



Análise Operacional e Engenharia Logística: Simulação

Persistência da aplicabilidade de informações de imagens SAR orbitais em missões aéreas de vigilância e reconhecimento: uma análise por meio de simulação Monte Carlo

Persistence of the applicability of information from orbital SAR images in aerial surveillance and reconnaissance missions: an analysis through Monte Carlo simulation

Leonan Entringer Falqueto¹, André Negrão Costa², Diego Geraldo² e Rafael Lemos Paes³

¹Instituto de Aplicações Operacionais (IAOp), São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP – Brasil

³Estado Maior da Aeronáutica (EMAER), Brasília/DF – Brasil

Article Info

Article History:

Received	20 April	2022
Revised	21 July	2022
Accepted	17 August	2022
Available online	31 August	2022

Palavras Chave:

Sensoriamento Remoto Satelital
Patrulha Marítima
Simulação
Método de Monte Carlo
Imagem SAR

Keywords:

Satelital Remote Sensing
Maritime Patrol
Simulation
Monte Carlo Method
SAR Image

E-mail addresses:

falquetolef@fab.mil.br (L.E. Falqueto),
negrao@ieav.cta.br (A.N. Costa),
diegogeraldo@ieav.cta.br (D. Geraldo),
rlpaes@gmail.com (R.L. Paes).

Resumo

Satélites SAR fornecem diversos dados para apoio ao planejamento de missões de patrulha marítima, porém devido à resolução temporal de tais meios de vigilância e ao dinamismo intrínseco ao cenário marítimo, esses dados podem se tornar imprecisos em algumas horas. Este trabalho propõe uma solução computacional que atualiza probabilisticamente esse cenário projetando a posição dos alvos horas à frente, considerando diferentes tempos de reação dos meios de vigilância. Para tanto, o movimento de cada contato é modelado através de distribuições de probabilidade que representam seu comportamento provável e um cenário atualizado é projetado utilizando o método de Monte Carlo. Conclui-se que a utilização dessa metodologia permite analisar a persistência da aplicabilidade das informações coletadas e, inclusive, aponta para oportunidades operacionais do uso em situações de silêncio eletrônico.

Abstract

SAR satellites provide a lot of data to support the planning of maritime patrol missions, but due to the temporal resolution of such surveillance means and the dynamism inherent to the maritime scenario, this data can become inaccurate within a few hours. This work proposes a computational solution that probabilistically updates this scenario by projecting the position of the targets hours ahead, considering different reaction times of the surveillance means. For that, the movement of each contact is modeled through probability distributions that represent its expected behavior and an updated scenario is designed using the Monte Carlo method. It is concluded that the use of this methodology allows analyzing the persistence of the applicability of the information collected and even points to operational opportunities for use in situations of electronic silence.

I. INTRODUÇÃO

A Estratégia Nacional de Defesa (END) afirma a importância das Forças Armadas Brasileiras desenvolverem capacidades de monitoramento e controle do espaço aéreo, do território e das Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB) [1]. As dimensões do território nacional são de ordem continental, valendo a mesma percepção para as AJB. Isso afeta as atividades de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento (IVR), pois exigem o emprego de tecnologias de sensoriamento remoto provenientes de diferentes plataformas para garantir o monitoramento desejável, a saber: orbitais, aéreas e de superfície.

O emprego apenas dos meios aéreos e de superfície tornam a operação dispendiosa e ainda mais complexa [2-4].

Há a necessidade de utilizá-los de forma sinérgica com aqueles orbitais, pois diminuem custos e aumentam o nível de vigilância [4-5].

A Diretriz do Comando da Aeronáutica 11-45 (DCA 11-45) menciona a importância atingir mais elevados níveis de maturidade operacional, visando obter melhor custo-benefício em termos de emprego material e humano.

Portanto, o presente trabalho lida com o desafio de ampliar a consciência situacional por meio do uso do espaço para a ampliação do Poder Aeroespacial nos diferentes cenários de atuação da FAB [6].

A metodologia aqui proposta serve de guia sobre como explorar e usar as informações de imagens obtidas por satélites, principalmente, no que se refere à persistência da aplicabilidade de tais dados, isto é, o tempo que permanecerão válidas e úteis à missão.

A fim de exemplificar, o cenário do Teatro de Operações Marítimas (TOM) foi escolhido, sendo mais especificamente, a tarefa de controle de tráfego marítimo realizada atualmente pela Aviação de Patrulha.

