

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
GUERRA ELETRÔNICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CLASSIFICAÇÃO DE ALVOS EM IMAGEM SAR: a importância da fusão de dados de
AIS com imagens SAR na vigilância marítima**



Primeiro-Tenente Timothy Robert Marinho Tavares

Rio de Janeiro
2023

Primeiro-Tenente Timothy Robert Marinho Tavares

CLASSIFICAÇÃO DE ALVOS EM IMAGEM SAR: a importância da fusão de dados de
AIS com imagens SAR na vigilância marítima

Monografia apresentada ao Centro de Instrução
Almirante Alexandrino como requisito parcial à
conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em
Guerra Eletrônica.

Orientadores:

Prof. Dr. Guilherme Colen

Capitão de Corveta (EN) Fabiano Gabriel da Silva

CIAA
Rio de Janeiro
2023

Primeiro-Tenente Timothy Robert Marinho Tavares

CLASSIFICAÇÃO DE ALVOS EM IMAGEM SAR: a importância da fusão de dados de
AIS com imagens SAR na vigilância marítima

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial
à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica.

Aprovada em 22 de novembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. DSc **Guilherme** Ribeiro Colen – CIAA

Guilherme Ribeiro Colen

CC (EN) Fabiano **Gabriel** da Silva, MSc – CGAEM

Fabiano Gabriel da Silva

CC Leandro de Brito **Lanes**, MSc – CGAEM

Leandro de Brito Lanes

CIAA
Rio de Janeiro
2023

Dedico esse trabalho à minha querida família, este trabalho não é apenas meu, mas também de vocês. Cada desafio superado, cada página escrita e cada conquista alcançada são reflexos do amor, apoio e encorajamento que sempre recebi de vocês.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão às pessoas que estiveram ao meu lado durante esta jornada acadêmica, tornando possível a conclusão deste trabalho.

Primeiramente, minha eterna gratidão à minha esposa, Andressa, por seu apoio incondicional, paciência e compreensão ao longo de todas as etapas deste projeto. Sua presença foi meu alicerce e motivação, e por isso, minha gratidão é imensurável.

Aos meus pais, Paulo e Nita, que sempre acreditaram em mim, me apoiaram nos momentos de dificuldade e celebraram comigo cada conquista. Seu amor e encorajamento foram fundamentais para eu alcançar este objetivo.

Aos meus instrutores do curso de guerra eletrônica, que compartilharam seu conhecimento e experiência de forma dedicada e inspiradora. Suas orientações foram inestimáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial aos meus orientadores, o Prof. Guilherme Colen e o CC Gabriel. Suas orientações, sugestões e incentivo foram cruciais para a conclusão deste trabalho. Sua expertise e dedicação moldaram não apenas o conteúdo deste TCC, mas também a minha compreensão do tema.

Por fim, não posso deixar de mencionar meus queridos colegas de classe: Agabel, Caio Santos, Paulo Martins, Toshio Ito e Villander. Nossas trocas de experiências e aprendizado mútuo foram essenciais para o enriquecimento deste trabalho. Cada discussão em sala de aula foi uma fonte de inspiração.

A todos, meu mais sincero agradecimento. Este trabalho é resultado do apoio, colaboração e carinho de cada um de vocês.

"O mar é o supremo símbolo da grandeza do mundo. É a totalidade da água, o lugar onde a natureza é majestosa e deslumbrante em sua vastidão. Através da tecnologia, podemos trazer luz às profundezas do oceano, e ao fazê-lo, também assumimos a responsabilidade de proteger sua integridade."

Jacques Yves Cousteau

Classificação de alvos em imagem SAR: a importância da fusão de dados de AIS com Imagens SAR na vigilância marítima.

Resumo

Este trabalho representa uma análise das questões cruciais relacionadas à segurança marítima, com foco na fusão de dados AIS-SAR para a classificação precisa de alvos de interesse. Destacam-se desafios prementes, como o combate ao tráfico de drogas, a pesca ilegal e outras atividades ilícitas conduzidas por embarcações que desativam intencionalmente o sistema AIS, sendo a vasta região da Amazônia Azul o epicentro dessas preocupações. A pesquisa explora o papel essencial desempenhado pela vigilância marítima eficaz no contexto brasileiro, delineando como essa atividade tornou-se crucial tanto na proteção dos valiosos recursos marinhos do país quanto no enfrentamento aos crimes transfronteiriços e ambientais. A verdadeira inovação surge com a integração de dados AIS-SAR, representando um marco significativo no campo da segurança marítima. Este trabalho enfatiza não apenas a relevância, mas também a urgência dessa fusão de dados para aprimorar a classificação de alvos de interesse. Ao ressaltar a crítica necessidade dessa integração, este estudo reforça a importância de manter as águas territoriais brasileiras seguras e protegidas. A fusão de dados AIS-SAR não apenas representa um avanço tecnológico, mas também se torna uma peça central na salvaguarda dos recursos naturais do Brasil, enfrentando assim os desafios dos crimes transfronteiriços e ambientais de maneira mais eficaz e abrangente.

Palavras- chave: [Vigilância, AIS, SAR, Amazônia Azul, Pesca ilegal, Fusão de dados AIS-SAR, Segurança marítima, Marinha do Brasil]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quantidade de cocaína apreendida no Brasil de Abril-2015 a Março-2020.....	12
Figura 2 - Principais rotas de tráfico de cocaína que afetam o Brasil.	13
Figura 3 - Mancha com características de óleo a 50 km da costa da Bahia.	14
Figura 4 - Comportamento das ondas eletromagnéticas de acordo com a frequência de operação.....	19
Figura 5 - Área de visualização de um radar de acordo com a o ângulo de visada.....	19
Figura 6 - Representação lateral da geometria de um sistema de SLAR.	20
Figura 7- Representação frontal da geometria de um sistema de SLAR.....	21
Figura 8 - Representação de resolução em relação ao ângulo de incidência e distância.....	22
Figura 9 - Princípios de escaneamento SAR.	24
Figura 10 - CFAR em imagens SAR com alvos adicionados.....	27
Figura 11 - Imagens óticas e SAR de plataformas de petróleo.	28
Figura 12 - Representação dos modos de varredura e spotlight.....	29
Figura 13 - Estrutura do SAR interferométrico.....	31
Figura 14 - Satélite Terra SAR-X.....	32
Figura 15 - Visão geral do sistema AIS.....	34
Figura 16 - Amazônia Azul.	36
Figura 17 - Representação ilustrativa do Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAZ).	38
Figura 18 - Diagrama de blocos de fusão do AIS com SAR.....	43
Figura 19 - Resultados de identificação de navios pela integração de SAR e AIS.	44
Figura 20 - Visualização do produto no cliente de mapeamento web.....	46
Figura 21 - Embarcações detectadas através de dados AIS-SAR no litoral brasileiro de junho-outubro 2023.....	48

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIS	Sistema de Identificação Automática
AJB	Águas Jurisdicionais Brasileiras
CISMAR	Centro Integrado de Segurança Marítima
CFAR	Taxa de Falso Alarme Constante
FPU	<i>Floating Production Unit</i>
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
HS	High-Resolution SpotLight
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IMO	Organização Marítima Internacional
ITU	União Internacional de Telecomunicações
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
IW	<i>Interferometric Wide Swath Mode</i>
LRIT	Sistema de Identificação e Acompanhamento de Navios a Longa Distância
MN	Milhas Náuticas
NORMAM	Norma da Autoridade Marítima
ONU	Organização das Nações Unidas
PREPS	Programa Nacional de Rastreamento de Embarcações Pesqueiras por Satélite
SAR	Radar de Abertura Sintética
SIMMAP	Sistema de Monitoramento Marítimo de Apoio às Atividades de Petróleo
SiSTRAM	Sistema de Informação Sobre o Tráfego Marítimo
SisGAAZ	Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul
SC	ScanSAR
SL	<i>SpotLight</i>
SLR	Radar de Aparência Lateral
SLAR	Radar Aerotransportado Lateral
SM	<i>StripMap</i>
UNODC	Escritório das Nações Unidas sobre Drogas e Crime
UKIS	Sistema de Informação Ambiental e de Crises
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VTS	Serviço de Tráfego de Embarcações
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

LISTAS DE SÍMBOLOS

Φ	ângulo de visada
γ	ângulo de depressão
θ	ângulo de incidência local

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa e Relevância	16
1.2 Objetivo Geral	17
1.2.1 Objetivos Específicos	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Radar de Aparência Lateral (SLR)	18
2.2 Radar de Abertura Sintética (SAR)	22
2.2.1 Resolução SAR	24
2.2.2 Processamento de Imagem SAR para identificação de navios	25
2.2.3 Modos de Operação SAR	28
2.2.4 Principais Sistemas SAR	29
2.3 Satélite Terra SAR-X	31
2.4 Sistema de Identificação Automático (AIS)	32
2.5 Amazônia Azul	35
2.6 Vigilância Marítima e SISGAAZ	37
3 METODOLOGIA	39
3.1 Classificação da Pesquisa	40
3.1.1 Quanto aos fins	40
3.1.2 Quanto aos meios	41
3.2 Limitações do Método	41
4 FUSAO DE DADOS SAR-AIS	42
4.1. Interpolação AIS	44
4.1.1 Visualização SAR-AIS	45
4.2 Global Fishing Wacth	46
4.3. Embarcações Escuras X Sistema XView3-SAR	48
4.4 Benefícios da Fusão de dados SAR + AIS	50
4.5 Uso de dados SAR + AIS pela MB	51

5 CONCLUSÃO	51
5.1 Considerações Finais	53
5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos	53
REFERÊNCIAS	54

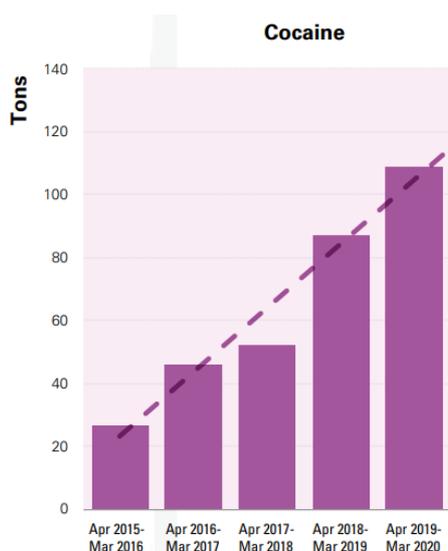
1 INTRODUÇÃO

A economia global possui uma alta dependência da indústria de transporte marítimo, visto que esse setor desempenha um papel crucial na interconexão dos países. O transporte marítimo tem sido historicamente a alternativa de menor custo para movimentar cargas em longas distâncias. Atualmente, cerca de 80% de todas as mercadorias, incluindo petróleo, derivados de petróleo, carvão, minérios, grãos e diversos outros produtos, são transportadas por via marítima (Milião, 2023)

À medida que a economia mundial continua a crescer, o comércio global de mercadorias por meio do transporte marítimo também está em constante expansão, resultando em um aumento significativo no tráfego de navios. No entanto, esse aumento na atividade marítima também tem sido acompanhado por desafios significativos relacionados à segurança e ao meio ambiente (UNODC, 2022).

Em paralelo ao aumento do tráfego marítimo, observa-se um crescimento concomitante nos crimes transfronteiriços, incluindo o tráfico de drogas, como pode ser observado na Figura 1. A crescente movimentação de embarcações em águas nacionais e internacionais e a diversidade de cargas transportadas proporcionam oportunidades para atividades ilícitas, como contrabando, tráfico de drogas e tráfico de seres humanos.

Figura 1 - Quantidade de cocaína apreendida no Brasil de Abril-2015 a Março-2020.



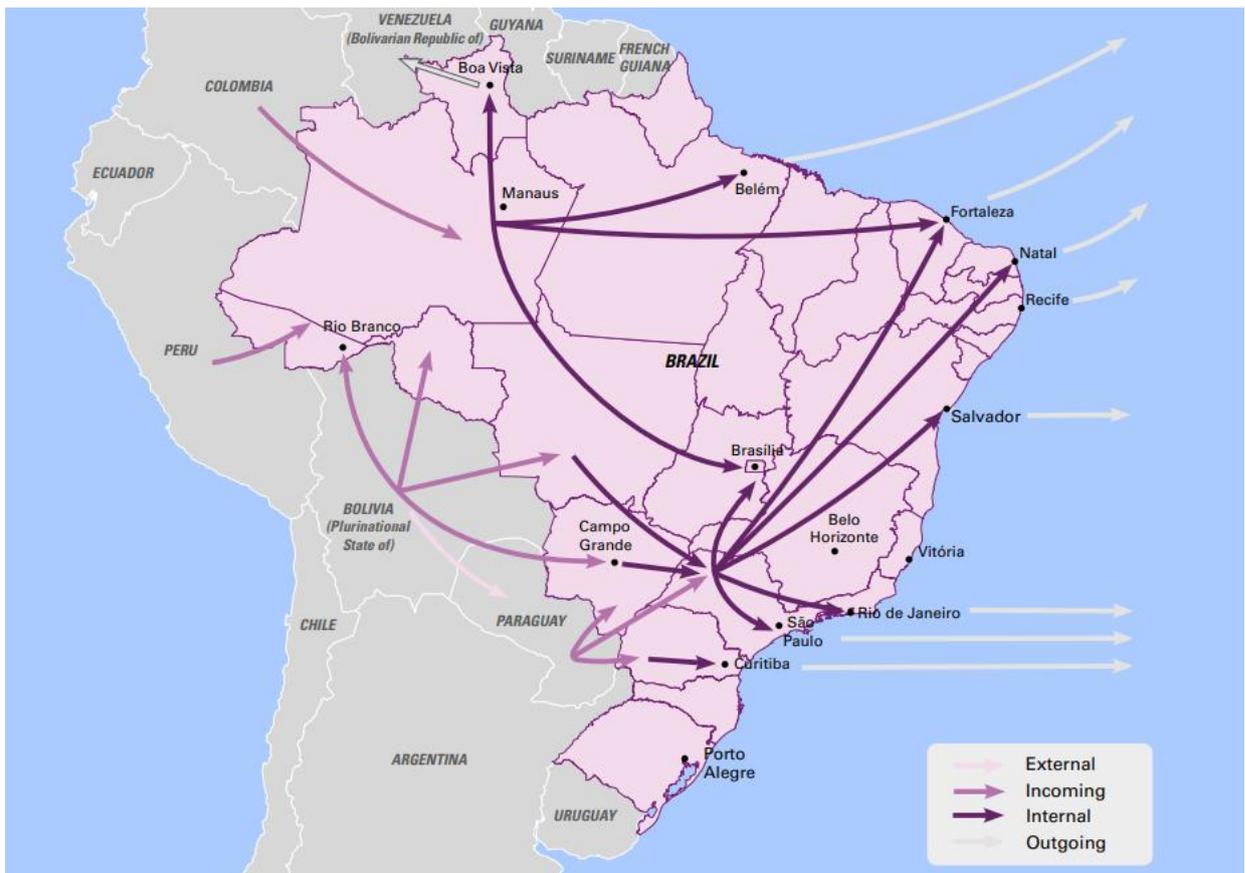
Fonte: Extraído de (UNODC, 2022)

Do mesmo modo, a expansão das atividades pesqueiras e de exploração de recursos marinhos tem levado a práticas ilegais de pesca, colocando em risco ecossistemas marinhos frágeis (UNODC, 2022).

De acordo com Escritório das Nações Unidas sobre Drogas e Crime (UNODC, 2022), nos últimos anos, as organizações narcotraficantes brasileiras diversificaram as rotas e portos utilizados para o tráfico de cocaína através e fora do Brasil, indo além do uso tradicional de portos grandes. Elas passaram a explorar portos menores na costa nordeste e sul do Brasil, onde há menos capacidade de inspeção

A Figura 2 apresenta um mapa com as principais rotas de tráfico de cocaína que afetam o Brasil. É possível perceber que grande parte do transporte dessa droga é realizado pelo mar.

