



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA
CURSO OCEANOGRAFIA

Rafael Silva Bitencourt

**Identificação de Ondas Internas a Partir de Imagens de SAR Na Bacia de
Campos**

Florianópolis
2025

Rafael Silva Bittencourt

**Identificação de Ondas Internas a Partir de Imagens de SAR (Synthetic
Aperture Radar) na Bacia de Campos**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Oceanografia do Campus Trindade da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Antonio Fernando Härter Fetter Filho, Dr.

Coorientador: Prof. Fabrício Sanguinetti Cruz de Oliveira, Dr.

Florianópolis

2025

Bittencourt, Rafael Silva

Identificação de Ondas Internas a Partir de Imagens de SAR (Synthetic Aperture Radar) na Bacia de Campos / Rafael Silva Bittencourt ; orientadora, Antonio Fernando Härter Fetter Filho, coorientador, Fabrício Sanguinetti Cruz de Oliveira, 2025.

42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

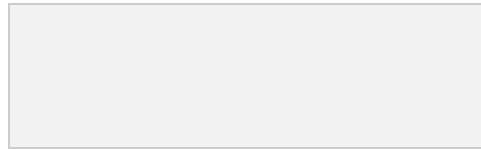
1. Oceanografia. 2. Oceanografia Física. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Ondas Internas. 5. Radar de abertura sintética. I. Fetter Filho, Antonio Fernando Härter. II. Oliveira, Fabrício Sanguinetti Cruz de . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Oceanografia. IV. Título.

Rafael Silva Bittencourt

Identificação de Ondas Internas a Partir de Imagens de SAR (Synthetic Aperture Radar) na Bacia de Campos

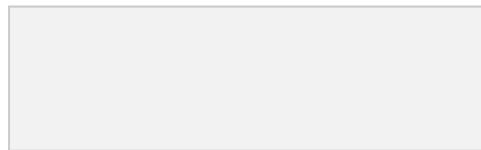
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia e aprovado em sua forma final pelo Curso de Oceanografia.

Local Florianópolis, 14 de novembro de 2025.

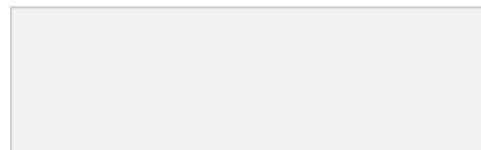


Coordenação do Curso

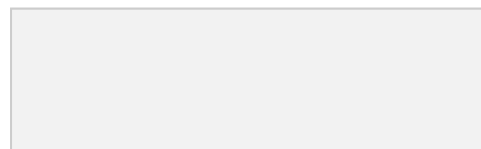
Banca examinadora



Prof. Antonio Fernando Härter Fetter Filho, Dr.
Orientador(a)



Prof. Felipe Mendonça Pimenta, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Pedro de Souza Pereira, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2025.

Dedico este trabalho a Rogério, Patrícia e Alice.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de contribuir para a ciência, ao meu professor orientador, Antonio Fetter por acreditar em mim e oferecer tudo que precisei para aprender, e ao meu professor co-orientador, Fabrício Oliveira, por me transmitir seu conhecimento de imagens de satélite.

Agradeço também aos meus pais, Rogério e Patrícia, por sempre me apoiarem e influenciarem a buscar conhecimento, a minha namorada, Alice, por ficar ao meu lado durante todo o período da graduação.

“Por natureza, todos os seres humanos inclinam-se ao saber.”
(Aristóteles, *Metafísica*, século IV a.C., p. 19)

RESUMO

As ondas internas são fenômenos oceânicos que ocorrem entre camadas de fluidos de diferentes densidades. Estas ondas possuem um papel importante no transporte de energia e na mistura vertical, oferecendo riscos para estruturas submarinas como plataformas, dutos e tubulações. Este trabalho teve como objetivo a identificação e caracterização das ondas internas na região da Bacia de Campos por imagens de radar de abertura sintética (SAR) do Sentinel-1A entre 2020 e 2024, através de método visual utilizando o software ESA Snap para pré-processamento das imagens seguindo a metodologia de pré-processamento de Filipponi, 2019. Posterior a identificação, foi feita a medição do comprimento de onda e distância entre pacotes de ondas, e calculado o número de onda e velocidade de propagação. Os resultados indicaram maior ocorrência de ondas no verão e no outono, associado a maior estratificação da coluna d'água. Foram observados comprimentos de onda em torno de 540 m e velocidades médias de propagação de $0,34 \text{ m.s}^{-1}$. O estudo confirma parcialmente o trabalho de Lorenzetti & Dias (2013), que evidencia a sazonalidade do fenômeno na plataforma continental sudeste brasileira. Conclui-se que o sensoriamento remoto é um método útil para estudo das ondas internas, oferecendo boas aplicações para estudos oceanográficos e na indústria de óleo e gás na Bacia de Campos.

Palavras-chave: ondas internas; radar de abertura sintética; Bacia de Campos.

ABSTRACT

Internal waves are oceanic phenomena that occur between layers of fluids with different densities. These waves play an important role in energy transport and vertical mixing, and they pose risks to underwater structures such as platforms, pipelines, and conduits. This study aimed to identify and characterize internal waves in the Campos Basin region using Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar (SAR) images from 2020 to 2024, through a visual method employing the ESA SNAP software for image pre-processing, following the pre-processing methodology of Filipponi (2019). After identification, the wavelength and distance between wave packets were measured, and the wavenumber and propagation speed were calculated. The results indicated a higher occurrence of waves during summer and autumn, associated with increased water column stratification. Observed wavelengths were around 540 m, with average propagation speeds of $0.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The study partially confirms the work of Lorenzetti & Dias (2013), which highlights the seasonality of the phenomenon in the Brazilian southeast continental shelf. It is concluded that remote sensing is a useful method for studying internal waves, offering valuable applications for oceanographic research and for the oil and gas industry in the Campos Basin.