Em abordagem anterior, uma missão de patrulha marítima planejada através de imagens de satélite SAR (*Synthetic Aperture Radar*), utilizando a metodologia *top-down*, tem sua eficiência (diminuição do tempo de voo) e eficácia (quantidade de contatos verificados) claramente melhoradas. Aliadas a isso, heurísticas podem ser utilizadas para identificar a melhor rota de patrulha [5][7]. Contudo, para uma análise mais realística do TOM, há de se considerar sua dinamicidade, ou seja, o fato de seus componentes se movimentarem de modo não cooperativo, alterando constantemente o cenário. Dessa forma, apesar dos satélites com tecnologia SAR fornecerem um posicionamento inicial para os alvos nesse cenário, favorecendo ao planejamento, há um período considerável entre a disponibilização dessas imagens no segmento de solo, processamento, acionamento da missão e a possível decolagem de uma aeronave de patrulha e sua chegada *on station*.

Até mesmo a vigilância conduzida por meios aéreos e de superfície não oferece uma solução de observação contínua. Devido à grande extensão das áreas de interesse, limite dos sensores, custo da atividade e outras limitações operacionais, há normalmente intervalos de tempo no acompanhamento de determinados alvos e a consequente perda da localização. Mesmo com a disseminação da informação do AIS (*Automatic Identification System*) via satélite, pequenas embarcações não são obrigadas a utilizá-lo e, principalmente, contatos ilícitos, não utilizarão um aparelho para denotar sua posição [8].

Assim, com o objetivo de auxiliar o planejamento de missões aéreas de patrulha marítima, esse trabalho apresenta uma proposta de solução computacional que, utilizando simulação Monte Carlo, atualiza probabilisticamente um cenário inicial obtido por meio de uma imagem de satélite SAR. As posições iniciais são projetadas horas à frente e, desse modo, permite-se a identificação de regiões prováveis para a detecção de tais contatos marítimos.

O presente trabalho está organizado da seguinte maneira: inicialmente, há tanto a descrição do cenário utilizado, que foi modelado estatisticamente, bem como a caracterização das variáveis do problema estudado. Em seguida, apresenta-se a metodologia proposta de atualização desse cenário por meio da simulação. Finalmente, são apresentados os resultados, análises e conclusões.

II. DESCRIÇÃO DO CENÁRIO, CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS E METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

O cenário simulado corresponde a uma área de aproximadamente 600 x 600km (300 x 300NM). Essa área representa uma possível área de vigilância para uma Unidade Aérea, considerando-se os seguintes parâmetros de planejamento: 150kt de velocidade média para o voo; cinco horas totais disponíveis, sendo no mínimo 20% desse tempo reservado para identificação dos contatos, ou seja, no máximo quatro horas utilizadas em deslocamento na cena; com pouso e decolagem na mesma base.

A Fig. 1 apresenta o planejamento de uma missão de patrulha nessa área estipulada, observando os parâmetros mencionados:

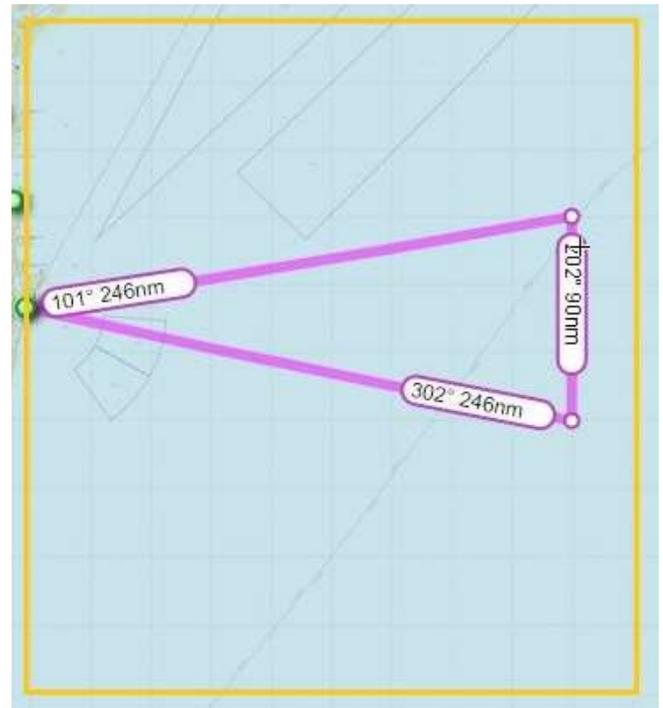


Fig. 1. Planejamento de uma patrulha marítima sem dados de uma imagem obtida por um satélite SAR para apoio.