Figura 2 - Principais rotas de tráfico de cocaína que afetam o Brasil.

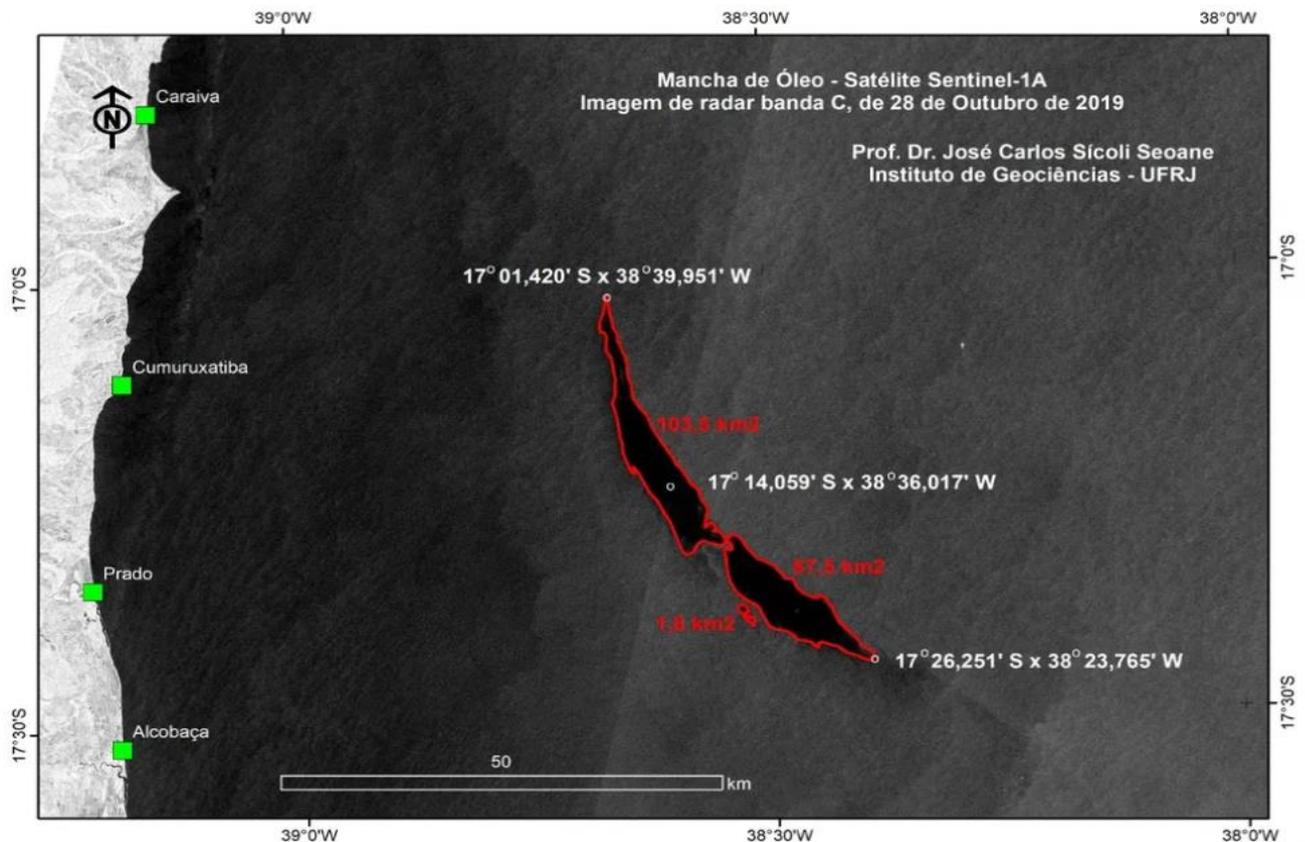


Fonte: Extraído de (UNODC, 2022).

O aumento no tráfego de navios também está diretamente ligado a desafios ambientais, como a poluição do ar e da água, a introdução de espécies invasivas em diferentes regiões e a ameaça aos ecossistemas costeiros (UNODC, 2022). A liberação de poluentes

atmosféricos provenientes dos navios e os derramamentos de óleo representam riscos significativos para a qualidade do ar e a saúde dos oceanos. De igual modo, o transporte de águas de lastro pode transportar organismos marinhos de uma região para outra, causando impactos negativos nos ecossistemas locais. A Figura 3 apresenta uma mancha de óleo detectada através do satélite Sentinel-1A.

Figura 3 - Mancha com características de óleo a 50 km da costa da Bahia.



Fonte: Extraído de (Oliveira, 2019)

A busca por abordagens inovadoras de vigilância marítima continua a desempenhar um papel crítico na segurança e no gerenciamento eficaz das águas territoriais. Nesse cenário em constante evolução, aprimorar as capacidades de monitoramento é essencial. Duas tecnologias que têm recebido considerável atenção são o Radar de Abertura Sintética (SAR) e o Sistema de Identificação Automática (AIS).

O SAR, com sua habilidade de gerar imagens detalhadas e abrangentes dos oceanos, e o AIS, que fornece dados em tempo real sobre a identificação e localização de embarcações, oferecem perspectivas valiosas e complementares sobre as atividades

marítimas. Embora sejam, em sua essência, abordagens distintas, a convergência dessas tecnologias já tem sido objeto de estudos e pesquisas anteriores.

A partir do lançamento inaugural do satélite SEASAT em 1978, tem havido um aumento substancial na quantidade de sistemas SAR em órbita terrestre. Entre esses sistemas destacam-se: a série composta por ERS-1, ERS-2, ENVISAT e Sentinel-1, gerida pela Agência Espacial Europeia; os sistemas canadenses RADARSAT-1 e RADARSAT-2; os italianos COSMO-SkyMed; os alemães TERRASAR-X e TANDEM-X; bem como os sistemas chineses GAOFEN-3 SAR. Estes sistemas viabilizam a aquisição de imagens SAR capazes de serem empregadas na supervisão de áreas marítimas para identificação de alvos, incluindo embarcações e estruturas petrolíferas (Li et al., 2018).

O uso de Radares SAR, concede uma nova dimensão às tarefas de vigilância devido às suas possibilidades de monitoramento com imagens de alta qualidade, independente das condições atmosféricas ou de vegetação, entretanto, o Brasil ainda não dispõe de satélites com essa tecnologia embarcada. O SAR ainda possui uma vantagem relevante frente aos imageadores ópticos pelo fato de atuar como um sensor ativo capaz de obter informações de um alvo, ou de uma área, independente de emissões naturais ou geradas pelos objetos. Isso significa que o SAR pode detectar e monitorar objetos, incluindo embarcações, mesmo quando não estão emitindo sinais como ocorre com o Sistema AIS, utilizado para rastrear navios (Franceschetti e Lanari, 1999).

A aptidão completa de vigilância torna o SAR uma ferramenta inestimável para monitorar atividades marítimas, reforçar a segurança e conduzir operações de busca e salvamento em ambientes marinhos. Isso se torna especialmente crucial quando as informações fornecidas pelo AIS, são inadequadas, ausentes ou imprecisas, pois o SAR pode preencher essas lacunas de conhecimento de forma eficaz.

Existem sete tipos de ameaças que foram identificados no relatório de 2008 do Secretário-Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre os oceanos e o direito marítimo, quais sejam: pirataria e assalto à mão armada, atos terroristas, tráfico ilícito de armas de destruição maciça, tráfico ilícito de narcóticos, contrabando e tráfico de pessoas pelo mar, pesca ilegal, não declarada e não regulamentada e danos intencionais e ilegais ao ambiente marítimo (Piedade, 2018).

O problema central que este estudo visa abordar reside na atividade ilegal e não regulamentada realizada por embarcações que desligam intencionalmente o AIS. Esta prática clandestina compromete diretamente os esforços de vigilância marítima, colocando em risco a segurança das águas territoriais do Brasil. A ausência de dados AIS confiáveis cria uma

lacuna significativa na capacidade de monitoramento, permitindo que atividades ilícitas, como tráfico de drogas, pesca ilegal e outras operações clandestinas, ocorram sem detecção adequada.

Portanto, é essencial que a vigilância marítima e as iniciativas de controle sejam aprimoradas para abordar eficazmente essas questões complexas e promover um transporte marítimo seguro e sustentável. A vigilância marítima desempenha um papel crucial na manutenção da segurança e na preservação do meio ambiente marinho.

Ao examinar a intersecção entre o SAR e o AIS, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) se baseia nos fundamentos estabelecidos por estudos prévios, que indicam os benefícios potenciais de uma abordagem integrada para a vigilância marítima. Esta investigação procura aprimorar e expandir essa compreensão, apresentando os resultados existentes e explorando perspectivas que podem contribuir de forma significativa para a Marinha do Brasil. Neste contexto, é importante definir os limites deste estudo.

1.1 Justificativa e Relevância

A vigilância marítima desempenha um papel crítico na segurança e no gerenciamento eficaz das águas territoriais brasileiras, especialmente considerando os desafios modernos, como o aumento das atividades ilegais, o tráfego de embarcações e as ameaças à segurança marítima. A integração de tecnologias inovadoras, como o SAR e o Sistema AIS, oferece um novo horizonte para abordar esses desafios. A justificativa para este estudo reside na necessidade de explorar e compreender a sinergia entre o SAR e o AIS, e como essa integração pode revolucionar a vigilância marítima, aprimorando a precisão, a cobertura e a eficiência da detecção de embarcações e atividades suspeitas.

Este estudo possui relevância em vários aspectos. Primeiramente, contribui para a segurança marítima, já que a combinação dos dados SAR-AIS proporciona uma visão abrangente das atividades marítimas, melhorando a identificação de embarcações, especialmente aquelas que não estão transmitindo informações AIS adequadas. Isso fortalece os aspectos de segurança marítima.

A fusão de dados oferece a capacidade de detecção de atividades ilegais, como pirataria, contrabando e pesca ilegal, por meio da análise conjunta de padrões comportamentais atípicos e pela identificação de embarcações não autorizadas.

Do mesmo modo, a prevenção de acidentes marítimos também é beneficiada pela integração dos sistemas, proporcionando uma compreensão mais precisa do tráfego de embarcações, o que ajuda a evitar colisões e outros incidentes no mar.

Por fim, a utilização dos dados provenientes de fontes terrestres e espaciais, SAR e AIS, viabiliza uma cobertura geográfica ampla, inclusive em áreas remotas ou de difícil acesso, ampliando ainda mais a eficácia da vigilância marítima.

1.2 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral explorar a integração dos dados do Radar de Abertura Sintética (SAR) e do Sistema de Identificação Automática (AIS) a fim de aprimorar a vigilância marítima e sua aplicação na Marinha do Brasil.

1.2.1 Objetivos Específicos

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem os seguintes objetivos específicos:

- 1) Investigar a possibilidade e os benefícios da integração de dados SAR e AIS para a vigilância marítima, avaliando de forma crítica os benefícios da fusão de dados SAR-AIS, incluindo aprimorada precisão, ampla cobertura geográfica e detecção de atividades suspeitas.
- 2) Contribuir para o avanço do conhecimento científico na área de vigilância marítima, especialmente no que diz respeito à integração entre o SAR e o AIS e fornecer insights que possam orientar a Marinha do Brasil e outras instituições no desenvolvimento de estratégias futuras para aprimorar a vigilância e a segurança marítima.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção será apresentado o referencial teórico que fundamenta este trabalho. O referencial teórico é a espinha dorsal de qualquer pesquisa acadêmica, proporcionando a

base conceitual sobre a qual o estudo é construído. No contexto deste trabalho, será examinada uma série de teorias, estudos e pesquisas relevantes que contribuíram para o entendimento profundo do tema em questão.

2.1 Radar de Aparência Lateral (SLR)

A propagação de ondas eletromagnéticas por um meio está diretamente relacionada ao comprimento de onda dessas ondas. Quando se trata de comprimentos de onda mais curtos, essas ondas tendem a interagir predominantemente com as camadas superficiais de elementos, como a vegetação. Em contraste, comprimentos de onda mais longos têm a notável capacidade de penetrar nas camadas mais profundas da vegetação e, em certos casos, podem até interagir com o solo ou o subsolo (Somedá, 2006)

Radar de Aparência Lateral (SLR) é um radar que opera emitindo ondas eletromagnéticas, geralmente na faixa de micro-ondas, em um ângulo lateral (perpendicular à trajetória de voo da aeronave ou satélite que carrega o radar). À medida que esses sinais de radar refletem na superfície da Terra e retornam ao sensor, o sistema de radar processa os sinais recebidos usando algoritmos avançados (Carver, 1988).

No contexto do SLR, é fundamental considerar as diferentes faixas de frequência de micro-ondas utilizadas. Estas incluem a Banda C (7,5-3,37 GHz), com comprimentos de onda entre 4 e 8 centímetros, que é caracterizada por sua capacidade limitada de penetração em vegetação densa e materiais sólidos, concentrando-se nas camadas superficiais, como na vigilância de gelo em áreas marítimas. A Banda P (0,5 - 0,25 GHz), com comprimentos de onda entre 60 e 120 centímetros, se destaca por sua notável capacidade de penetração em relação ao dossel de vegetação, sendo essencial para estimar a biomassa da vegetação e detectar elementos como gelo marinho, solo e geleiras. Na faixa da Banda L (2 - 1 GHz), com comprimentos de onda entre 15 e 30 centímetros, os radares podem penetrar na vegetação, tornando-os ideais para observações em regiões com cobertura vegetal densa e para monitorar a dinâmica de elementos como folhas e geleiras (Moreira et al., 2013).

A Figura 4 representa como diferentes bandas de frequências de operação penetram em uma vegetação.

Figura 4 - Comportamento das ondas eletromagnéticas de acordo com a frequência de operação.

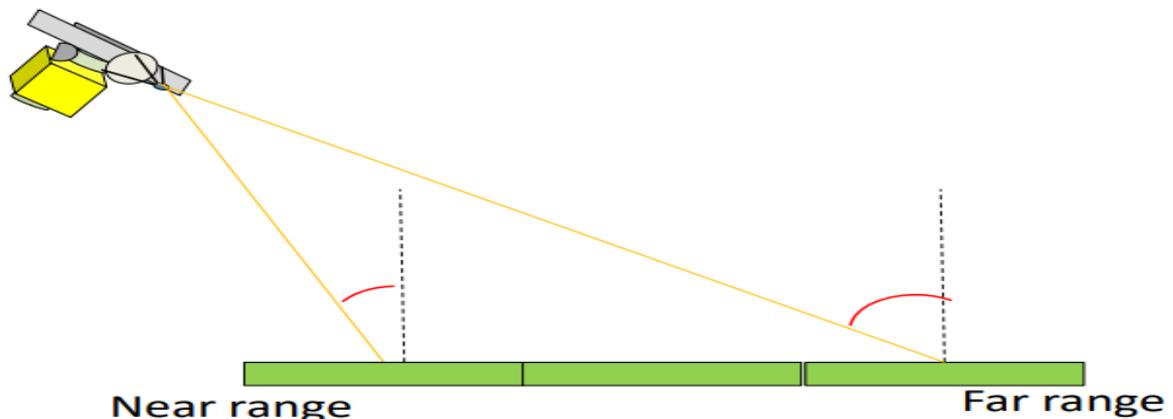


Fonte: Extraído de (Centeno, 2016).

Para a aquisição de dados usando comprimentos de onda na faixa de micro-ondas, é comum a utilização da técnica de SLR. Quando ela é empregada a partir de aeronaves, é referida como SLAR (Radar Aerotransportado Lateral) do inglês, *Side Looking Airborne Radar*. O SLAR opera emitindo pulsos de energia elétrica irradiados lateralmente pela aeronave, em um ângulo de incidência específico. O intervalo de tempo entre a transmissão e a reflexão desses pulsos de radar é usado para calcular a "distância inclinada" (*Slant Range*) entre o alvo e a aeronave. De igual modo, a intensidade do sinal de retorno contém informações cruciais sobre o coeficiente de espalhamento (reflectância) do alvo, gerando imagens oblíquas (Centeno, 2016).