Keywords: internal waves; synthetic aperture radar; Campos basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático de uma onda interna se propagando entre a interface de dois fluidos, um com menor densidade e outro com maior densidade..	16
Figura 2 - Espectro de radiação eletromagnética mostrando em que faixa atuam as bandas X, C, L e P dos SARs.....	19
Figura 3 - Diagrama exemplificando diferentes polarização do SAR: Vertical (V) e Horizontal (H). Co-polarização possui a mesma polarização de emissão e recepção (HH ou VV), a cross-polarização possui polarização de emissão e de recepção diferentes (HV, VH).....	20
Figura 4 – Diagrama das etapas de pré-processamento das imagens SAR adaptadas de Filipponi, 2019.....	22
Figura 5 – Exemplo de imagem de Radar de Abertura Sintética (SAR) do satélite Sentinel-1, processada no software ESA Snap, com anotação dos parâmetros: comprimento de onda e distância entre pacotes.....	24
Figura 6 - Exemplo de imagem de Radar de Abertura Sintética (SAR) do satélite Sentinel-1, processada no software ESA Snap mostrando como as condições de vento podem influenciar na identificação das ondas internas.....	25
Figura 7 – Localização da área de estudo na Bacia de Campos. O polígono vermelho delimita a área de análise sobre (esquerda) o mapa de referência e (direita) a batimetria da região (isóbatas em metros).....	27
2.3 OBTENÇÃO DE IMAGENS SAR.....	28
Figura 8 – Diagrama das etapas metodológicas do estudo. O diagrama ilustra a sequência de procedimentos adotados neste trabalho.....	29
2.4 RESULTADOS.....	29
Figura 9 – Distribuição mensal da quantidade de pacotes de ondas registrados entre 2020 e 2024. Cada barra representa um mês e cada cor representa o ano específico.....	30
Figura 10 – Variação mensal da quantidade média de ondas por pacote entre 2020 e 2024. Cada barra representa um mês e cada cor representa o ano específico.....	30
Figura 11 – Média mensal do comprimento de onda entre 2020 e 2024. Cada barra representa um mês e cada cor representa o ano específico.....	31

Figura 12 – Distribuição de pacotes de onda por estação (Ver: Verão; Out: Outono; Inv: Inverno; Pri: Primavera) entre 2020 e 2024.....	32
Figura 13 – Quantidade média de ondas por pacote, por estação do ano (Ver, Out, Inv, Pri), entre 2020 e 2024.....	32
Figura 14 – Comprimento médio das ondas (m) por estação do ano (Ver, Out, Inv, Pri) entre 2020 e 2024.....	33
Figura 15 – Velocidade de propagação (m/s) estimada para pacotes de onda (2020-2024). O cálculo considera apenas meses com múltiplos pacotes da mesma direção.....	34
Figura 16 – Distribuição sazonal do número total de pacotes de onda identificados no período de 2020 a 2024 na Bacia de Campos.....	35
Figura 17 – Composição sazonal percentual dos pacotes de onda por ano (2020-2024). Cada barra representa 100% dos eventos daquele ano.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo estatístico das ondas encontradas.....	33
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAR - Synthetic Aperture Radar

GMAP - Filtro de *Speckle* Gamma Map

ES - Espírito Santo

RJ - Rio de Janeiro

SUMÁRIO

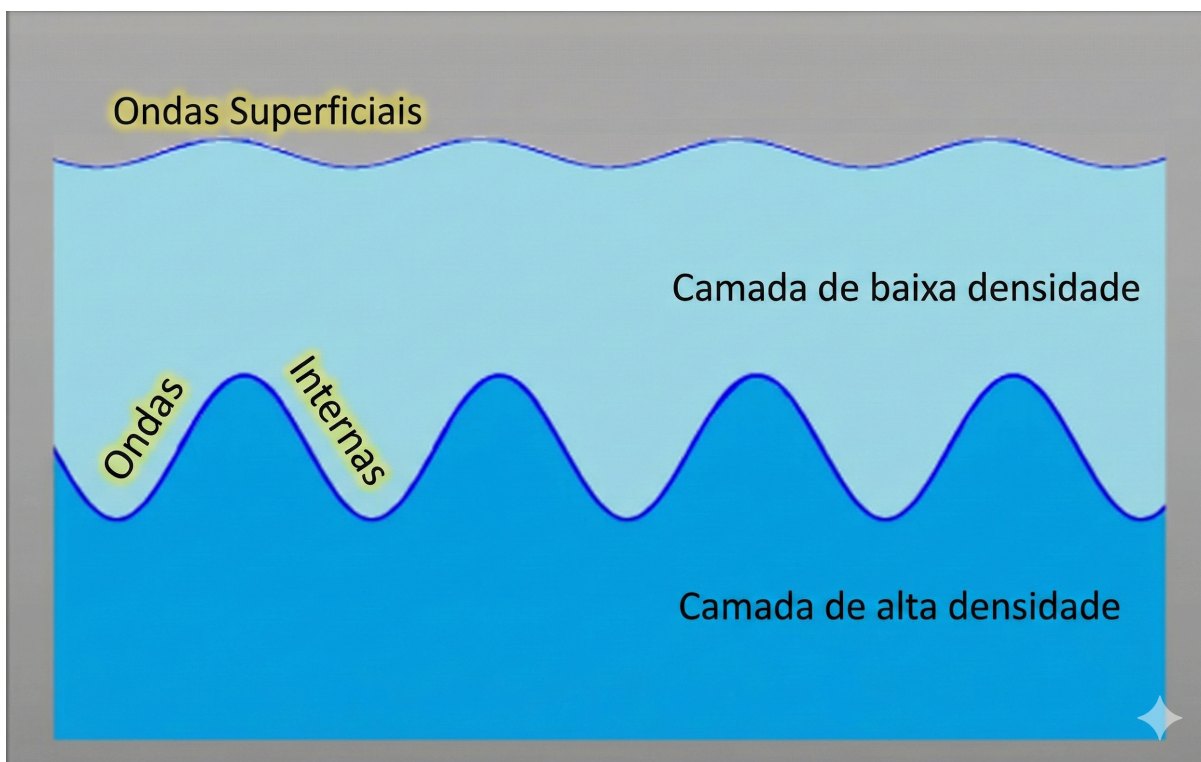
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2 DESENVOLVIMENTO	18
2.1 METODOLOGIA	18
2.1.1 Radar de abertura sintética (SAR)	18
2.1.2 Ondas internas e suas assinaturas nas imagens de SAR	21
2.1.3 Pré-processamento de imagens SAR	22
2.1.4 Identificação e caracterização de ondas internas	23
2.2 ÁREA DE ESTUDO	26
2.3 OBTENÇÃO DE IMAGENS SAR	28
2.4 RESULTADOS	29
2.5 DISCUSSÃO	36
3 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

