP**, p. 1–9, 08 2018.