A Figura 5 apresenta uma ilustração da definição do Alcance Próximo (*Near Range*), que se refere à área de visualização mais próxima do sensor e do Alcance Distante (*Far Range*), que representa a área de visualização mais afastada do sensor

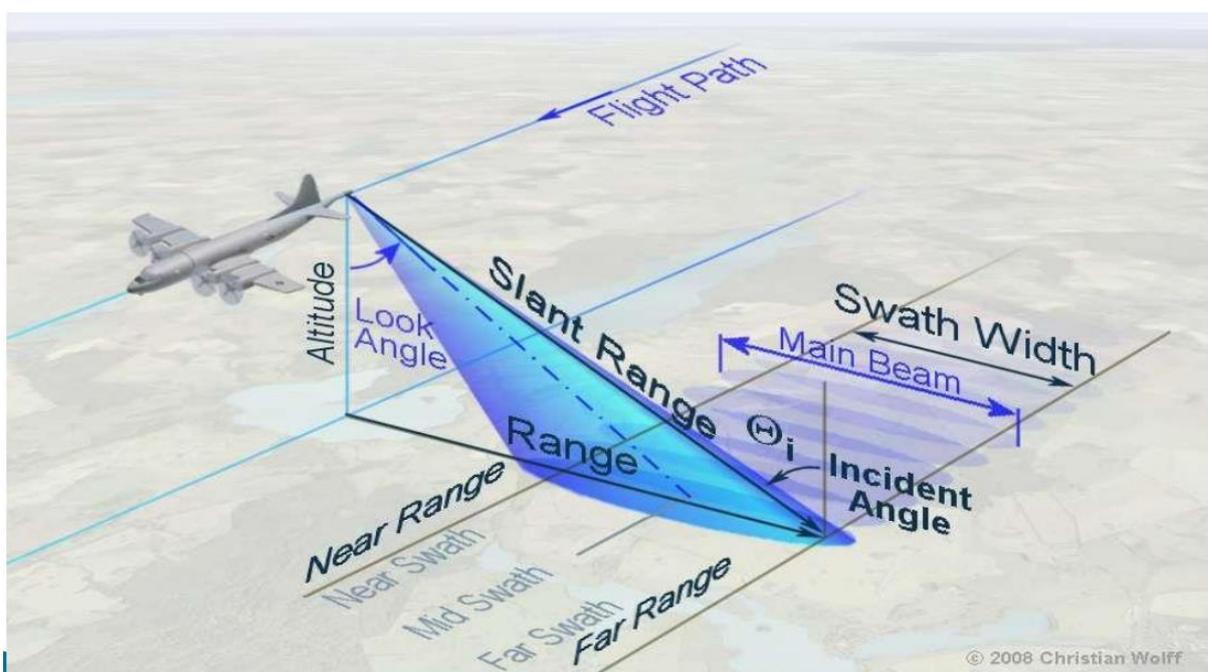
Figura 5 - Área de visualização de um radar de acordo com o ângulo de visada.



Fonte: Extraído de (Centeno, 2016).

A Figura 6 apresenta a Distância Inclinada, que é calculada para estabelecer a relação entre a largura da faixa (*Swath*) e a altitude, e o Ângulo de Depressão (*Look Angle*), que trata do ângulo formado entre a linha de horizonte de voo e a linha que define a direção de visada. Considerando uma região plana, o ângulo de depressão é maior para as regiões mais próximas à plataforma e menor nas regiões mais afastadas na direção perpendicular à linha de voo.

Figura 6 - Representação lateral da geometria de um sistema de SLAR.

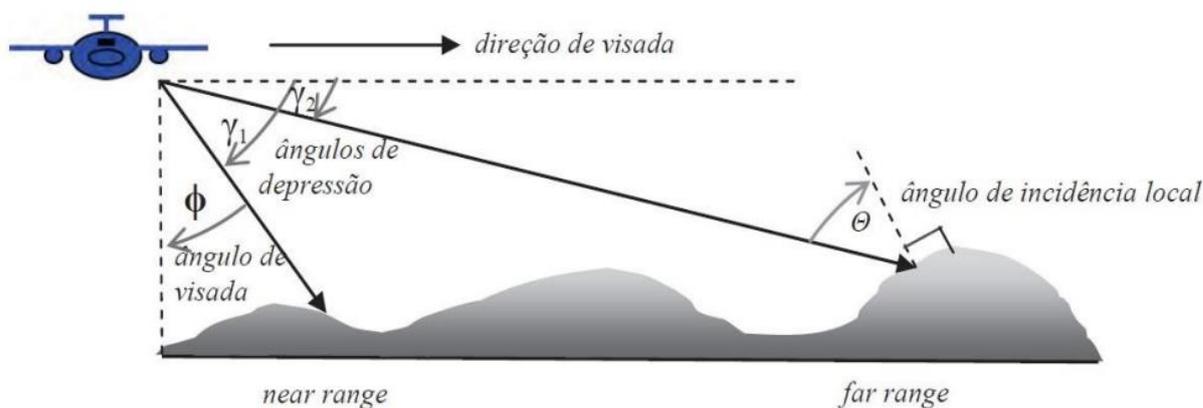


Fonte: Extraído de (McNairm e Jiao, 2018).

Já o Ângulo de Incidência Local (θ), apresentado na Figura 7, indica o ângulo entre o pulso de radar e a vertical ao plano da superfície no ponto onde o pulso toca o terreno, variando de acordo com a declividade do terreno. A Largura de Feixe Azimutal que é definida como a menor largura possível do feixe do radar, garante que reflexões de um único pulso sejam consideradas originadas de uma faixa estreita de terreno, além da Velocidade da Aeronave, calculada para assegurar que o próximo pulso transmitido ilumine a faixa seguinte de terreno ao longo da direção de visada.

A resolução espacial em um sistema de radar de abertura real é uma consideração crítica que afeta a capacidade de discernir detalhes em imagens geradas por esse sistema. Essa resolução varia em duas direções essenciais: a direção de alcance (range) e a direção azimutal. (Skolnik, 2008)

Figura 7- Representação frontal da geometria de um sistema de SLAR.



Fonte: Extraído de (Rostirolla, 2019).

Na direção perpendicular à linha de voo da plataforma radar, a resolução espacial de alcance é determinada pelo comprimento do pulso emitido. Esse comprimento do pulso é propagado à velocidade da luz e define a largura do pixel na direção de alcance. Na direção azimutal, a resolução é influenciada por fatores como a distância entre o objeto de interesse e a antena, o comprimento da antena e o comprimento de onda utilizado.

Essas duas direções afetam a geometria do pixel na imagem gerada pelo radar de abertura real. Em áreas próximas à plataforma radar, onde o ângulo de incidência é baixo, a resolução na direção perpendicular ao deslocamento da plataforma é maior, conforme apresentado na Figura 8. Nesse contexto, os objetos mais próximos da plataforma resultam em uma resolução azimutal inferior. Por outro lado, em regiões distantes da plataforma, as células de imagem apresentam dimensões menores na direção de alcance e maiores na direção azimutal.

Quando se trata de aprimorar a resolução azimutal, existem duas opções principais: a modificação do comprimento de onda utilizado ou o ajuste do tamanho da antena. No entanto, é importante observar que o tamanho da antena pode ser expandido apenas até um certo limite operacional, uma vez que satélites têm restrições quanto ao transporte de antenas excessivamente longas. Surge, então, o SAR como uma alternativa eficaz para contornar as limitações do tamanho da antena, permitindo a obtenção de resolução azimutal superior sem a necessidade de antenas fisicamente maiores.

Figura 8 - Representação de resolução em relação ao ângulo de incidência e distância.



Fonte: Extraído de (Centeno, 2016).

2.2 Radar de Abertura Sintética (SAR)

O SAR é um tipo de SLR que usa uma antena sintética para criar imagens de alta resolução de um alvo. Ao contrário de um radar convencional, que usa uma antena física grande, o SAR usa o movimento do radar para criar uma antena sintética que é equivalente em tamanho à antena física necessária para obter a resolução desejada. Essa antena transmite pulsos de radar em direção à superfície da Terra e, em seguida, coleta o sinal refletido para formar uma imagem de alta resolução da área de interesse. (Smith, 2021)

A diferença fundamental entre uma antena real e uma antena sintética reside no modo como recebem os sinais dos pontos de espalhamento. Em uma antena real, cada ponto de espalhamento emite um sinal que é recebido simultaneamente por todos os elementos da antena. No caso da antena sintética, entretanto, o retorno dos pontos de espalhamento é captado de forma sequencial à medida que o radar percorre a trajetória de voo, cobrindo a extensão do feixe da antena.

Em termos mais simples, enquanto uma antena real capta os sinais de todos os pontos de espalhamento de uma só vez, uma antena sintética cria uma representação virtual expandida. Ela permite que o retorno de cada ponto de espalhamento seja coletado sequencialmente ao longo do tempo. Essa técnica viabiliza uma resolução espacial extremamente alta, mesmo com uma antena aérea relativamente pequena. Importante notar que a plataforma na qual o SAR está montado deve estar em movimento para criar essa antena simulada. Esse movimento constante é essencial para produzir imagens de alta resolução (Curlander, 1991).

As imagens SAR podem ser utilizadas em diversas aplicações, incluindo a vigilância marítima para a detecção de alvos, como navios e plataformas de petróleo. O SAR, também, pode ser utilizado em outras áreas, como: Monitoramento de desastres naturais, como enchentes, deslizamentos de terra e terremotos; Mapeamento de áreas florestais e detecção de desmatamento; Monitoramento de áreas agrícolas para a previsão de safras e detecção de pragas; Detecção de mudanças na superfície terrestre, como deslocamentos de terra e movimentos tectônicos; Monitoramento de áreas costeiras para a prevenção de erosão e avaliação de impactos ambientais (Silva, Palm e Machado, 2019).

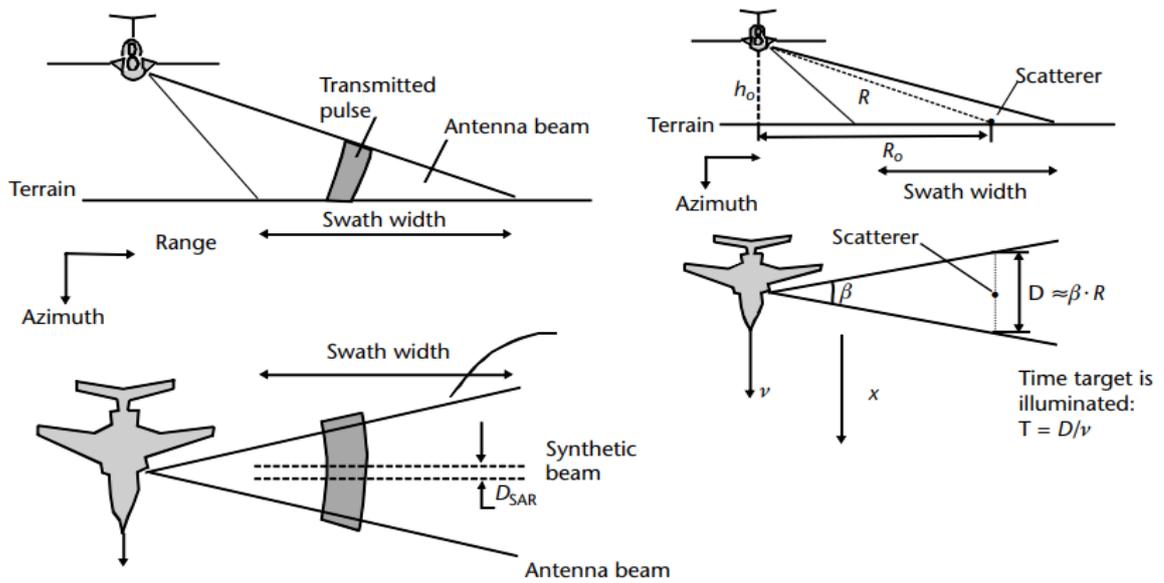
Ele é particularmente útil em áreas onde as condições climáticas ou a cobertura de nuvens impedem a aquisição de imagens por outros meios, como satélites ópticos. Além disso, esse radar pode fornecer informações adicionais sobre a superfície terrestre, como a rugosidade, a umidade do solo e a vegetação, que podem ser usadas para fins de monitoramento ambiental. O SAR também é capaz de detectar alvos em condições de baixa visibilidade, como à noite ou em condições de neblina, o que o torna útil para fins de vigilância e segurança. Ele é capaz de detectar alvos com alta precisão, mesmo em condições adversas, devido à sua capacidade de penetrar em nuvens, fumaça e outros obstáculos. Ele pode fornecer, ainda, informações adicionais sobre os alvos detectados, como sua localização, tamanho e velocidade, o que pode ser útil para fins de vigilância e segurança (Paolo et al., 2022). O SAR também pode ser usado para monitorar a atividade em áreas remotas ou de difícil acesso, como fronteiras ou áreas costeiras, onde a vigilância por outros meios pode ser limitada.

O conceito SAR é ilustrado na Figura 9, que mostra como a antena é varrida ao longo da trajetória de voo do radar para formar uma imagem de abertura sintética, apresentando um diagrama que ilustra os princípios básicos do SAR e sua configuração de varredura. Um pulso transmitido pelo radar é direcionado para a superfície da Terra por meio de uma antena, então é refletido de volta para a antena pelo terreno e por quaisquer objetos presentes na superfície, como edifícios, árvores ou veículos. O retorno do sinal é coletado pela antena e processado para formar uma imagem da área de interesse (Martino, 2018).

A configuração de varredura do SAR desempenha um papel crucial no processo de formação de imagens por radar. Nesse contexto, dois parâmetros críticos merecem atenção: a largura da faixa e a resolução da imagem. A determinação da largura da faixa envolve considerações da largura do feixe da antena e da distância entre o radar e a superfície terrestre. Um ponto importante é que, à medida que a faixa se torna mais ampla, o radar consegue

abranger uma área maior com um único pulso, mas essa expansão vem acompanhada de uma redução na resolução da imagem (Martino, 2018).

Figura 9 - Princípios de escaneamento SAR.



Fonte: Extraído de (Martino, 2018).

A altura do objeto analisado também desempenha um papel na largura da faixa e na resolução da imagem. Especificamente, objetos mais elevados tendem a resultar em faixas mais largas e em resoluções mais baixas. Além disso, não se pode ignorar o impacto do tempo de integração, um fator adicional que influencia diretamente tanto a largura da faixa quanto a resolução da imagem. Quando o tempo de integração se estende, ocorre um aumento na resolução da imagem, no entanto, tal ganho é acompanhado por uma redução correspondente na largura da faixa (Martino, 2018).

2.2.1 Resolução SAR

A resolução de um radar é sua habilidade de discernir objetos próximos uns dos outros, sendo determinada pela largura do feixe radar e a distância entre esses alvos. Uma imagem de alta resolução se caracteriza pela habilidade de destacar detalhes minuciosos em um objeto. Em sistemas como SAR, a resolução da imagem depende da largura da antena sintética, correspondente à antena física necessária para alcançar a resolução desejada. Isso se desdobra em duas dimensões: alcance e azimutal (Martino, 2018). O alcance é a distância entre o radar e o objeto refletor, enquanto o cruzamento é a dimensão perpendicular ao

alcance. Para conquistar uma alta resolução azimutal, uma antena de grandes proporções seria necessária, o que se mostra impraticável em uma aeronave. Portanto, a resolução de cruzamento é atingida por meio da abertura sintética (Martino, 2018).

Essa habilidade de distinção em um radar é classificada em duas categorias: a de alcance e a azimutal (ou resolução cruzada). A resolução de alcance mede a capacidade do radar de discriminar objetos próximos ao longo da direção do feixe. Já a resolução azimutal avalia a capacidade de distinguir objetos próximos na direção perpendicular ao feixe. Um elemento crucial para a qualidade das imagens produzidas pelo radar é a resolução, sendo influenciada por diversos fatores, como a largura do feixe, a frequência e a distância entre o radar e o alvo. Essa resolução é determinada pela largura da antena sintética e independe da distância e da frequência do radar (Martino, 2018).