As ondas internas são fenômenos fundamentais para se entender a dinâmica oceânica. Na Bacia de Campos, onde há grande atividade de exploração *offshore*, a compreensão desse fenômeno é essencial.

As ondas internas são movimentos que ocorrem entre interfaces de densidades diferentes em meios estavelmente estratificados (Buijsman et al., 2019). Seu movimento se comporta como um movimento oscilatório harmônico simples, quando uma parcela de fluido é deslocada de sua camada de origem para outra de maior ou menor densidade, neste caso, uma força restauradora age sobre ela até que ela volte para a sua camada de densidade original (Buijsman et al., 2019) (Figura 1).

FIGURA 1 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA ONDA INTERNA SE PROPAGANDO ENTRE A INTERFACE DE DOIS FLUIDOS, UM COM MENOR DENSIDADE E OUTRO COM MAIOR DENSIDADE.



Fonte: Moss Landing Marine Labs, 2025

Essas ondas podem alcançar centenas de metros de amplitude (Huang et al., 2016). Além do risco potencial que representam para a navegação submarina (Bao et al., 2020), também influenciam a profundidade da camada de transição,

modificando o campo sonoro e comprometendo a comunicação submarina devido à grande quantidade de energia que transportam (Bao et al., 2020).

As ondas internas influenciam na circulação e mistura dos oceanos, pois promovem a redistribuição de nutrientes (Barintag et al., 2023), elevam o fitoplâncton e o zooplâncton em direção à camada de mistura, intensificam a fotossíntese e contribuem para a ressuspensão de sedimentos, causando correntes de turbidez (Lorenzzetti; Dias, 2013). Em razão do elevado transporte de energia, também representam riscos para a engenharia marinha, como plataformas, dutos e tubulações (Borges; De Lima; Kowsmann, 2015). Desta forma, a identificação das áreas costeiras onde estas ondas normalmente são geradas é de extrema utilidade para a indústria de óleo e gás.

Apesar da importância de entender estas ondas, sua observação não é tão fácil de maneiras convencionais, por se propagarem abaixo da superfície. Por isso o sensoriamento remoto tem se mostrado uma boa ferramenta para a detecção de ondas internas. Os métodos de sensoriamento remoto utilizados nessa identificação de ondas é através de imagens de radar de abertura sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*) e sensores remotos ópticos. Os SARs possuem vantagens sobre os satélites ópticos, pois obtêm imagens em alta resolução independentemente das condições meteorológicas, uma vez que a radiação de microondas emitida e recebida por eles não é absorvida pelas nuvens. Já os satélites ópticos são suscetíveis às condições atmosféricas, dependendo fortemente da cobertura de nuvens para obter imagens da superfície do oceano (Barintag et al., 2023).

No contexto brasileiro, a geração de ondas internas no talude continental é um fenômeno reconhecido, como observado por Lorenzzetti; Dias, 2013. Estudos utilizando sensoriamento remoto para caracterizar essas ondas no Atlântico Sul, embora crescentes, ainda são pontuais. Por exemplo, Silva et al. (2015) utilizaram SAR para investigar pacotes de ondas internas gerados no talude continental da Foz do Amazonas, descrevendo suas características e sazonalidade. Na Bacia de Campos, a suscetibilidade a movimentos de massa submarinos e seus riscos para as operações de exploração de petróleo têm sido avaliados a partir de dados geotécnicos *in situ* e modelagem matemática (Borges; De Lima; Kowsmann, 2015). No entanto, a aplicação sistemática de imagens SAR para mapear a ocorrência, distribuição e características de propagação dessas ondas na região permanece uma área com menor densidade de estudos.

A Bacia de Campos é uma área de muita relevância para o Brasil, e não se encontram muitos estudos sobre ondas internas nesta região utilizando métodos de sensoriamento remoto. Este trabalho busca colaborar com o conhecimento de ondas internas e sensoriamento remoto na região de estudo da Bacia de Campos através da identificação destas ondas por método visual a partir de imagens de SAR, e obter características das ondas internas, como número de ondas, quantidade de pacotes de onda, quantidade de ondas por pacote, comprimento de onda e velocidade de propagação.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal identificar e caracterizar a ocorrência de ondas internas na Bacia de Campos através de imagens SAR.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar as características das ondas internas observadas em termos de comprimento de onda, número de onda, e velocidade de propagação;
- Avaliar a hipótese de maior ocorrência destas ondas durante o período de verão, como previamente sugerido por Lorenzetti & Dias (2013), em seu estudo sobre ondas internas na plataforma continental sudeste do Brasil.