A dinâmica do cenário marítimo é caracterizada pela Posição e Intenção de Movimento (PIM) dos alvos. Um cenário típico conta com embarcações diversas, que foram classificadas para o presente estudo em três tipos:

- Tipo 1 – embarcações com comportamento bastante aleatório de direção, porém com velocidade baixa. Ex.: barcos pesqueiros e rebocadores.
- Tipo 2 – embarcações com velocidade e direção relativamente constante. Ex.: embarcações mercantes de médio e grande porte em uma rota comercial.
- Tipo 3 – embarcações com perfil aleatório de direção, porém podendo atingir velocidades mais altas. Ex.: militares, pesquisa, piratas, etc.

Apoiando-se na experiência operacional dos autores em patrulhamento marítimo, utilizou-se uma distribuição Beta para modelar a variação da velocidade (v) e da direção (θ) após a detecção de um contato na imagem SAR. Tal distribuição se ajusta bem aos perfis estudados, pois é contínua e com intervalos definidos entre A e B , sendo a Beta padrão definida no intervalo $[0,1]$. Os parâmetros α e β definem sua forma de maneira bastante flexível [9][10].

Assim as variáveis v e θ foram modeladas tomando por base essa distribuição, com os parâmetros utilizados descritos nas tabelas I e II. As velocidades variam dentro de certo intervalo $[A,B]$ e as direções variam de 0 a 2π radianos.

TABELA I. PARÂMETROS DE MODELAGEM DA VARIÁVEL VELOCIDADE (v) PARA CADA TIPO DE EMBARCAÇÃO

Tipo	Limite inferior (A)	Limite inferior (B)	α	β
1	0 kt	8 kt	1,5	2,2
2	7 kt	25 kt	1,5	1,5
3	0 kt	25 kt	5,0	1,2

TABELA II. PARÂMETROS DE MODELAGEM DA VARIÁVEL DIREÇÃO (θ) PARA CADA TIPO DE EMBARCAÇÃO

Tipo	Limite inferior (A)	Limite inferior (B)	α	β
1	0π rad	$ \pi $ rad	1,1	1,1
2	0π rad	$ \pi $ rad	0,5	4,0
3	0π rad	$ \pi $ rad	1,1	1,1

Na Fig.2, há a demonstração das funções de distribuição de probabilidade ajustada para a Beta padrão de uma embarcação tipo 2 para a variação da velocidade e direção.

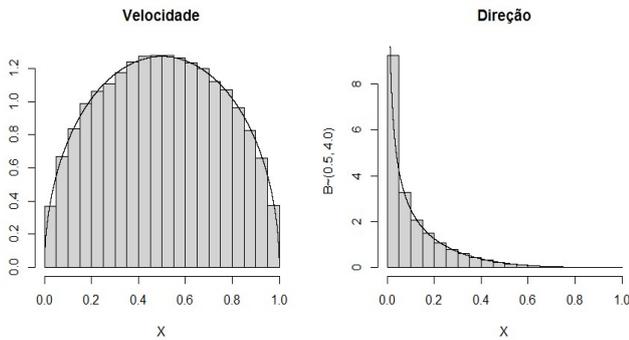


Fig. 2. Distribuições Beta usadas na modelagem dos perfis de velocidade e direção das embarcações do Tipo 2.

Alvos estáticos, como plataformas marítimas, seriam considerados descartados pelo pré-processamento da imagem utilizada.

Para construção do cenário de teste do algoritmo, a posição (x,y), a velocidade inicial (v_0) e a direção inicial (θ_0) foram simuladas utilizando probabilidades uniformes, obedecendo os limites dos parâmetros das Tabela I e II.

A quantidade k de navios, correspondente a 43 para esse trabalho, foi distribuída em 50% do tipo 1, 40% do tipo 2 e 10% do tipo 3.

Observa-se na Fig.3 a disposição do cenário inicial utilizado como entrada para o algoritmo. Ela representa a informação sintetizada a partir de uma imagem SAR adquirida através de um meio orbital.

Em seguida, apresenta-se a metodologia proposta de atualização desse cenário. Considerando as respectivas distribuições de probabilidade Beta que modelam comportamento de cada contato, o método de Monte Carlo é utilizado para estimar um mapa com o posicionamento provável da embarcação após determinado período t de registro do dado na imagem SAR.