A resolução de uma imagem de radar pode ser influenciada por diversos fatores, sendo dois deles a largura da antena sintética e a velocidade da aeronave. A largura da antena sintética corresponde ao tamanho necessário da antena física para alcançar a resolução desejada. Quanto maior essa largura, maior será a resolução da imagem obtida. Por outro lado, a velocidade da aeronave afeta a resolução da imagem de duas maneiras distintas. Primeiramente, quanto mais alta a velocidade da aeronave, mais larga precisa ser a antena sintética para alcançar a mesma resolução. Em segundo lugar, a velocidade da aeronave também influencia a geometria da imagem, podendo resultar em distorções na imagem final. Portanto, é essencial considerar esses fatores ao interpretar as imagens geradas pelo radar. (Skolnik, 2008)

2.2.2 Processamento de Imagem SAR para identificação de navios

O SAR emite ativamente sinais de um sensor em movimento; as ondas de radar, por sua vez, interagem com objetos em movimento no solo e interferem entre si, resultando em imagens que contêm características inerentes ao processo de formação da imagem, como ruído *speckle* e descontinuidades visíveis. Imagens SAR de múltipla polarização podem parecer significativamente diferentes das imagens comumente usadas produzidas por satélites ópticos. Processar e interpretar imagens SAR requer expertise no domínio, pois uma série de etapas de pré-processamento computacionalmente caras e específicas do domínio são necessárias antes da análise (Vespe e Greidanus, 2012).

O processamento SAR é uma etapa importante na análise de imagens SAR para detecção e monitoramento de navios. Nessa etapa são realizados pré-processamento, filtragem de ruído, formação de imagem e detecção de alvos (Martino, 2018).

No pré-processamento, a imagem SAR é preparada por meio de calibração, transformando o número digital do pixel em um coeficiente de retroespalhamento de radar calibrado. Mais ainda, são geradas imagens de intensidade ou amplitude, e técnicas como filtragem de *speckle* e *multi-looking* são aplicadas para reduzir falsos alarmes.

Uma etapa crítica é a aplicação da máscara de terra, que tem como objetivo considerar apenas os pixels localizados no mar, já que algoritmos de detecção de navios frequentemente produzem muitos falsos alarmes sobre a área terrestre (Di Martino, 2021).

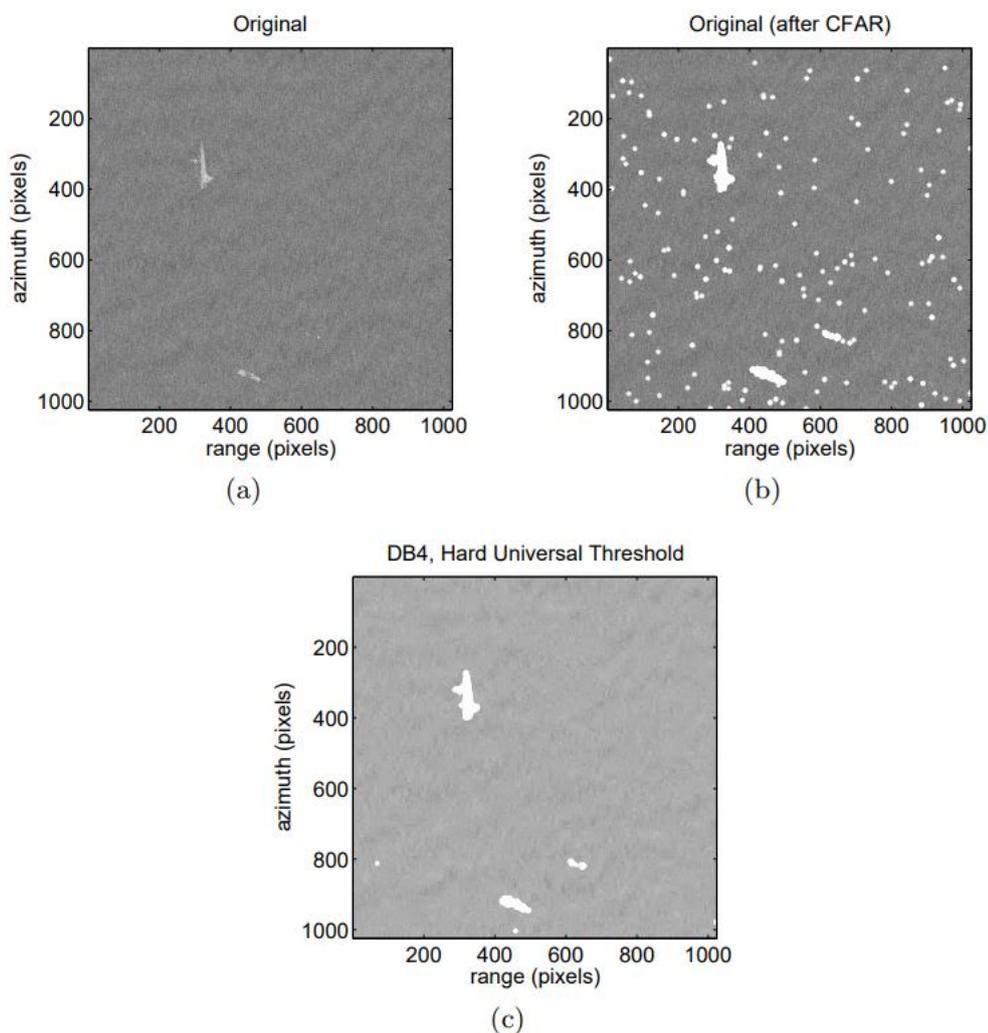
A formação de imagem envolve o uso de técnicas de processamento de sinal para corrigir distorções geométricas e de fase na imagem, bem como para compensar a atenuação do sinal devido à propagação do radar.

A detecção de alvos é a fase na qual algoritmos específicos são aplicados às imagens SAR para identificar navios. Entre esses algoritmos, a Taxa de Falso Alarme Constante (o CFAR) é amplamente utilizado devido à sua capacidade de detectar navios com alta precisão e baixa taxa de falsos alarmes (Di Martino, 2021).

Embarcações são pequenas em comparação com a área coberta pelas imagens de radar. Elas aparecem como alguns pontos brilhantes em um fundo confuso. Por exemplo, em um conjunto de dados, apenas 0,005% dos pixels da imagem são usados para delimitar essas embarcações. Outrossim, é difícil ou até impossível marcar manualmente informações importantes, como o tamanho da embarcação ou se é um barco de pesca. Portanto, precisamos de maneiras mais práticas de marcar esses dados, além do método manual, para criar conjuntos de dados grandes e bem anotados (Paolo et al., 2022)

A Figura 10 (a) mostra a imagem de intensidade com os alvos adicionados, centrados aproximadamente em $(x, y) = (300, 350)$ e $(450, 900)$, e um alvo pouco visível centrado em $(x, y) = (625, 800)$. A Figura 10(b) mostra os resultados do CFAR aplicado à imagem de intensidade (não filtrada); os pixels identificados como alvos estão destacados. A Figura 3(c) mostra os pixels de alvos identificados após a aplicação do CFAR à imagem filtrada com limiar universal rígido.

Figura 10 - CFAR em imagens SAR com alvos adicionados: (a) imagem de intensidade não filtrada, (b) alvos identificados na imagem não filtrada, (c) alvos identificados na imagem com limiar universal rígido.



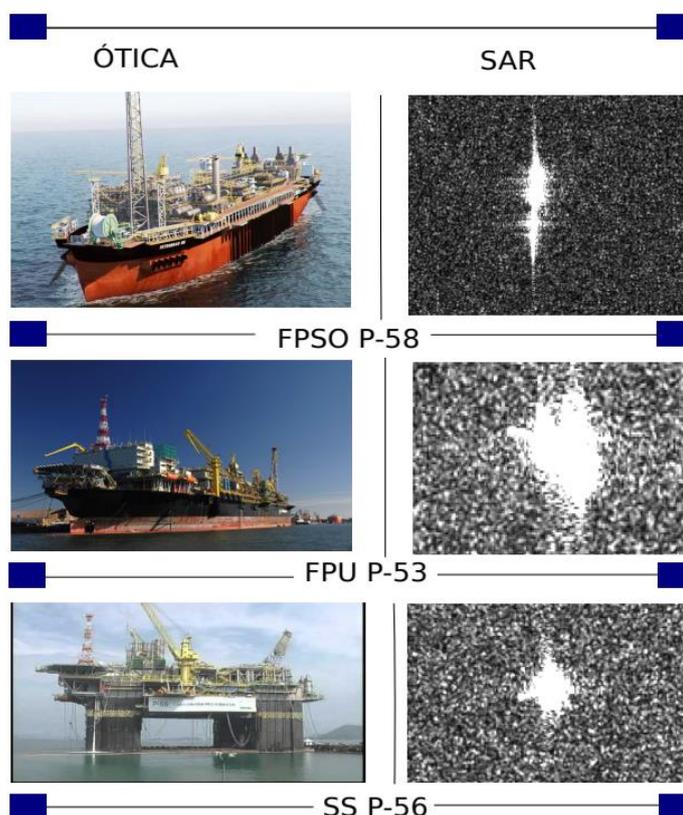
Fonte: Extraído de (Pettersen, Zee, e Fotopoulos, 2012).

Um exemplo de processamento de imagens SAR é o trabalho de (Silva, Palm e Machado, 2021), nele imagens SAR polarizadas VH (vertical e horizontal) foram empregadas para classificar plataformas de petróleo e navios na costa do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Duas técnicas *de machine learning*, *Random Forest* e *K-nearest neighbors*, foram testadas após o pré-processamento e a transformação das imagens. Após a separação dos alvos do fundo da imagem, características como textura, forma e tamanho foram extraídas e utilizadas como entrada para os algoritmos de *machine learning*, treinados para distinguir plataformas de petróleo de navios.

A Figura 11 compara imagens ópticas com suas respectivas imagens SAR, destacando plataformas como *Floating Production Storage and Offloading (FPSO) P-58*,

Floating Production Unit (FPU) P-53 e Semissubmersível (SS) P-56. Essas imagens foram geradas utilizando o produto GRD (*Ground Range Detected*) no modo IW (*Interferometric Wide Swath Mode*).

Figura 11 - Imagens óticas e SAR de plataformas de petróleo.



Fonte: Extraído de (Silva, Palm e Machado, 2021)

Note que a identificação de navios em imagens SAR requer um processo complexo que abrange pré-processamento, formação de imagem, detecção de alvos e o uso de técnicas de *machine learning*. Este processo é essencial para obter resultados precisos e confiáveis na detecção e monitoramento de navios em imagens SAR.

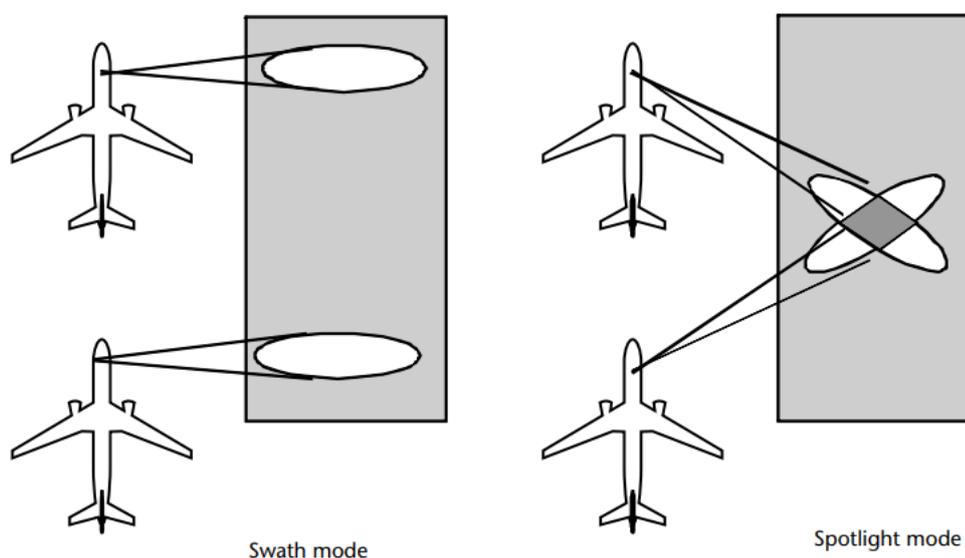
2.2.3 Modos de Operação SAR

O SAR pode operar em dois modos principais: o modo de varredura (também conhecido como modo *strip-map* e o modo *spotlight*). No modo de varredura, a antena é fixa em um dos lados da aeronave e produz uma imagem correspondente a uma faixa ao longo da trajetória de voo. Esse modo é apropriado para capturar imagens de áreas amplas, mas a resolução da imagem pode estar limitada pela largura da antena sintética (Koo et al., 2012).

No modo de *spotlight*, a antena é sempre apontada para uma área durante a trajetória de voo. Esse modo fornece imagens mais precisas da área iluminada, pois o tempo de processamento de integração é maior do que no modo de varredura. No entanto esse modo é adequado apenas para aquisição de imagens de áreas menores (Martino, 2018). Esses conceitos são ilustrados na Figura 12.

O processamento SAR é uma atividade intensiva, uma vez que abarca a coleta extensiva de dados de radar e a aplicação de algoritmos sofisticados para transformá-los em imagens de alta resolução.

Figura 12 - Representação dos modos de varredura e *spotlight*.



Fonte: Extraído de (Martino, 2018).

O SAR captura dados de radar em uma ampla gama de frequências e polarizações, resultando em um grande volume de dados brutos a serem processados. O processamento do SAR envolve correções para distorções causadas pelo movimento do radar e pela topografia do terreno, além do uso de técnicas de filtragem e interpolação para melhorar a qualidade da imagem. Essas etapas de processamento demandam algoritmos de alto nível, necessitando de *hardware* de alta velocidade e grande capacidade de armazenamento.

2.2.4 Principais Sistemas SAR

Os SAR se desdobram em dois tipos principais de sistemas: Polarimétrico e Interferométrico. O SAR de sistema polarimétrico emprega uma transmissão alternada em

polarizações horizontal (H) e vertical (V). As polarizações H e V se referem às duas direções ortogonais de polarização usadas no sistema SAR. Quando transmitindo em polarização H, o retorno é captado nas polarizações H e V, e vice-versa para a polarização V. Os retornos são coletados por dois canais de recepção em polarizações H e V, sendo então processados em termos de amplitude e diferença de fase, resultando em quatro canais: HH, HV, VH e VV. Os dados da matriz de polarização de espalhamento conferem uma descrição abrangente dos alvos, melhor contraste, diferenciação entre variações pares e ímpares da topografia, o que, por conseguinte, aprimora a classificação desses alvos (Henderson, 1998).

A decomposição de Freeman e Durden é uma técnica de polarimetria SAR que separa a matriz de espalhamento em três componentes: volume, superfície e duplo rebote (Freeman e Durden, 1998). A matriz de espalhamento é uma matriz complexa que descreve como um alvo reflete a energia do radar em diferentes polarizações. Essa decomposição usa a matriz de espalhamento para separar os diferentes tipos de espalhamento que ocorrem em um alvo.

A primeira componente dessa decomposição é o espalhamento de *Bragg*, que ocorre quando o comprimento de onda do radar é comparável ao tamanho das estruturas na superfície do alvo. A segunda componente é o espalhamento diédrico, que ocorre quando a superfície do alvo é lisa e reflete a energia do radar em uma direção preferencial. A terceira componente é o espalhamento de volume, que ocorre quando o alvo é composto de muitas pequenas estruturas que espalham a energia do radar em todas as direções. A decomposição de Freeman e Durden é útil para a classificação de alvos, pois permite separar os diferentes tipos de espalhamento que ocorrem em um alvo (Freeman e Durden, 1998).