2 DESENVOLVIMENTO

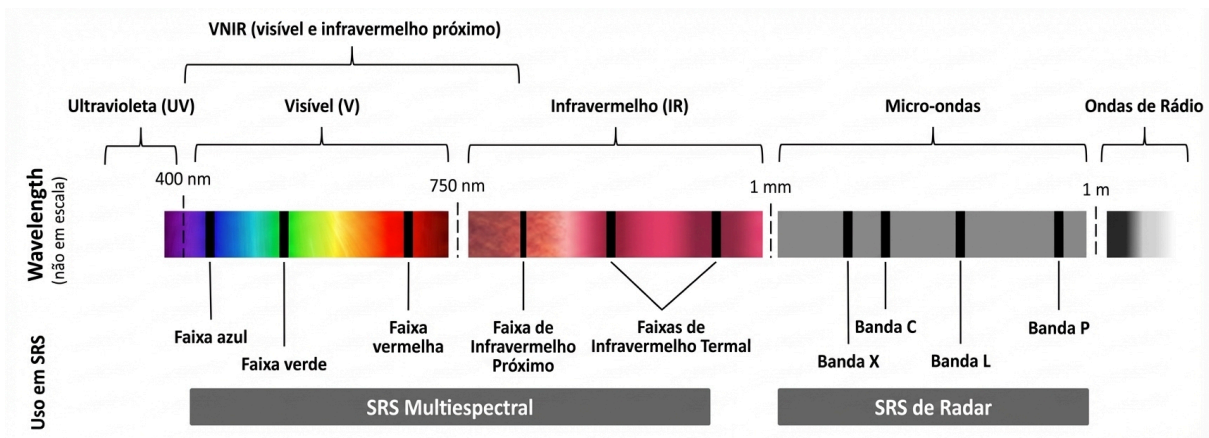
2.1 METODOLOGIA

2.1.1 Radar de abertura sintética (SAR)

Os SARs operam na faixa das microondas, emitindo radiação eletromagnética e registrando o sinal retroespalhado pela superfície de interesse que efetivamente retorna à antena, o qual é processado para medir o tempo de retorno e a intensidade da energia retroespalhada em duas dimensões (Asiyabi et al., 2023). Essas medições são sensíveis a variações de rugosidade da superfície e apresentam a vantagem de não dependerem das condições atmosféricas, diferentemente dos

sensores ópticos, que são limitados pela cobertura de nuvens. As diferentes bandas de operação, com comprimento de onda variando de alguns centímetros a dezenas de centímetros, determinam sua aplicação, sendo as bandas L, C, S e X, as mais utilizadas em estudos oceanográficos, presentes na faixa de microondas (Figura 2). (Moreira et al., 2013).

FIGURA 2 - ESPECTRO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA MOSTRANDO EM QUE FAIXA ATUAM AS BANDAS X, C, L E P DOS SARs.



Fonte: Pettorelli, 2018

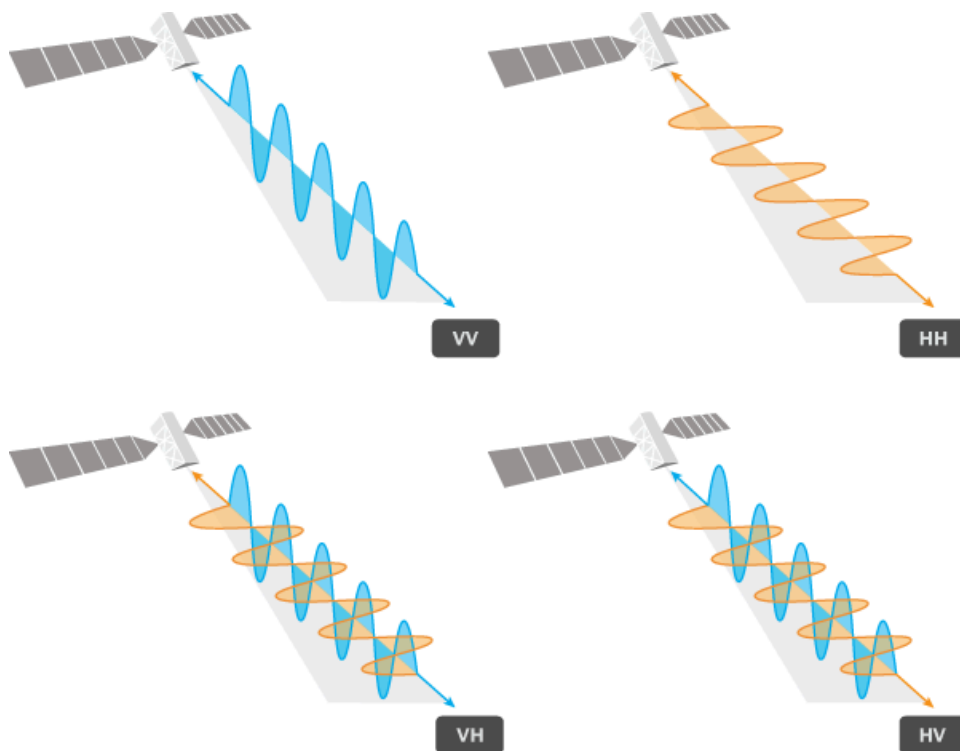
O termo "abertura sintética" é o que diferencia o SAR de radares de abertura real (RAR) e é a chave para sua alta resolução espacial. O SAR utiliza o movimento da própria plataforma (satélite ou aeronave) para coletar múltiplos sinais de um mesmo alvo em posições diferentes. Ao registrar a fase e a amplitude de cada eco, o processamento em terra consegue "sintetizar" os sinais recebidos como se tivessem vindo de uma antena virtual extremamente longa (Moreira et al., 2013).