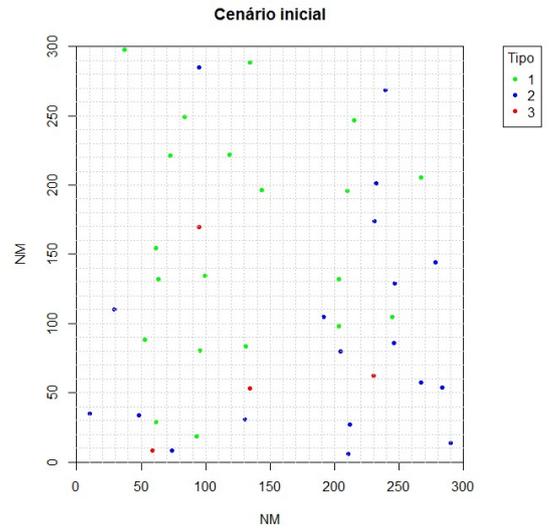


Fig. 3. Distribuição de embarcações no cenário inicial, representando a síntese das informações de localização coletadas através de imagem SAR.

Matematicamente, o vetor PIM de cada contato (k_1, k_2, k_3, \dots) constituído pelas informações de posição (x,y), de direção (θ) e de módulo de velocidade (v) resultante no tempo t após a aquisição inicial de PIM_0 é obtida pela transformação algébrica através dos dados do vetor deslocamento D gerado pela função Beta de cada tipo de embarcação (Be_1, Be_2 e Be_3):

$$PIM = [x \ y \ \theta_0 \ v_0] \quad (1)$$

$$D = [\theta \ v] \sim Be_{1,2 \text{ ou } 3}(A, B, \alpha, \beta) \quad (2)$$

$$PIM(t) = [(x + v t \sin \theta) \ (y + v t \cos \theta) \ (\theta_0 + \theta) \ (v_0 + v)] \quad (3)$$

Seguindo o método descrito, é calculada para cada embarcação da área essa distribuição de posicionamentos.

Como é feito um número muito grande de simulações (n) para o número total de embarcações (k) presentes na área inicialmente, o primeiro mapa gerado não apresenta uma informação visual que atenderia aos requisitos do problema. Para facilitar, o cenário é discretizado em quadrículas de 10 NM de lado. Contabiliza-se a frequência de possíveis contatos que atingem cada quadrícula em cada uma das n simulações.

Como consequência do método de Monte Carlo, após n simulações, pode-se considerar a razão entre o número de pontos no interior de uma quadrícula e o total de pontos gerados como a probabilidade de haver contatos naquela região.

A fim de facilitar a interpretação dos resultados, uma escala de cores pode ser associada à quantidade de pontos por quadrícula, gerando um “mapa de calor” (*heatmap*).

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig.4 exibe a distribuição de posições prováveis para cada tipo de embarcação considerada, de acordo com a distribuição de probabilidade proposta, considerando uma variação temporal de uma hora e um processo de Monte Carlo com 10000 amostras.

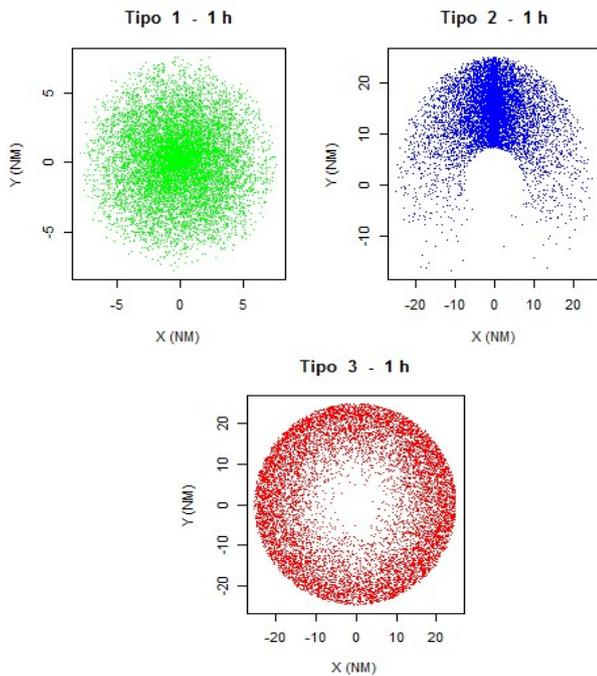


Fig. 4. Distribuição de posições prováveis para cada tipo de embarcação.