Essa decomposição pode ser usada para identificar o tamanho dos navios analisando as propriedades polarimétricas do sinal retroespalhado. A componente de espalhamento de volume da decomposição é sensível ao tamanho e à forma do alvo, enquanto a componente de espalhamento de superfície é sensível à orientação do alvo. Ao combinar as informações dessas duas componentes, é possível estimar o comprimento e a largura do navio.

Essa técnica tem sido usada com sucesso para estimar o tamanho de navios em várias imagens de SAR, incluindo aquelas adquiridas pelos satélites TerraSAR-X e Radarsat-2. No entanto, deve-se observar que a precisão da estimativa de tamanho depende de vários fatores, como o ângulo de incidência, a orientação do navio e o estado do mar.

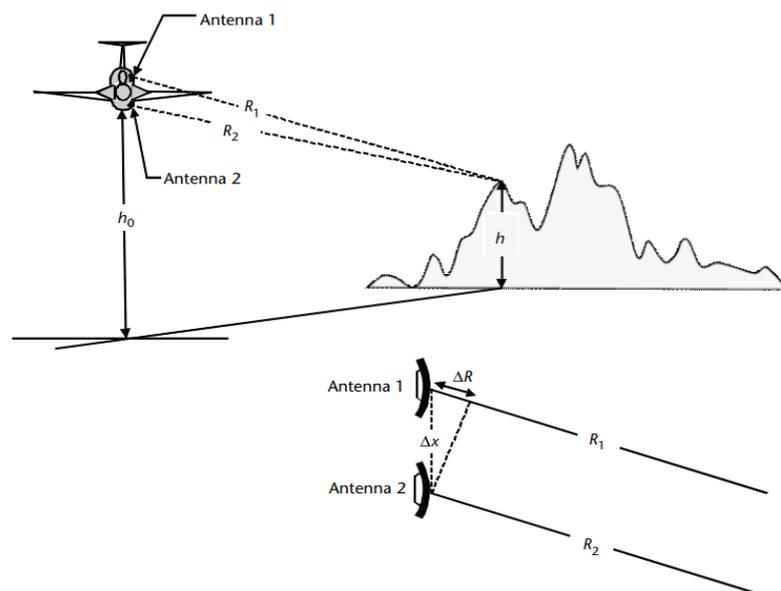
A interferometria é uma técnica que utiliza dois ou mais sinais de radar para medir a diferença de fase entre eles. Essa diferença de fase é usada para calcular a diferença de altura entre os objetos na superfície da Terra.

No sistema SAR interferométrico, ilustrado na Figura 13, um par de antenas fixadas na estrutura da aeronave é posicionado a uma distância conhecida entre si. O SAR emite pulsos de radar em direção à superfície da Terra. Quando esses pulsos atingem a superfície da Terra, são refletidos de volta para o radar. Devido à diferença na distância percorrida pelos sinais até cada uma das antenas, é calculada a diferença de fase, conhecida como interferograma, entre os sinais recebidos. Essa fase diferencial, obtida a partir dos retornos dos dispersores nas duas antenas, permite a determinação da altura relativa do alvo em relação ao terreno circundante (Rosen et al, 2000)

São necessárias medições muito precisas da posição e dos movimentos da aeronave para obter um mapa de altura. O sistema interferométrico SAR é usado para medir a topografia do terreno com alta precisão e é usado em aplicações como mapeamento de elevação, monitoramento de deslocamento do solo e detecção de mudanças topográficas e pode também ser utilizado para identificar uma embarcação no mar.

A precisão da medição de altura depende da precisão da medição de fase, que é afetada por vários fatores, como a qualidade do sinal, a geometria da imagem e a presença de interferência atmosférica.

Figura 13 - Estrutura do SAR interferométrico. (a) Posição das antenas no plano de elevação e (b) detalhes mostrando os dois parâmetros que permitem a medição da altura do objeto.



Fonte: Extraído de (Martino, 2018).

2.3 Satélite Terra SAR-X

Dentre outros satélites, o TerraSAR-X é um exemplo de satélite com SAR embarcado. Ele é um satélite radar pioneiro desenvolvido através de uma parceria público-

privada entre o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a Astrium, principal especialista em satélites da Europa. Ambas as entidades compartilharam os custos de desenvolvimento, construção e distribuição das imagens do satélite (EMBRAPA, 2018). A Figura 14 apresenta o satélite Terra SAR-X.

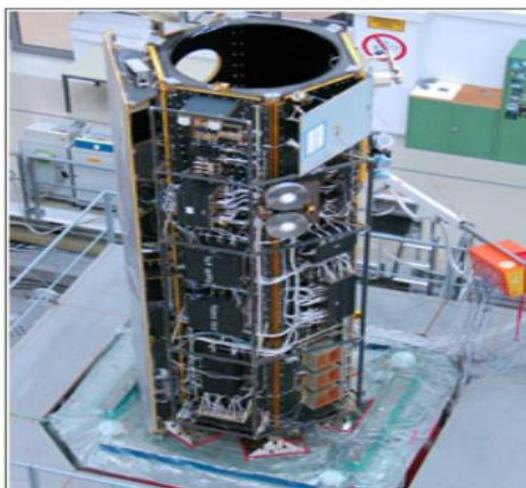
Equipado com um SAR, operando na banda-X, o TerraSAR-X é capaz de capturar imagens de alta qualidade com resolução de até 1 metro, tanto durante o dia quanto à noite, e em diversas condições climáticas.

O satélite possui modos de operação variados, incluindo *StripMap* (SM), *ScanSAR* (SC), *SpotLight* (SL) e *High-Resolution SpotLight* (HS), proporcionando flexibilidade nas aplicações. A antena SAR do TerraSAR-X permite diferentes combinações polarimétricas, incluindo polarização simples, dupla ou cruzada (em fase experimental).

No modo *StripMap*, as imagens têm resolução espacial de 3 metros e cobrem áreas de 30 x 50 km, sendo úteis para extensas regiões territoriais. Do mesmo modo, técnicas interferométricas podem ser aplicadas para criar modelos digitais de elevação.

O modo *ScanSAR* é ideal para capturar imagens em grandes áreas, oferecendo resolução espacial entre 16 e 18 metros. O modo *High-Resolution SpotLight* proporciona imagens de alta resolução, variando de 1 a 2 metros, e também suporta interferometria. A melhor resolução espacial, de 1 metro, é alcançada no modo alta Resolução *SpotLight* (HS) (EMBRAPA, 2018).

Figura 14 - Satélite Terra SAR-X.



Fonte: Extraído de (EMBRAPA, 2018).

2.4 Sistema de Identificação Automático (AIS)

O Sistema de Identificação Automática (AIS) é uma tecnologia de comunicação que possibilita que as embarcações compartilhem informações cruciais, tais como sua posição, velocidade e curso, com outras embarcações e estações terrestres.

Principalmente operando em dois canais *Very High Frequency* (VHF) designados (AIS1 - 161,975 MHz e AIS2 - 162,025 MHz), sua finalidade principal é aprimorar a segurança nas operações marítimas, permitindo que as embarcações acompanhem a posição e os movimentos umas das outras, mitigando assim riscos de colisões e outros incidentes potenciais. O AIS também é usado para monitorar o tráfego marítimo e ajudar as autoridades portuárias e de navegação a gerenciar o tráfego de navio (IEC 61933-2).

De acordo com a União Internacional de Telecomunicações, em inglês, *International Telecommunication Union* (ITU), esse sistema utiliza transponders a bordo dos navios para transmitir essas informações para outras embarcações e estações terrestres. As informações são transmitidas em intervalos regulares e podem ser recebidas por outras embarcações e estações terrestres equipadas com receptores AIS (ITU, 2023)

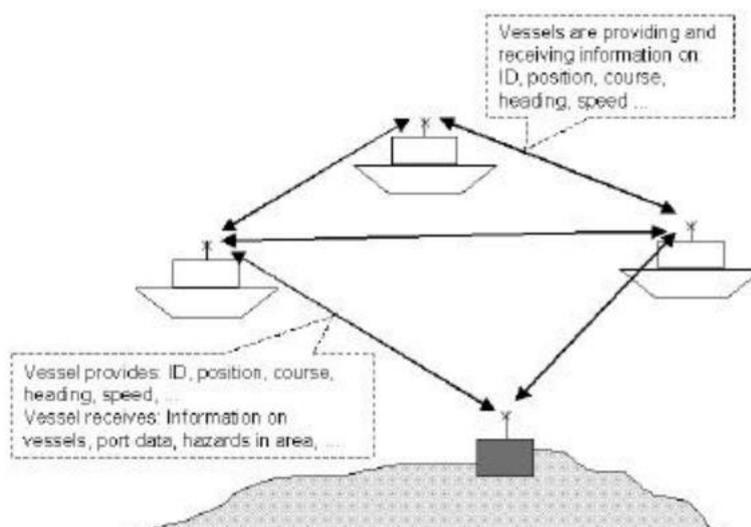
Na Figura 15 está apresentado o sistema AIS em operação, com os navios compartilhando suas informações, como nome, posição, direção e velocidade, com outras embarcações e estações terrestres. Da mesma forma, eles recebem esses mesmos dados de outras embarcações o que facilita a navegação segura e eficiente no mar.

É importante observar que a utilização do AIS é mandatória para a maioria das embarcações comerciais, de acordo com as regulamentações estabelecidas na Convenção Internacional para Salvaguarda da Vida Humana no. Mar (SOLAS V/19), representando um componente fundamental de um sistema de informação marítima mais amplo que oferece suporte ao planejamento e monitoramento das viagens marítimas.

De acordo com essa regulamentação, todos os navios de 300 toneladas brutas ou mais que operam em viagens internacionais e todos os navios de carga de 500 toneladas brutas ou mais que operam em viagens nacionais, bem como todos os navios de passageiros, independentemente do tamanho, devem ser equipados com um Sistema de Identificação Automática (AIS) (SOLAS V/19).

O "Guia para o Uso Operacional a Bordo de Sistemas de Identificação Automática (AIS) em Navios", feito pela Organização Marítima Internacional (IMO), desempenha um papel crucial na garantia de uma operação eficiente do AIS nas embarcações. Este guia aborda elementos fundamentais, incluindo o procedimento correto para o envio e a recepção de mensagens de segurança curtas e a necessidade de manter a precisão das informações transmitidas pelo sistema.

Figura 15 - Visão geral do sistema AIS.



Fonte: Extraído de (Resolução IMO, 2001).

Conforme instruções fornecidas nesse manual, é essencial que os usuários adquiram um entendimento completo dos princípios estabelecidos nas diretrizes e se familiarizem minuciosamente com o funcionamento do equipamento, incluindo a interpretação precisa dos dados exibidos. Os operadores de embarcações têm a responsabilidade primordial de garantir que o sistema AIS esteja configurado de maneira apropriada e que as informações transmitidas sejam estritamente precisas. As diretrizes fornecem instruções pormenorizadas sobre como efetuar o envio e a recepção de mensagens de segurança curtas, enfatizando a importância de manter a exatidão das informações transmitidas.

É importante frisar que nem todos os navios possuem AIS. O oficial de quarto deve sempre estar ciente de que outros navios, especialmente embarcações de lazer, barcos de pesca, navios de guerra e algumas estações costeiras, incluindo centros de Serviço de Tráfego de Embarcações (VTS), podem não estar equipados com AIS. O oficial de quarto deve estar ciente de que o AIS em outros navios, embora seja um requisito obrigatório, se o Capitão acreditar que a operação contínua do AIS pode comprometer a segurança de seu navio, o AIS pode desligado, com base no seu julgamento profissional.

O AIS é capaz de detectar navios dentro do alcance VHF modulado em frequência, mesmo ao redor de curvas e atrás de ilhas, desde que as massas terrestres não sejam muito altas. Em alto mar, o alcance típico é de 20 a 30 milhas náuticas, dependendo da

altura da antena. Com a ajuda de estações repetidoras, a cobertura tanto para navios quanto para estações VTS pode ser melhorada (Resolução IMO, 2001).

As informações do AIS podem ser usadas para auxiliar na tomada de decisões para evitar colisões. Ao usar o AIS no modo de navio para navio para fins anticisão, os seguintes pontos de precaução devem ser levados em consideração: O AIS é uma fonte adicional de informações de navegação. Ele não substitui, mas apoia sistemas de navegação como rastreamento de alvos de radar e VTS; e o uso do AIS não elimina a responsabilidade do oficial de quarto de cumprir sempre com as Regras de Colisão.

O sistema AIS possui limitações que incluem a possibilidade de que os navios equipados com AIS possam ter o equipamento desligado, o que significa que as informações fornecidas pelo AIS podem não estar dando uma imagem completa ou correta do tráfego marítimo na área. O AIS também pode ser afetado por interferência de outros equipamentos de rádio, como o radar, e pode não ser capaz de detectar navios que não estejam equipados com AIS.

2.5 Amazônia Azul

A área conhecida como "Amazônia Azul" abrange aproximadamente 5,7 milhões de quilômetros quadrados, incluindo espaços marítimos, rios e lagos sob a jurisdição do Brasil. Essa vasta região possui um potencial significativo nas áreas econômica, científica e ambiental. No entanto, sua proteção e a garantia da soberania brasileira exigem um constante aprimoramento e a colaboração entre diferentes setores, instituições e partes da sociedade (Lampert e Costa, 2020).

Atividades como pesca, turismo, transporte marítimo, exploração de petróleo, bioenergia e conservação de áreas ambientais desempenham um papel vital nesse patrimônio nacional, oferecendo diversas oportunidades para o crescimento e prosperidade.

A "Amazônia Azul" transcende sua relevância geográfica e representa um conceito político-estratégico que consolida a posição e a importância do Brasil no Atlântico Sul. Isso envolve a busca por uma exploração sustentável e a contínua proteção contra várias ameaças presentes e futuras, como pirataria, pesca ilegal, poluição da água e interesses de estados estrangeiros (Lampert e Costa, 2020).

A Constituição Federal de 1988 ressalta que os recursos existentes na Amazônia Azul são considerados como pertencentes à União, como diz o Título III, Capítulo II, art. 20 em seus incisos IV, V e VI:

“São bens da União: IV - as ilhas fluviais e lacustres nas zonas limítrofes com outros países; as praias marítimas; as ilhas oceânicas e as costeiras, excluídas, destas, as que contenham a sede de Municípios, exceto aquelas áreas afetadas ao serviço público e a unidade ambiental federal, e as referidas no art. 26, II (Inciso com redação dada pela Emenda Constitucional nº 46, de 2005); V - os recursos naturais da plataforma continental e da zona econômica exclusiva; VI - o mar territorial” (Constituição Federal de 1998, Título III, Capítulo II, art. 20 em seus incisos IV, V e VI).

Na Figura 16 destaca-se a região da Amazônia Azul, que compreende os espaços marítimos brasileiros que se estendem sobre o Oceano Atlântico: o Mar Territorial – até a distância de 12 milhas náuticas (MN); a Zona Contígua, adjacente ao mar territorial, cujo limite máximo é de 24 MN e é medida a partir das linhas de base do mar territorial; a Zona Econômica Exclusiva (ZEE), medida a partir das linhas de base do mar territorial, até a distância de 200 MN; e a Plataforma Continental, que compreende o solo e o subsolo das áreas submarinas, além do mar territorial, podendo se estender além das 200 milhas até o bordo exterior da margem continental.

Figura 16 - Amazônia Azul.



Fonte: Extraído de (Perlingeiro,2022).

Esta região de interesse exemplifica as dimensões de uma área que necessita de vigilância constante, visto que é de responsabilidade do Brasil a constante supervisão, a fim

de proteger não apenas os recursos naturais preciosos, mas também para garantir a sustentabilidade econômica e ambiental das atividades que nela ocorrem. Além de contribuir na coibição de práticas ilegais, como a pesca não autorizada, pirataria e outros crimes marítimos, assegurando a preservação desse valioso patrimônio nacional para as gerações futuras (Marinha do Brasil).