A polarimetria de SAR é uma técnica utilizada para medir a polarização das ondas eletromagnéticas, provenientes de dispersores naturais e artificiais, com o objetivo de adquirir informações adicionais sobre diferentes superfícies, como: neve, gelo, oceanos, áreas urbanas e outras (Moreira et al., 2013). A polarização diz respeito à orientação do vetor campo elétrico de uma onda eletromagnética, usualmente decomposto nas polarizações horizontal (H) e vertical (V). Podemos obter o conceito básico da polarimetria a partir da matriz de espalhamento complexa 2×2 (1), que descreve a transformação do vetor da onda eletromagnética transmitida (\vec{E}^t) pelo SAR no vetor da onda recebida (\vec{E}^r), realizada pelo dispersor.

$$\begin{bmatrix} E_H^r \\ E_V^r \end{bmatrix} = \frac{\exp(-ikr)}{r} \cdot \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^t \\ E_V^t \end{bmatrix}^* \quad (1)$$

Os elementos da matriz são as quatro amplitudes de espalhamento complexas $S_{ij} = |S_{ij}| \exp[i\varphi_{ij}]$, onde os índices i e j correspondem a polarização vertical (V) ou horizontal (H), k é o número de onda no termo $\exp(-ikr)/r$, que expressa a mudança de fase e atenuação para uma onda esférica de raio igual à distância entre o dispersor e o radar (Moreira et al., 2013). As ondas internas podem ser vistas em imagens SAR co-polarizadas (VV e HH) (Figura 3) (Lavrova; Mityagina, 2017).

FIGURA 3 - DIAGRAMA EXEMPLIFICANDO DIFERENTES POLARIZAÇÃO DO SAR: VERTICAL (V) E HORIZONTAL (H). CO-POLARIZAÇÃO POSSUI A MESMA POLARIZAÇÃO DE EMISSÃO E RECEPÇÃO (HH OU VV), A CROSS-POLARIZAÇÃO POSSUI POLARIZAÇÃO DE EMISSÃO E DE RECEPÇÃO DIFERENTES (HV, VH).



Fonte: ESRI, 2025

Com base na matriz de espalhamento S , os sistemas SAR podem operar em diferentes modos. Sistemas *quad-pol* são os mais completos: eles transmitem pulsos alternados em H e V e recebem em ambas as polarizações, capturando os quatro elementos da matriz $(S_{HH}, S_{HV}, S_{VV}, S_{VH})$ (Moreira et al., 2013). São comuns os sistemas *dual-pol* (dupla polarização), que transmitem em uma polarização e recebem em duas (e.g., HH e HV). As polarizações cruzadas (HV ou VH) são tipicamente sensíveis ao espalhamento de volume (e.g., vegetação), enquanto as co-polarizadas (HH ou VV) são mais sensíveis ao espalhamento de superfície (e.g., rugosidade da água) (Moreira et al., 2013).

Outras aplicações oceanográficas cruciais incluem a detecção de poluição por óleo (manchas de óleo amortecem as ondas curtas, aparecendo como áreas escuras), o monitoramento e classificação de gelo marinho (diferenciando tipos de gelo com base em suas assinaturas) e a detecção de embarcações (Moreira et al., 2013).

2.1.2 Ondas internas e suas assinaturas nas imagens de SAR

As ondas internas são movimentos que ocorrem no oceano quando a coluna d'água está estavelmente estratificada pela densidade (Bao et al., 2020), propagando-se horizontalmente ao longo das isopicnais e verticalmente ao longo do gradiente de pressão, com flutuações verticais significativas (Bueno; Bleninger, 2018). As ondas internas influenciam o escoamento superficial do oceano, gerando variações na rugosidade que alteram a intensidade do retroespalhamento do SAR e produzem padrões de listras claras e escuras nas imagens SAR, permitindo sua identificação (Barintag et al., 2023). Como o SAR enxerga apenas a superfície do oceano, áreas de maior rugosidade apresentam maior retroespalhamento, aparecendo mais claras na imagem, enquanto menores rugosidades aparecem mais escuras na imagem, e conseqüentemente menor retroespalhamento, gerando o contraste característico das imagens (Rodenas; Garello, 1998).