Utilizando apenas a simulação de Monte Carlo, sem a construção do mapa de calor, com $k = 43$ embarcações e $t = 4$ horas, obtém-se a imagem exibida na Fig 5.

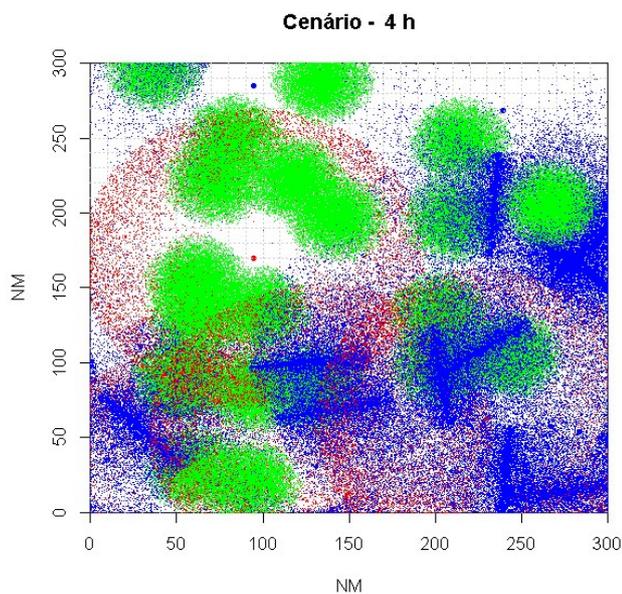


Fig. 5. Simulação de Monte Carlo aplicada ao cenário inicial, com variação temporal de 4 horas.

O cenário inicial foi simulado com variações temporais (t) de uma hora, quatro horas, oito horas e doze horas. Na Fig. 6 são apresentados os resultados consolidados na forma de mapas de calor, onde a cor vermelha representa a mais alta probabilidade de encontrar o alvo. Na sequência das mais altas até a mínima probabilidade, encontram-se amarelo, ciano, azul claro e azul escuro, respectivamente.

Ao observar a perspectiva do cenário original (Fig.1), fica evidente que esse voo não esclareceria mais de 30% da área total, gerando uma incerteza muito grande sobre a eficiência da missão, pois se desconhece a disposição inicial dos alvos de superfície.

Esse problema poderia facilmente ser minimizado após considerar a extração de informações de imagens SAR orbitais, como posição e direção estimada [11-13]. Entretanto, essa informação inicial pode invalidar-se em algumas horas. A metodologia proposta lida com esse problema ao projetar a provável movimentação desses alvos, baseado na estatística de seus comportamentos operacionais. Como resultado, identifica potenciais regiões nas quais eles poderão ser encontrados ao longo das horas após a passagem do satélite de vigilância.

A informação inicial possui uma validade próxima de doze horas para esse cenário e as condições pré-estabelecidas para aeronave e para os alvos. Após, não é mais possível distinguir áreas de maior probabilidade para o patrulhamento.

Outro ponto que merece uma análise crítica é o ajuste dos parâmetros α e β e os intervalos $[A, B]$ de velocidade de cada tipo de embarcação. Pode-se ainda avaliar a adequação de outras distribuições de probabilidade para modelar a movimentação das embarcações.

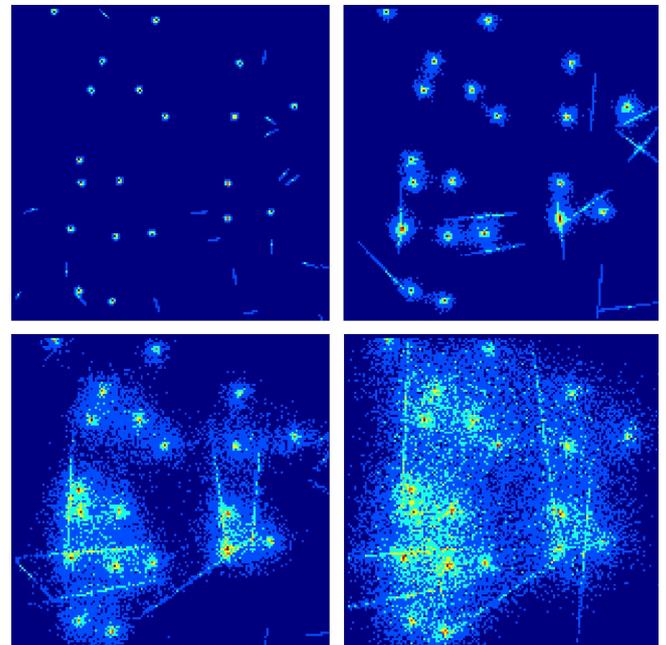


Fig. 6. Mapas de calor representando variações temporais de: 1h (esq. sup.), 4h (dir. sup.), 8h (esq. inf.) e 12h (dir. inf.).

IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

Apesar da movimentação não cooperativa dos alvos no cenário marítimo, é possível modelar seus comportamentos para manter atualizada a informação obtida por meio de uma imagem SAR utilizada no planejamento de missões de patrulhamento. No método proposto, para esse cenário, condições pré-estabelecidas da aeronave e dos alvos, constatou-se que é possível garantir validade operacional para a informação inicial por um período de até doze horas.

Este método pode ser aperfeiçoado através de um estudo para calibrar os parâmetros das distribuições Beta utilizados para cada tipo de embarcação ou para implementar outra distribuição de probabilidade que melhor se ajuste ao comportamento dos alvos.

Além disso, o método pode ser utilizado não só para o planejamento da missão, mas também durante sua execução, reprojando em tempo real as novas possibilidades a cada atualização de posição.

Vislumbra-se que, como oportunidade operacional, em situações de silêncio eletrônico, esse processamento pode ser empregado para atualizar probabilisticamente o cenário.

Por fim, a utilização dessa metodologia permite analisar a persistência da aplicabilidade de informações providas de tecnologias de sensoriamento remoto SAR orbital, orientando o planejamento e potencializando os resultados de missões aéreas de vigilância e reconhecimento.

REFERÊNCIAS

- [1] Brasil, Ministério da Defesa, Decreto Legislativo nº 373, de 25 de setembro de 2013 (aprova a Política Nacional de Defesa, a Estratégia Nacional de Defesa e o Livro Branco de Defesa Nacional). Brasil: Ministério da Defesa, 2012, p. 155.
- [2] M. J. H. B. Grob, "Routing of platforms in a maritime surface surveillance operation," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 170, no. 2, pp. 613–628, 2006.
- [3] M. S. M. Costa and D. Fernandes, "Análise do emprego de uma constelação de pequenos satélites SAR em vigilância marítima," XVI Simpósio Apl. Operacionais em Áreas Def. - XVI SIGE, pp. 90–95, 2014.
- [4] J. C. de Melo Junior, M. C. N. Belderrain, M. M. De Marchi, e D. Geraldo, "Otimização de scheduling de tarefas para satélite de observação da Terra", *Spectrum*, vol. 21, nº 1, p. 16–21, jul. 2020.
- [5] A. Negrão Costa, R. Lemos Paes, M. Zawadzki, e D. Geraldo, "Análise de cenários como uma ferramenta de apoio à decisão: estudo de caso em patrulha marítima", *Spectrum*, vol. 22, nº 1, p. 30–34, set. 2021.
- [6] BRASIL, Ministério da Defesa, and Comando da Aeronáutica, DCA 11-45 Concepção Estratégica Força Aérea 100. Brasil: Comando da Aeronáutica, 2016.
- [7] R. L. Paes, J. A. Lorenzetti, and D. F. M. Gherardi, "Patrulha marítima apoiada por técnicas de extração de informações de dados de satélites," Simpósio Guerr. Eletrônica (SIGE), 2006.
- [8] T. Eriksen, G. Hoye, B. Narheim, and B. J. Meland, "Maritime traffic monitoring using a space-based AIS receiver," *Acta Astronaut.*, vol. 58, no. 10, pp. 537–549, 2006.
- [9] J. L. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 7th ed. California, 2007.
- [10] L. M. Leemis and J. T. McQueston, "Univariate distribution relationships," *Am. Stat.*, vol. 62, no. 1, pp. 45–53, 2008.
- [11] R. L. Paes, J. A. Lorenzetti, and D. F. M. Gherardi, "Ship detection using TerraSAR-X images in the Campos Basin (Brazil)", *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 7, no. 3, pp. 545–548, 2010.
- [12] S. Jiang, C. Wang, H. Zhang, F. Wu, and B. Zhang, "Civilian ship classification based on structure features in high resolution SAR images," vol. 8525, p. 852505, 2012.
- [13] L. Entringer Falqueto, R. Lemos Paes, e A. Passaro, "A importância de dados polarimétricos para detecção de alvos artificiais no mar utilizando imagens SAR", *Spectrum*, vol. 22, nº 1, p. 53–58, set. 2021.