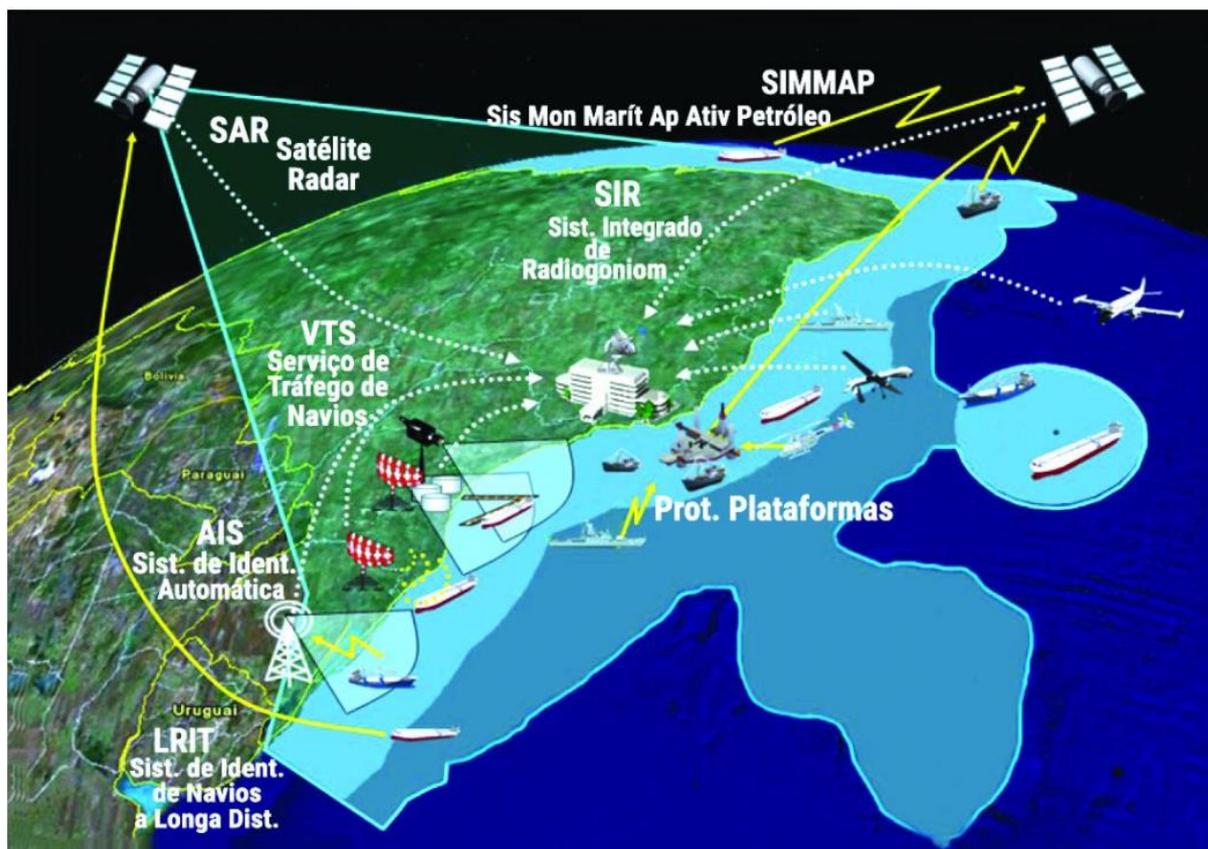
2.6 Vigilância Marítima e SISGAAZ

A Marinha do Brasil, em colaboração com agências e órgãos governamentais, lidera a implementação e aprimoramento contínuo do Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz). O objetivo primordial do SisGAAz é manter a vigilância constante sobre as áreas marítimas de interesse e as águas interiores, bem como salvaguardar seus recursos, tanto vivos quanto não vivos, portos, embarcações e infraestruturas. Isso é feito em resposta a uma variedade de situações, incluindo ameaças, emergências, desastres ambientais, hostilidades e atividades ilegais, contribuindo assim para a segurança e a defesa da Amazônia Azul e para o desenvolvimento do país (Lampert e Costa, 2020).

O SisGAAz incorpora uma ampla gama de equipamentos e sistemas, que incluem radares terrestres, embarcações, câmeras de alta resolução e a capacidade de integrar informações de sistemas colaborativos. Destacam-se sistemas como o Sistema de Monitoramento Marítimo de Apoio às Atividades de Petróleo (SIMMAP), o Sistema de Identificação e Acompanhamento de Navios a Longa Distância (LRIT), o Sistema de Informação Sobre o Tráfego Marítimo (SISTRAM) e o Programa Nacional de Rastreamento de Embarcações Pesqueiras por Satélite (PREPS).

Esses sistemas se baseiam no rastreamento de posição via satélite, com os dados de GPS sendo transmitidos por meio de comunicações por satélite para centrais de monitoramento. Além disso, está prevista a incorporação de sensores acústicos aos locais de monitoramento no futuro. A Figura 17 é uma representação ilustrada do SisGAAz, em que todos os sistemas citados acima estão apresentados.

Figura 17 - Representação ilustrativa do Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAZ).



Fonte: Extraído de Marinha do Brasil.

A Norma da Autoridade Marítima (NORMAM) número 8, emitida pela Diretoria de Portos e Costas, estabelece diretrizes para o tráfego e permanência de embarcações em Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB), com o objetivo primordial de assegurar a segurança na navegação, proteger vidas humanas e prevenir a poluição no ambiente aquático.

De acordo com as Convenções Internacionais de Busca e Salvamento (SAR/1979), uma extensa área do Oceano Atlântico foi designada sob a responsabilidade do Brasil. Isso implica que todas as embarcações mercantes, independentemente da bandeira que ostentem, devem aderir ao Sistema de Informações Sobre o Tráfego Marítimo (SISTRAM) como medida de segurança. Para se tornarem participantes, os navios mercantes devem submeter seus Planos de Viagem para cada trajeto realizado dentro da área de responsabilidade de busca e salvamento do Brasil, mesmo quando estão apenas em trânsito.

Em relação aos navios de bandeira brasileira, o envio de informações sobre suas posições e dados de navegação ao Centro Integrado de Segurança Marítima (CISMAR) é uma obrigação. Quanto aos navios mercantes estrangeiros, eles são convidados a participar

voluntariamente quando navegam na área de busca e salvamento do Brasil e, ao ingressar nas águas territoriais brasileiras, essa participação se torna obrigatória.

Ademais, as embarcações com autorização para coletar dados relacionados às operações de petróleo e gás natural, bem como aquelas que empregam rebocues de petrechos em suas atividades nas AJB, são obrigadas a integrar-se ao SISTRAM. Essa integração visa aprimorar a segurança e o monitoramento marítimo na região.

3 METODOLOGIA

Neste seção será apresentada a metodologia adotada para realizar a pesquisa deste trabalho. A metodologia descreve o processo sistemático utilizado para responder às perguntas de pesquisa e alcançar os objetivos estabelecidos. A abordagem metodológica escolhida é crucial para a validade e a confiabilidade dos resultados.

Embora este trabalho se concentre na integração de dados AIS-SAR para combater a atividade ilegal, ele não pretende resolver todos os desafios relacionados à vigilância marítima. Em vez disso, o estudo visa identificar estratégias e abordagens para melhorar a detecção e a resposta a embarcações que desativam o AIS. Este é um passo fundamental na direção de um sistema de vigilância mais robusto e eficiente.

3.1 Classificação da Pesquisa

A pesquisa foi conduzida através da exploração de bases de dados bibliográficas de renome, como IEEE, Scopus e *Science Direct*. A seleção criteriosa de fontes priorizou autores de artigos científicos amplamente reconhecidos e referenciados na comunidade acadêmica e científica global, como Paolo, Park e Voinov. Ao utilizar essas fontes, o objetivo foi capturar não apenas o conhecimento consolidado, mas também as últimas tendências e inovações em fusão de dados AIS-SAR. Dessa forma, buscou-se embasar teoricamente este estudo, a fim de proporcionar uma visão atualizada das técnicas mais avançadas de sensoriamento remoto aplicadas à vigilância marítima. Não é foco da pesquisa a realização de ensaios, testes ou simulação com objetivo de coletar dados experimentais.

3.1.1 Quanto aos fins

O objetivo principal desta pesquisa é analisar e destacar a importância da fusão de dados AIS-SAR na vigilância marítima, com foco específico no monitoramento de embarcações envolvidas em atividades ilícitas, como tráfico de drogas, pesca ilegal e poluição. Pretende-se compreender como a integração desses dados contribui para a segurança marítima do Brasil, especialmente na proteção da Amazônia Azul e na eficácia do SISGAAZ.

Este trabalho não apenas reconhece os estudos anteriores como também almeja avançar em direção a uma compreensão mais profunda e a uma aplicação teórica dos conceitos explorados. Ao fazê-lo, aspira-se a fornecer *insights* valiosos que possam informar

estratégias e decisões relacionadas à vigilância marítima, com o objetivo de aprimorar a eficiência operacional e o resguardo das águas nacionais.

3.1.2 Quanto aos meios

Para estabelecer uma base sólida para a pesquisa, foi realizada uma pesquisa bibliográfica abrangente. Diversas fontes, incluindo artigos científicos, livros, relatórios técnicos e documentos governamentais, foram consultadas para compreender os princípios técnicos e teóricos relacionados a SLAR, SAR, AIS, Amazônia Azul, SISGAAZ e fusão de dados AIS-SAR. A pesquisa bibliográfica proporcionou uma compreensão aprofundada do estado atual da tecnologia e das práticas de vigilância marítima.

3.2 Limitações do Método

Durante a condução deste estudo sobre a fusão de dados AIS-SAR na vigilância marítima, algumas limitações metodológicas específicas surgiram. Primeiramente, é importante notar que este trabalho se baseou principalmente em pesquisa bibliográfica e não envolveu experimentos ou análises laboratoriais. Isso limitou a obtenção de dados específicos e detalhados que poderiam ter sido obtidos por meio de métodos experimentais.

Adicionalmente, vieses na seleção de literatura também podem ter afetado o estudo. A disponibilidade de artigos e pesquisas relacionadas pode ter influenciado a escolha da literatura, potencialmente deixando de incluir algumas teorias relevantes e, assim, restringindo a amplitude da revisão teórica.

4 FUSAO DE DADOS SAR-AIS

A combinação de Imagens SAR e dados do Sistema de Identificação Automática (AIS) para detecção e monitoramento de navios pode melhorar significativamente a precisão e a eficiência da vigilância marítima, permitindo que as autoridades monitorem melhor o tráfego de navios e identifiquem possíveis ameaças à segurança marítima.

O fato de que a maioria das embarcações que realizam atividades ilegais não transmitem suas posições limita significativamente a utilidade das abordagens de rotulagem que dependem apenas de dados AIS para detectar e caracterizar essas embarcações “invisíveis”.

É possível superar essa limitação adotando uma abordagem híbrida de rotulagem que combina um algoritmo de correspondência AIS-SAR com a verificação por analistas humanos especializados. Isso permite que os modelos de *machine learning* treinados "aprendam" uma variedade maior de características das embarcações, incluindo aquelas de alvos escuros, e detectem embarcações independentemente do status de transmissão de AIS delas (Paolo et al., 2022)

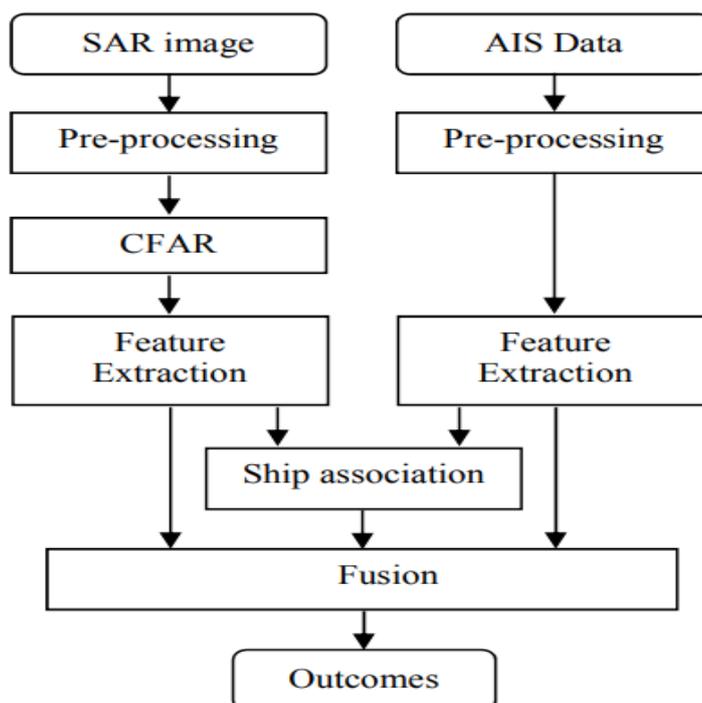
Segundo um estudo feito por alunos da Universidade de Surrey em 2018 (Achiri, Guida e Iervolino, 2018), a fusão de dados SAR-AIS combina as informações desses dois sensores para fornecer uma imagem mais completa da situação marítima. O processo de fusão envolve a projeção das informações do AIS na imagem do SAR e a associação dos dados do AIS com os alvos detectados. Essa fusão é realizada em quatro etapas conforme ilustrado na Figura 18.

Primeiramente, há a detecção de navios em imagens SAR, os relatórios AIS são extraídos no momento da imagem SAR e suas posições são projetadas na imagem SAR de acordo com o deslocamento Doppler. Nesta etapa, o algoritmo CFAR é aplicado para detectar navios em imagens SAR, ele é baseado em dois passos principais. Primeiro, o ruído do mar é modelado por uma distribuição estatística adequada. Em seguida, um valor de limiar é definido para ter uma taxa de falsos alarmes constantes.

O algoritmo CFAR é aplicado em cada pixel da imagem SAR para detectar navios. Ele compara o valor do pixel com o valor do limiar definido e determina se o pixel representa um navio ou não. Se o valor do pixel for maior que o valor do limiar, o pixel é considerado como parte de um navio. Caso contrário, o pixel é considerado como ruído do mar. O algoritmo CFAR é capaz de detectar navios em imagens SAR com alta precisão e baixa taxa de falsos alarmes (Achiri, Guida e Iervolino, 2018).

Após a detecção, as informações de posição, direção e tamanho do navio são extraídas tanto dos dados SAR quanto dos dados AIS. Esses detalhes são fundamentais para a identificação e o monitoramento detalhado das embarcações.

Figura 18 - Diagrama de blocos de fusão do AIS com SAR.



Fonte: Extraído de (Achiri, Guida e Iervolino, 2018).

Finalmente, os vetores de recursos extraídos separadamente dos dados SAR e AIS são alimentados no bloco de fusão, onde a função de média aritmética é usada para combinar os recursos. Essa função calcula a média dos valores de cada recurso para cada navio.