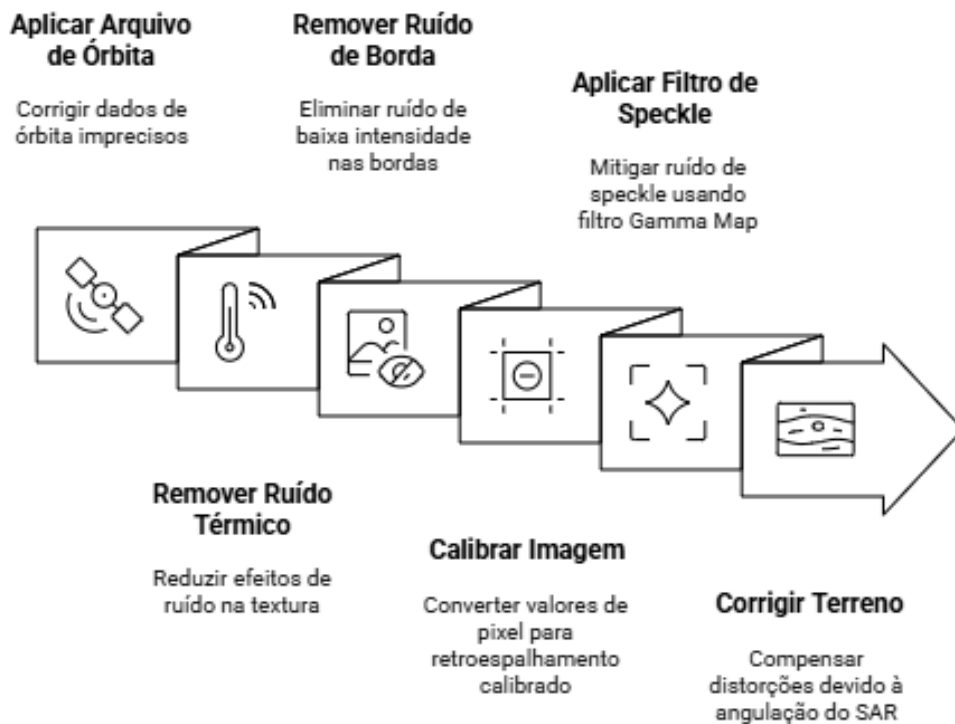
As ondas internas se propagam em trens de onda, cuja a primeira onda é normalmente maior, mais rápida e de maior comprimento (Lavrova; Mityagina, 2017). Pacotes de ondas menores correspondem a ondas recém geradas e possuem menos ondas, enquanto pacotes maiores, gerados há mais tempo, possuem mais

ondas que vão sendo geradas ao longo da propagação devido à oscilação da picnoclina (Jackson et al., 2013).

2.1.3 Pré-processamento de imagens SAR

As imagens provenientes de SAR devem ser pré-processadas antes das análises, devido a grande quantidade de ruídos que aparecem nas imagens e dos efeitos gerados pela angulação do satélite, por isso uma rotina de pré-processamento é essencial. Neste trabalho foi utilizada a rotina descrita por (Filipponi, 2019). O diagrama (Figura 4) ilustra esta sequência de etapas de pré-processamento, que inclui a aplicação dos arquivos de órbita, remoção de ruídos (térmico e de borda), calibração radiométrica, aplicação de filtro de *speckle* e correção de terreno.

FIGURA 4 – DIAGRAMA DAS ETAPAS DE PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS SAR ADAPTADAS DE FILIPPONI, 2019.



Fonte: Adaptado de Filipponi, 2019

O primeiro passo no pré-processamento das imagens de SAR é aplicar o arquivo de órbita, isso é feito pois normalmente os dados de órbita dos produtos do SAR não são precisos, por isso é necessário fazer o download do arquivo de órbita e aplicá-lo no produto SAR. O segundo passo é remover o ruído térmico, essa remoção reduz os efeitos de ruído na textura inter-sub-faixa. O terceiro passo é remover o ruído de borda, que trata de uma remoção de ruído de intensidade baixa e dados inválidos nas bordas da imagem. O quarto passo é a calibração que converte o valor digital do pixel para retroespalhamento radiométricamente calibrado (Filipponi, 2019).

As imagens de SAR sofrem um efeito chamado *Speckle*, esse efeito é causado por muitos espalhadores elementares com uma distribuição aleatória dentro de uma célula de resolução, deixando a imagem com *Speckle noise* ou ruído. Para mitigar este efeito o filtro de *Speckle* é utilizado. Existem diversos filtros diferentes de *Speckle*, o filtro que se mostrou melhor para uma análise qualitativa para uma interpretação visual para reduzir o ruído de *Speckle* foi o Gamma Map, segundo estudo de Huang; Genderen, 1996 onde foram comparados diferentes tipos de filtros. O filtro Gamma Map (GMAP) é derivado a partir da assunção de que a imagem possui uma distribuição Gamma, que é considerado como o caso mais realista (Huang; Genderen, 1996).

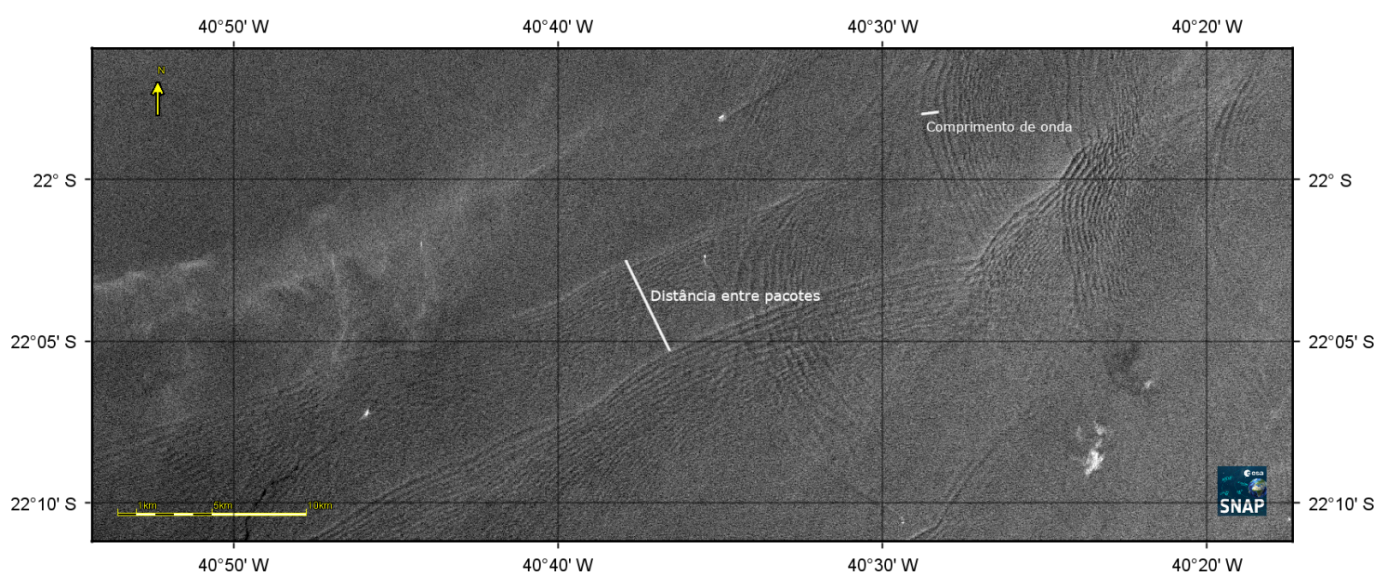
Por último, uma correção de terreno é aplicada na imagem, devido a angulação do SAR e variações no terreno, as distâncias na imagem podem ser distorcidas, logo a correção de terreno é aplicada para compensar estas distorções (Filipponi, 2019).