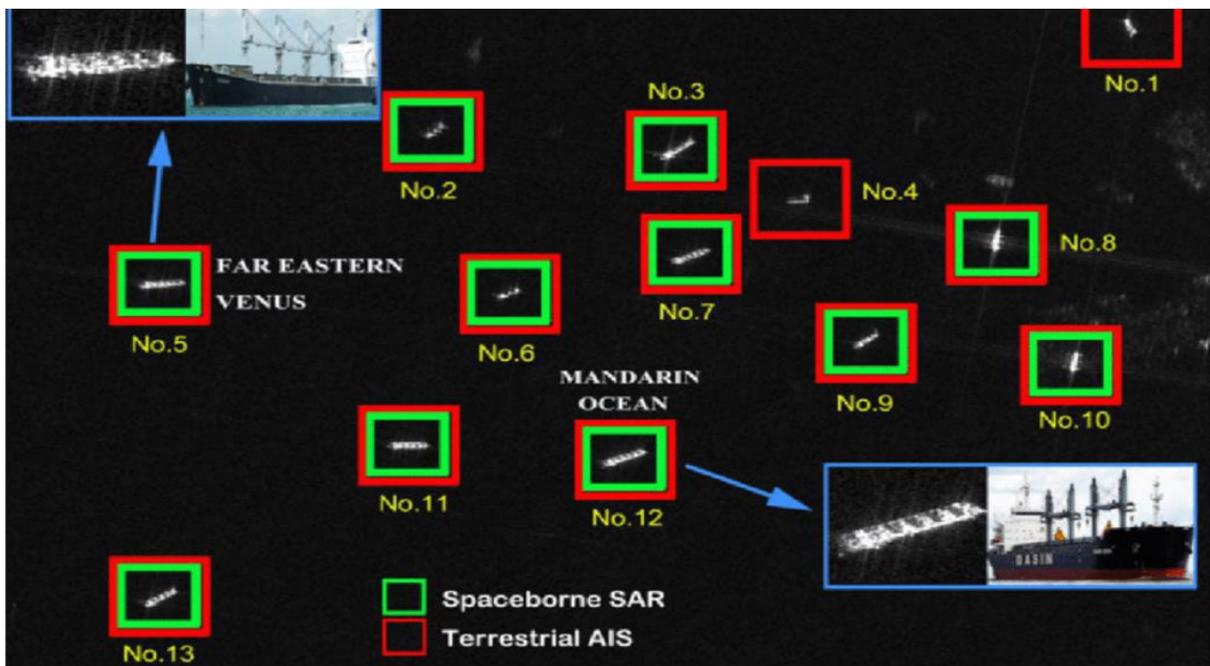
É realizada uma busca de duplo vizinho mais próximo para associar cada relatório AIS ao alvo detectado pelo SAR mais próximo. Para isso, é definido um limite de busca empírico para a área de pesquisa, uma vez que pode haver casos em que não há alvos SAR correspondentes a um relatório AIS específico.

Quando o alvo SAR mais próximo é encontrado, a distância entre o alvo AIS e o alvo SAR é registrada. Se nenhum alvo for encontrado dentro da área de busca, é assumido que não há alvo para atribuição. Então é realizada uma iteração pelos alvos SAR para associá-los ao relatório AIS mais próximo. Novamente, é realizada uma busca de duplo vizinho mais próximo e a distância entre o alvo SAR e o relatório AIS é registrada.

Em seguida, é realizada uma comparação das relações AIS-SAR e SAR-AIS para verificar se as distâncias registradas são iguais. Se as distâncias forem iguais, é assumido que a associação é válida e os atributos do relatório AIS são atribuídos ao alvo SAR correspondente (Voinov et al., 2016).

O processo de fusão de dados SAR-AIS é implementado em um alto nível de paralelização para garantir que os produtos de detecção de navios sejam derivados dentro de 10 a 15 minutos após a aquisição da imagem. O resultado da fusão dos dados é um vetor de recursos combinados que representa cada navio detectado nas imagens SAR e nos dados AIS, que pode ser exemplificado pela Figura 19.

Figura 19 - Resultados de identificação de navios pela integração de SAR e AIS.



Fonte: Extraído de (Zhao et al., 2014).

4.1. Interpolação AIS

A interpolação AIS é uma técnica utilizada para reconstruir a trajetória de um navio com base em relatórios AIS coletados em diferentes momentos. Essa técnica é importante para melhorar a precisão da fusão de dados SAR-AIS, uma vez que permite obter uma posição mais precisa do navio no momento da aquisição da imagem SAR. A interpolação AIS é realizada por meio de algoritmos que estimam a posição do navio em um determinado momento com base nos relatórios AIS coletados antes e depois desse momento. (Voinov et al., 2016).

Esses algoritmos levam em consideração a velocidade e a direção do navio, bem como outras informações disponíveis nos relatórios AIS, como a identificação do navio e o tipo de transponder AIS utilizado. A interpolação AIS é particularmente útil em áreas onde a densidade de relatórios AIS é baixa, o que pode ocorrer em áreas remotas ou em alto mar. Nesses casos, a interpolação AIS permite preencher as lacunas nos dados AIS e obter uma posição mais precisa do navio no momento da aquisição da imagem SAR.

No entanto, a interpolação AIS também apresenta limitações, especialmente em áreas onde a densidade de tráfego marítimo é alta. Nesses casos, a interpolação pode levar a erros na estimativa da posição do navio, uma vez que não leva em consideração as manobras do navio ou a interação com outros navios na área. Para minimizar esses erros, é importante combinar a interpolação AIS com outras fontes de informação, como dados de radar ou imagens de satélite, e aplicar técnicas avançadas de fusão de dados.

4.1.1 Visualização SAR-AIS

A visualização é uma etapa importante no processo de fornecimento de serviços de tempo quase real baseados em dados SAR-AIS. Ela permite que os usuários finais acessem e interpretem os produtos de detecção de navios gerados a partir dos dados SAR-AIS de forma rápida. Existem várias técnicas de visualização que podem ser aplicadas aos dados SAR-AIS, dependendo das necessidades dos usuários finais.

Uma das técnicas mais comuns é a exibição de mapas com sobreposição de informações de detecção de navios. Esses mapas podem ser gerados a partir de imagens SAR georreferenciadas e incluir informações sobre a posição, velocidade e direção dos navios detectados pelo SAR. As informações de AIS também podem ser sobrepostas no mapa para fornecer informações adicionais sobre a identificação do navio e outras informações relevantes.

Uma forma de utilizar os serviços de mapeamento na web é usando um cliente de mapeamento na web, que requer apenas um navegador da web. O cliente de mapeamento na web é baseado em componentes de interface do sistema de Informação Ambiental e de Crises (UKIS), desenvolvido no Centro Alemão de Dados de Sensoriamento Remoto, e é implementado usando as mais recentes tecnologias da web, como AngularJS e Leaflet. O cliente é independente de plataforma e é compatível com qualquer navegador da web moderno, sem a necessidade de qualquer *software* ou plugins extras. (Voinov et al., 2016). Um exemplo de visualização do produto no cliente UKIS é mostrado na Figura 20.

detalhada das operações marítimas. Uma das inovações cruciais dessa ferramenta é a integração de dados provenientes do AIS e imagens SAR, coletados por satélites e receptores terrestres.

Ao combinar as informações do AIS com imagens SAR, esse sistema consegue determinar o esforço de pesca aparente que é uma medida relativa da intensidade da atividade pesqueira em uma determinada área ou em relação a um grupo específico de embarcações. Esse método se baseia em algoritmos sofisticados que analisam as mudanças na velocidade e direção das embarcações, revelando padrões de atividade pesqueira.

O resultado é um mapa de calor colorido que indica a intensidade da atividade de pesca em áreas específicas, permitindo comparações detalhadas e análises precisas. A Figura 21 apresenta uma ferramenta do sistema, que possibilita filtrar as embarcações que foram detectadas através de dados SAR, onde cada pixel representa um conjunto de embarcações que se encontra em determinada região.

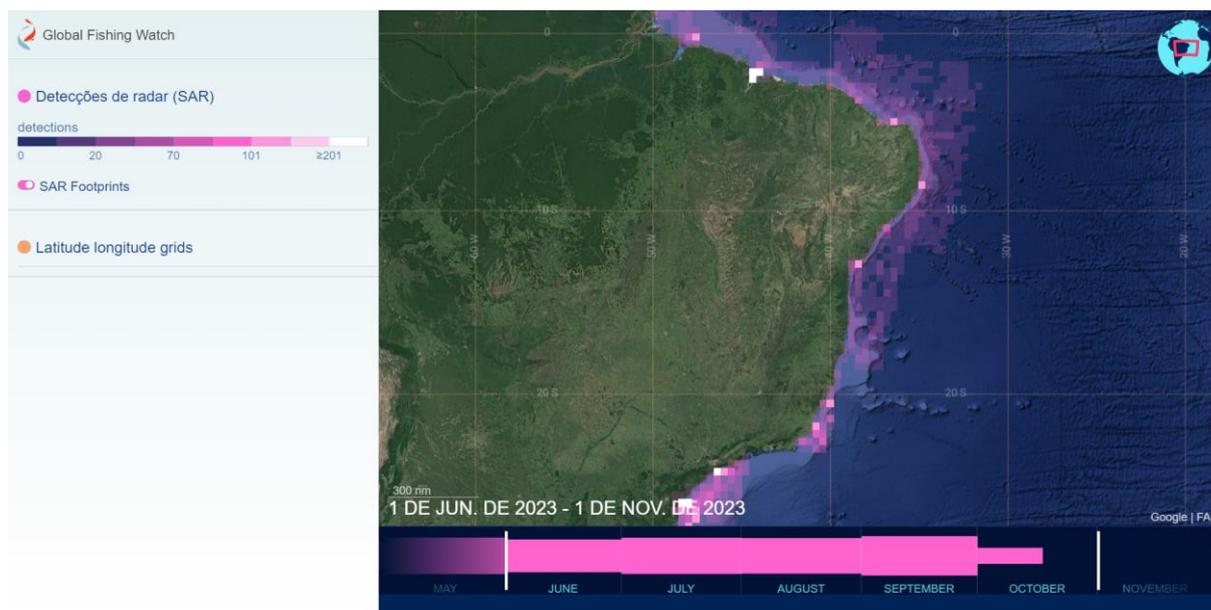
Além da visualização do esforço de pesca aparente, o GFW oferece recursos avançados, como a visualização de rotas detalhadas e eventos ao longo do percurso de cada embarcação. Esses eventos destacam locais de pesca, visitas a portos, encontros de embarcações e eventos de deriva, proporcionando uma compreensão mais aprofundada das atividades marítimas em tempo real.

A capacidade de pesquisar qualquer embarcação no mapa usando informações como nome, número de identificação de serviço móvel marítimo (MMSI), número da Organização Marítima Internacional (IMO) ou código de chamada (*callsign*) amplia ainda mais a utilidade dessa ferramenta. A pesquisa avançada permite filtrar os resultados por fonte de informação, bandeira e datas, fornecendo dados específicos e detalhados sobre as operações das embarcações.

Para informações mais aprofundadas, o GFW permite a adição de camadas de referência, facilitando uma melhor compreensão da atividade nas zonas econômicas exclusivas, Organizações Regionais de Pesca e outras áreas relevantes. Além disso, os usuários têm a flexibilidade de adicionar suas próprias camadas de referência, permitindo análises detalhadas e uma gestão espacial eficaz.

Com a fusão inovadora de dados AIS-SAR, o sistema não apenas oferece uma visão geral da atividade pesqueira global, mas também se torna uma ferramenta poderosa para fonte de informações e tomadas de decisão, capacitando governos e autoridades marítimas a monitorar, regular e proteger as águas oceânicas de maneira mais eficaz.

Figura 21 - Embarcações detectadas através de dados AIS-SAR no litoral brasileiro de junho-outubro 2023.



Fonte: Extraído de (Global Fishing Watch, 2023).

4.3. Embarcações Escuras X Sistema XView3-SAR

Os avanços recentes na tecnologia de sensoriamento remoto permitiram o monitoramento da atividade pesqueira global por meio do AIS. Contudo, o uso do AIS varia consideravelmente conforme a região e a frota; algumas embarcações não são obrigadas a utilizar o AIS e algumas delas desativam o sistema para se envolver em atividades ilícitas (Taconet, Kroodsmá e Fernandes, 2019). As embarcações que não transmitem dados e são, portanto, não rastreadas pelos sistemas de monitoramento tradicionais são conhecidas como embarcações "escuras".

Essa situação limita significativamente a capacidade de gerenciar eficazmente os recursos marinhos. A pesca, não declarada e não regulamentada, é uma das maiores ameaças para os ecossistemas marinhos, prejudicando os esforços no sentido de uma gestão sustentável das pescas (Relatório Especial do TCE, 2022). Nos últimos anos, os crimes de pesca mais significativos foram cometidos por frotas que, em sua maioria, não utilizavam o AIS, resultando em prejuízos financeiros significativos para pescadores legítimos e governos, além de causar danos irreparáveis aos ecossistemas cruciais (Park et al., 2020).

A pesca ilegal, não declarada e não regulamentada (INN) representa uma ameaça significativa ao fornecimento de alimentos para os seres humanos, à saúde dos ecossistemas marinhos e à estabilidade geopolítica (Defense Innovation Unit, 2023). A pesca INN é generalizada, colocando em risco a sustentabilidade das pescarias globais tanto em águas

nacionais quanto em alto mar. Os países em desenvolvimento são os mais vulneráveis à pesca INN, com estimativas de capturas reais em países da África Ocidental, por exemplo, sendo 40 por cento mais altas do que as capturas declaradas. Em escala global, estima-se que um em cada cinco peixes capturados de forma selvagem seja ilegal ou não declarado; o valor econômico desses peixes nunca chega às comunidades que deveriam ser os verdadeiros beneficiários. As perdas globais anuais devido a essa atividade ilegal são avaliadas entre 10 bilhões a 23.5 bilhões de dólares americanos.

Os piores exemplos de pesca INN frequentemente estão ligados a crimes transnacionais, incluindo abusos de direitos humanos, trabalho forçado, evasão fiscal, pirataria e tráfico de drogas, armas e seres humanos. A pesca INN também agrava os efeitos das mudanças climáticas nos recursos oceânicos.

A natureza transnacional da pesca INN exige a capacidade de compartilhar e receber dados facilmente entre as nações. Ferramentas mais eficazes e econômicas para a detecção rápida de atividades de pesca suspeitas e ilícitas fortalecerão os esforços de fiscalização e controle, mitigando os danos causados pela pesca INN.

O xView3-SAR foi desenvolvido como parte do *xView3 Computer Vision Challenge*, uma competição internacional que visa a detecção e caracterização eficaz de navios em grande escala usando imagens de radar de SAR. Esta iniciativa foi organizada pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, pela In-Q-Tel e em colaboração com outras organizações renomadas. Consiste em um conjunto de dados inovador criado para treinar modelos de *machine learning* na detecção e caracterização de navios em imagens SAR em ambientes marinhos. É composto por quase 1.000 imagens SAR de tamanho completo, que foram meticulosamente rotuladas usando uma combinação de análise automatizada e intervenção manual especializada. Cada imagem é acompanhada por informações de batimetria e estado do vento, proporcionando contexto ambiental crucial para as imagens.

O diferencial do xView3-SAR está na sua criação usando dados AIS globais, um algoritmo de correspondência AIS-SAR de última geração e verificações detalhadas realizadas por analistas humanos especializados, resultando em um conjunto de dados rico em detalhes e que contem 1.400 gigapixels, tornando-se o maior e mais avançado conjunto de dados de sua categoria.

O acesso a imagens arquivadas de sensores SAR comerciais existentes em órbita é difícil em volume suficiente para treinar um algoritmo sofisticado. Os dados são proibitivamente caros, estão sujeitos a restrições de licença do usuário final, estão disponíveis de forma irregular em uma determinada área de interesse e geralmente são entregues em um

contexto que requer revisão por analistas humanos. Isso limita a escalabilidade e impede uma maneira transparente de avaliar a precisão da solução automatizada subjacente.

O desafio xView3 utiliza dados de treinamento rotulados derivados da combinação do modelo de detecção histórica de objetos marítimos da GFW, a saída de suas análises únicas do AIS e detecções visuais humanas. As imagens SAR são provenientes dos satélites Sentinel-1 da Agência Espacial Europeia, uma opção não comercial com um extenso arquivo global.

Essa plataforma não apenas supera as limitações dos conjuntos de dados anteriores, mas também representa um avanço significativo na área da visão computacional, proporcionando uma base sólida para o desenvolvimento de algoritmos mais precisos e eficientes no campo da detecção e caracterização de navios em ambientes marinhos (Paolo et al., 2022).

4.4 Benefícios da Fusão de dados SAR + AIS

A integração dos dados SAR e AIS oferece uma série de benefícios significativos para o monitoramento de embarcações. Esses benefícios incluem uma considerável melhoria na precisão da detecção e identificação de navios, uma ampla expansão na cobertura geográfica do monitoramento, a capacidade de detectar embarcações não identificadas ou que não estejam transmitindo informações AIS corretamente, o aprimoramento da vigilância de atividades suspeitas e a potencial redução de custos no monitoramento de embarcações.

Essa integração resulta em uma notável ampliação da cobertura geográfica do monitoramento de embarcações, pois os dados SAR podem ser adquiridos independentemente das condições climáticas e de iluminação, enquanto os dados AIS são provenientes de navios distribuídos globalmente. A combinação dos dados também viabiliza a detecção de embarcações que não estejam transmitindo informações AIS ou que o façam de forma inadequada, tornando possível identificar embarcações mesmo quando não há transmissão adequada de dados AIS.

Essa convergência amplia consideravelmente a capacidade de monitorar atividades suspeitas, como pirataria, contrabando e pesca ilegal, permitindo a identificação de padrões comportamentais atípicos das embarcações e, assim, contribuindo para uma vigilância mais eficaz. A associação dos dados SAR e AIS pode resultar em uma redução de custos no monitoramento de embarcações, pois os dados SAR podem ser adquiridos por meio de satélites de observação terrestre e os dados AIS podem ser captados por estações terrestres de baixo custo, otimizando a abordagem geral de monitoramento.

4.5 Uso de dados SAR + AIS pela MB

É de extrema relevância para a Marinha do Brasil, no contexto da vigilância marítima e no combate ao tráfico de drogas, pesca ilegal e outras atividades ilícitas, investir no desenvolvimento e utilização da fusão de dados AIS-SAR. Essa abordagem torna-se crucial para aprimorar o monitoramento do SISGAAZ. Ao unir dados provenientes dos AIS e do SAR, a Marinha pode estabelecer uma visão mais completa e detalhada das atividades marítimas.

Essa integração de dados não apenas fortalece a segurança marítima, mas também desempenha um papel fundamental na proteção da nossa Amazônia Azul, uma área marítima vasta e rica em biodiversidade. Ao facilitar a identificação de atividades suspeitas, como o tráfico de drogas e a pesca ilegal, essa fusão possibilita uma resposta mais rápida e eficaz por parte das autoridades. Contribuindo significativamente para a preservação ambiental e para o combate ao crime, garantindo a segurança das nossas águas e reforçando o compromisso do Brasil com a proteção de seus recursos marinhos e ecossistemas.

5 CONCLUSÃO

No decorrer deste trabalho, foi explorado minuciosamente a complexidade da vigilância marítima no contexto brasileiro, destacando desafios significativos como o combate ao tráfico de drogas, a pesca ilegal e a presença de embarcações que desligam seus sistemas AIS. Nesse cenário desafiador, a Amazônia Azul, com sua vastidão e biodiversidade, emerge como uma área crucial que necessita de uma atenção especial para sua proteção e preservação. Uma das soluções discutidas e aprofundadas neste trabalho foi a fusão de dados provenientes do AIS com imagens SAR para a classificação de alvos em imagens marítimas.

A fusão de dados SAR-AIS pode ser obtida através de diversas fontes e tecnologias, como o GFW e o sistema xView3-SAR. Essas plataformas podem oferecer uma fonte rica e diversificada de informações.

A integração desses dados revelou-se fundamental para a Marinha do Brasil na otimização da vigilância marítima. A fusão de dados AIS-SAR permite um monitoramento mais preciso e em menor tempo das atividades marítimas, possibilitando a identificação de padrões e comportamentos suspeitos.

Na integração dos dados AIS-SAR para vigilância marítima, é fundamental reconhecer as limitações inerentes a esses sistemas, que não apenas delineiam as restrições atuais, mas também apontam áreas para futuras melhorias e pesquisas. A eficácia dos algoritmos de aprendizado de máquina na interpretação de dados SAR é fortemente dependente da disponibilidade de um amplo conjunto de imagens para treinamento. A aquisição e preparação desses dados representam um desafio considerável, exigindo recursos substanciais para assegurar a precisão e confiabilidade dos modelos.

Os sistemas SAR estão sujeitos a limitações temporais devido à sua dependência do tempo de revisita. Isso implica que determinadas áreas podem não ser monitoradas com a frequência desejada, potencialmente resultando em lacunas na vigilância. Atividades marítimas de curta duração ou em áreas com revisitação infrequente podem passar despercebidas, destacando a necessidade de estratégias complementares para mitigar esse desafio.

A obtenção de imagens SAR frequentemente implica a necessidade de estabelecer contratos com empresas especializadas nesta tecnologia. Tais acordos podem acarretar custos significativos, adicionando um componente financeiro às limitações já existentes.

A relevância dessa fusão de dados fica clara quando são consideradas as limitações dos sistemas AIS, especialmente quando algumas embarcações desativam intencionalmente seus transmissores AIS para participar de atividades ilícitas. Ao incorporar informações provenientes de imagens SAR, que são independentes das condições climáticas e

podem operar a qualquer momento, a Marinha do Brasil pode obter uma vantagem crucial na identificação de embarcações não autorizadas ou envolvidas em atividades criminosas. Isso fortalece significativamente a segurança das águas nacionais.

Dessa forma, a integração de dados AIS-SAR também contribui para a preservação do meio ambiente, permitindo uma resposta mais rápida a incidentes de poluição e desastres ambientais, garantindo assim a proteção da Amazônia Azul e sua rica biodiversidade.

5.1 Considerações Finais

A fusão de dados de AIS com imagens SAR não apenas aprimora a eficácia da vigilância marítima, mas também desempenha um papel crucial na defesa da soberania nacional e na proteção dos recursos marinhos brasileiros. Esta pesquisa destaca a importância de investimentos contínuos em tecnologias de sensoriamento remoto para fortalecer as operações de vigilância marítima, consolidando a segurança e a preservação ambiental nas águas nacionais.

Essa fusão emerge como uma ferramenta indispensável para a Marinha do Brasil, proporcionando uma visão holística, promovendo assim a segurança e a sustentabilidade das nossas águas, enquanto fortalece nosso compromisso com a preservação da Amazônia Azul para as gerações futuras.

A Marinha do Brasil poderia empregar algoritmos de aprendizado de máquina, treinados com dados AIS e imagens SAR, para identificar automaticamente padrões e comportamentos anômalos. Distritos Navais que possuam acesso a sistemas de fusão de dados AIS-SAR poderiam monitorar áreas críticas, identificar embarcações não autorizadas e combater atividades ilícitas com maior eficácia.

Os principais beneficiários da fusão de dados AIS-SAR seriam os navios patrulha, os Distritos Navais e as Capitânicas, permitindo uma resposta mais ágil a incidentes marítimos e atividades suspeitas. A implementação de Centros de Controle e Operações Especializados, equipados com tecnologia para analisar e interpretar dados SAR-AIS, seria fundamental para monitorar áreas de alto risco e coordenar respostas em colaboração com os meios navais.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Pesquisas futuras podem focar na validação e avaliação dos métodos propostos em diferentes ambientes marítimos. Cada região apresenta suas peculiaridades, e

investigações em diversas áreas geográficas podem oferecer informações valiosas sobre a adaptação dos algoritmos de classificação em contextos variados.

Há necessidade de se criar um banco de dados de imagens SAR de embarcações para o treinamento dos algoritmos de *machine learning*. Esse banco poderia ser formado pelos mais diversos tipos de embarcações a fim de facilitar a análise dos padrões no momento da aplicação das técnicas de *machine learning*.

Além da fusão de dados AIS e SAR, estudos posteriores podem contemplar a integração de informações oriundas de outras fontes de sensores, como dados de radar convencional, sistemas de vigilância acústica e imagens de satélites ópticos. A análise combinada dessas múltiplas fontes de dados proporciona uma compreensão mais abrangente do cenário marítimo, permitindo uma detecção mais precisa de comportamentos anômalos.

Outra área promissora de pesquisa seria a realização de estudos sobre o impacto socioeconômico da vigilância marítima aprimorada por meio da fusão de dados. Avaliar como a redução das atividades ilegais, como pesca não autorizada ou tráfico de drogas, pode beneficiar as comunidades locais, a economia regional e o meio ambiente é crucial para entender o valor dessas práticas de segurança.

Estabelecer parcerias com entidades governamentais responsáveis pela segurança marítima para conduzir estudos de caso específicos é fundamental. A colaboração estreita com essas organizações pode fornecer dados reais e cenários operacionais genuínos, permitindo a validação e o aprimoramento contínuo dos métodos propostos.

Ao orientar futuras pesquisas para essas áreas, será possível aprofundar o entendimento sobre a fusão de dados AIS-SAR na vigilância marítima, contribuindo significativamente para o aprimoramento das práticas de segurança nas águas territoriais brasileiras e, por conseguinte, para a proteção eficaz de nossos recursos marinhos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, V. M. R. H. **Informação:** instrumento de dominação e de submissão. *Ciência da Informação*, Brasília, v.20, n.1, p. 37-44, jan./jun. 1991.

ACHIRI, L; GUIDA, R; IERVOLINO, P. *SAR and AIS Fusion for Maritime Surveillance*. Surrey Space Centre, University of Surrey, Guildford, UK, 2018.

CARVER, K. R. *SAR Synthetic Aperture RADAR* – Earth Observing System, Vol. IIf, NASA Instrument Panel Report, Washington D.C., 1988.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto**. Universidade Federal do Paraná, 2016. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~centeno/p_sr1/pdf/aula07.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.

CLOUDE, S. R. **Polarização:** Aplicações em Sensoriamento Remoto. Nova York: Oxford University Press, 2009.

CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. *Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing*, Nova York: Wiley Interscience Publication, 1991.

DEFENSE INNOVATION UNIT. **XView3:** Dark Vessels. Disponível em: <<https://iuu.xview.us/>>. Acesso em: 10 set. 2023.

DI MARTINO, G. *Maritime Surveillance with Synthetic Aperture Radar*. Nova York: SciTech Publishing, 2021.

EMBRAPA TERRITORIAL. **Satélites de Monitoramento**. Campinas, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento>>. Acesso em: 2 out. 2023.

FRANCESCHETTI, G.; LANARI, R. **Processamento de Radar de Abertura Sintética**. Nova York: CRC Press, 1999. ISBN: 0849378990. ISBN-13: 9780849378997.

FREEMAN, A.; DURDEN, S. L. *A three-component scattering model for polarimetric SAR data*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 963–973, 1998.

GLOBAL FISHING WATCH. **Revolutionizing Ocean Monitoring and Analysis.**

Disponível em: <<https://globalfishingwatch.org/>>. Acesso em: 15 set. 2023

HENDERSON, F.; LEWIS, A. **Manual de Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações do Radar de Imagens.** Nova York: Wiley, 1998.

IMO. **Resolution A.917(22): Guidelines for the onboard operational use of a Shipborne Automatic Identification Systems (AIS).** Organização Marítima Internacional, 2001.

ITU. **Características Técnicas para um Sistema de Identificação Automática Utilizando Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo na Faixa de Frequência Móvel Marítima VHF.**

Disponível em: <http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-5-201402-I!!PDF-E.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2023.

KOO, V. C. et al. **A New Unmanned Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar for Environmental Monitoring.** *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 122, 245-268, 2012.

LAMPERT, J.; COSTA, E. **Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul – A importância estratégica e o aprimoramento.** *Revista Marítima Brasileira*, 2023. Disponível em:

<<https://portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/revistamaritima/article/view/4068>>.

Acesso em: 15 ago. 2023.

LI, X.; GUO, H.; CHEN, K.-S. e YANG, X, **Advances in SAR Remote Sensing of Oceans.** CRC Press, 2018.

MARINHA DO BRASIL. **Amazonia Azul.** Disponível em:

<<https://www.marinha.mil.br/secirm/amazoniaazul>>. Acesso em: 07 set. 2023.

MARTINO, Andrea de. **Introduction to Modern EW Systems.** 2a ed. Norwood: Artech House, 2018.

MCNAIRM, H.; JIAO X. *SAR for Mapping Soils and Crops. NASA's Applied Remote Sensing Training Program*, 2018. Disponível em: <<https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/session3-final.pdf>>. Acesso em 15 jun. 2023.

MILIÃO, I. **O Impacto e Relevância do Transporte Marítimo no Comércio Exterior**. Disponível em: <<https://www.conexos.com.br/transporte-maritimo-comercio-exterior/>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

MOREIRA, A. et al. *A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. Microwaves and Radar Institute of the German Aerospace Center (DLR), Alemanha*, 2013.

OLIVEIRA, E. **Duas pesquisas apontam mancha em imagem de satélite; Marinha, Ibama e Petrobras negam relação com óleo do Nordeste**. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/natureza/desastre-ambiental-petroleo-praias/noticia/2019/10/30/duas-pesquisas-apontam-mancha-em-imagem-de-satelite-marinha-descarta-relacao-com-oleo-do-nordeste.ghtml>>. Acesso em 10 jun. 2023.

PAOLO, F. S. et al. *Global Fishing Watch*. Cambrio, *Defense Innovation Unit*, UC Berkeley, 2022.

PARK, J. et al. *Illuminating dark fishing fleets in North Korea. Science Advances*, v. 6, n. 30, 2020.

PERLINGEIRO, R. **O que é Amazônia Azul?** Disponível em: <<https://escotismoazul.org/2022/o-que-e-amazonia-azul/>>. Acesso em: 15 ago. 2023.

PETTERSON, E. H.; ZEE, R. E.; FOTOPOULOS, G. *Maritime surveillance with synthetic aperture radar (SAR) and automatic identification system (AIS) onboard a microsatellite constellation. Proceedings of Image and Signal Processing for Remote Sensing XVIII*, 2012.

PIEDADE, J. **Segurança marítima e os estudos de segurança: revisão da literatura**. *Relações Internacionais*, Lisboa, n. 57, p. 11-24, mar. 2018. Disponível em:

<http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S164591992018000100002&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 07 mar. 2023.

SKOLNIK, M. I. **Radar Handbook**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

SOMEDA, C. G. **Electromagnetic Waves**. Boca Raton: CRC Press, 2ª edição, 2006.

Tribunal de Contas Europeu. **Relatório Especial, 2022**. Disponível em: <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/illegal-fishing-20-2022/pt/>. Acesso em: 15 ago. 2023.

ROSEN, P. et al. **Synthetic Aperture Radar Interferometry**. Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 3, 2000.

ROSTIROLLA, E. et tal. **Descrição Detalhada de um Projeto De Radar De Abertura Sintética**. Universidade Federal De Santa Maria, 2019. Disponível em: <<https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/428/2019/12/DESCRIC%CC%A7A%CC%83O-DETALHADA-DE-UM-PROJETO-DE-RADAR-DE-ABERTURA-SINTE%CC%81TICA.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2023.

SILVA, F. G.; PALM, B. G.; MACHADO, R. **Classificação de Alvos em Imagens SAR com Técnicas de Machine Learning**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil, 2021.

SMITH, J. **Radar Principles and Types**. *RadarTech*, 2021. Disponível em: <www.radartech.com/radar-principles-and-types.pdf>. Acesso em: 10 ago.2023.

TACONET, M.; KROODSMA, D.; FERNANDES, J. A. **Global atlas of AIS-based fishing activity: Challenges and opportunities**. Relatório técnico. FAO, 2019.

UNIÃO EUROPEIA. **Relatório Especial: Ação da UE para combater a pesca ilegal**. Disponível em: <https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR22_20/SR_Illegal_fishing_PT.pdf>. Acesso em: 02 set. 2023.

UNODC. *Brazil in the regional and transatlantic cocaine supply chain: The impact of COVID-19*. Disponível em: <https://www.unodc.org/documents/data-and-analysis/cocaine/Cocaine_Insights4_2022.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2023.

VESPE, Michele; GREIDANUS, Harm. *SAR Image Quality Assessment and Indicators for Vessel and Oil Spill Detection*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 50, p. 4726–4734, 2012.

VOINOV, S.; SCHWARZ, E.; KRAUSE, D.; BERG, M. **Identificação de alvos detectados por SAR no mar em aplicações em tempo real para vigilância marítima**. Anais da Conferência de Software Livre e de Código Aberto para Geoprocessamento (FOSS4G), Vol. 16, Artigo 1, 2016.

ZHAO Z., et al. *Ship Surveillance by Integration of Space-borne SAR and AIS*. *The Journal of Navigation*, 67, 295–309, 2014)