2.1.4 Identificação e caracterização de ondas internas

A identificação das ondas internas utilizou um critério visual buscando os padrões característicos que as ondas geram nas imagens SAR, conforme descrito na Seção 2.1.3, através do uso do *software* ESA Snap para processar e analisar cada imagem SAR adquirida. A Figura 5 exemplifica as feições de ondas internas analisadas nas imagens do Sentinel-1, as anotações na imagem definem o parâmetro de comprimento de onda, que é a distância entre duas cavas individuais, e a distância entre pacotes, que é o espaço entre dois pacotes de ondas que se propagam da mesma direção. As condições de vento podem atrapalhar a

identificação de ondas internas, ventos acima de 10 ms^{-1} fazem com que o padrão de rugosidade das ondas internas e o padrão de rugosidade do vento não sejam mais distinguíveis um do outro (Jackson et al., 2013).

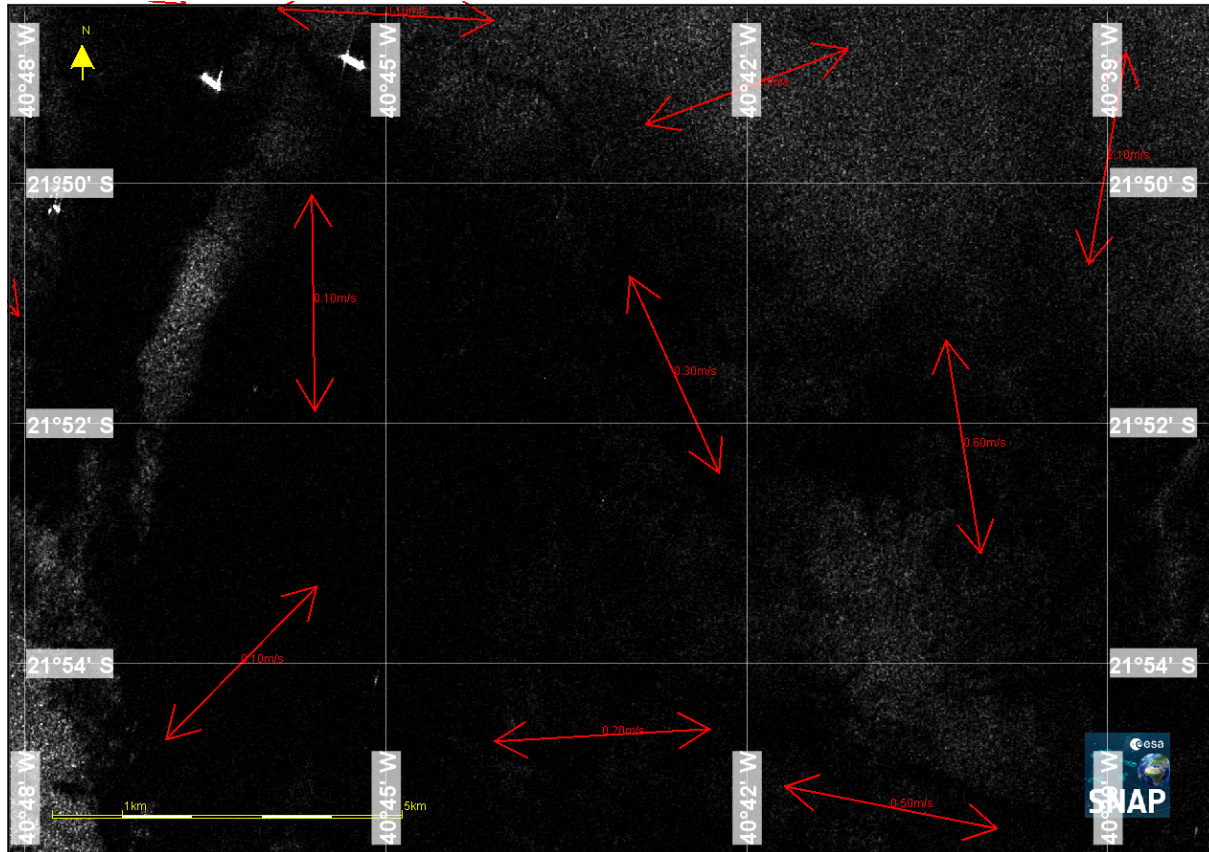
FIGURA 5 – EXEMPLO DE IMAGEM DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR) DO SATÉLITE SENTINEL-1, PROCESSADA NO SOFTWARE ESA SNAP, COM ANOTAÇÃO DOS PARÂMETROS: COMPRIMENTO DE ONDA E DISTÂNCIA ENTRE PACOTES.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 6 mostra uma imagem SAR depois do processamento, que possui uma condição de vento que impede a identificação de ondas internas. Quando o vento possui velocidades muito baixas, a imagem SAR pode ter características como manchas escuras (Topouzelis, 2008), que fazem com que não seja possível a identificação de ondas internas. A Figura 6 foi produzida com o uso de uma ferramenta do *software* ESA Snap chamada *Wind field estimation*, que calcula a partir da imagem SAR o campo e a velocidade de vento, usando o modelo desenvolvido por Hersbach et al., 2007, as direções do vento são representadas pelas setas vermelhas e as velocidades estão escritas em vermelho ao lado das setas. Podemos ver que nas manchas mais escuras é comum encontrarmos velocidades de $0,10 - 0,60 \text{ ms}^{-1}$, em contraste, em regiões mais claras da imagem a velocidade do vento chega até $2,10 \text{ ms}^{-1}$.

FIGURA 6 - EXEMPLO DE IMAGEM DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR) DO SATÉLITE SENTINEL-1, PROCESSADA NO SOFTWARE ESA SNAP MOSTRANDO COMO AS CONDIÇÕES DE VENTO PODEM INFLUENCIAR NA IDENTIFICAÇÃO DAS ONDAS INTERNAS.



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a identificação de uma onda, foi verificado se ela se propaga junto a outras ondas, formando um pacote de ondas, que serão contabilizados mensalmente e integrados sazonalmente. O verão foi representado pelos meses de janeiro, fevereiro e dezembro, o outono foi representado pelos meses de março, abril e maio, o inverno pelos meses de junho, julho e agosto, e a primavera pelos meses de setembro, outubro e novembro.

O ESA Snap oferece uma ferramenta para medir a distância entre dois *pixels*, que será utilizada para medir o comprimento de onda (λ), e posteriormente calcular o número de onda (k) utilizando a Equação (2):

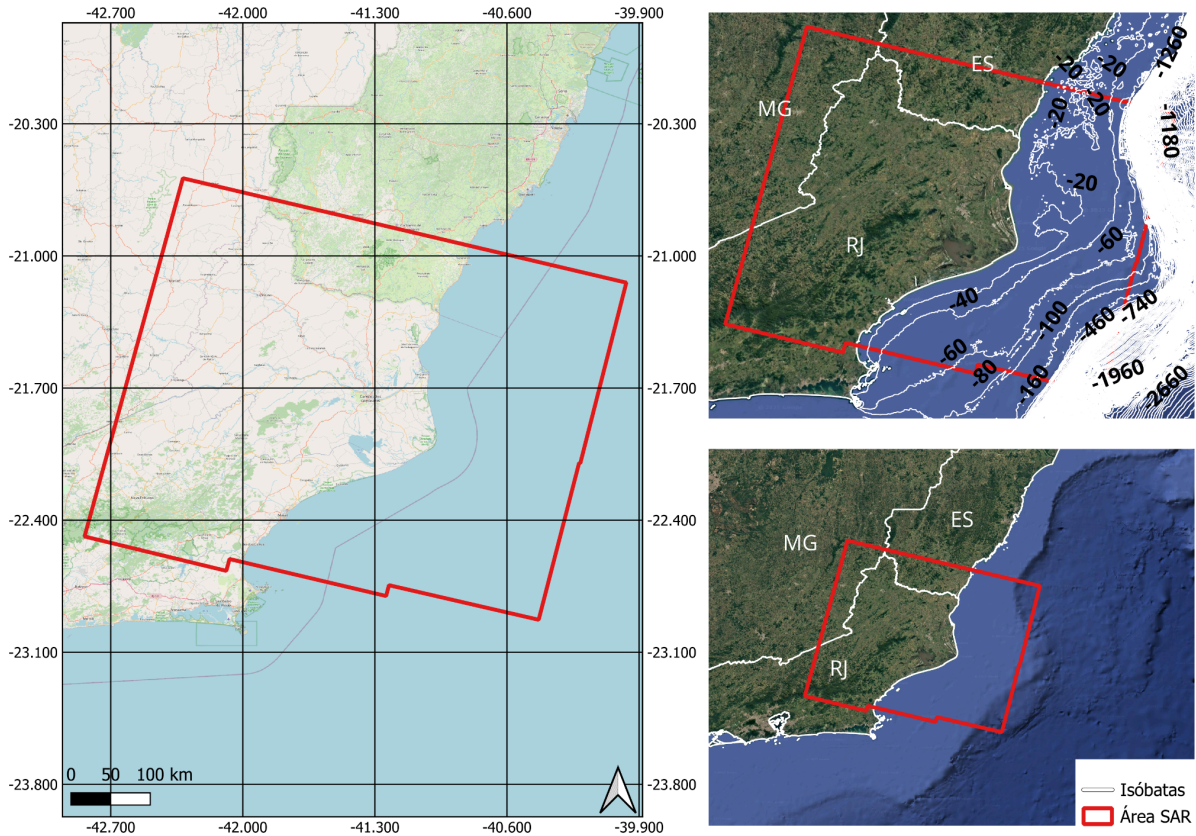
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

Uma forma de estimar a velocidade de propagação de uma onda interna a partir das imagens SAR é dividir a distância entre dois pacotes de onda que compartilham o mesmo ponto de geração pelo período da maré diurna ou semidiurna, dependendo da região estudada, uma vez que a forma mais comum de geração destas ondas é a interação da onda de maré com a batimetria (Jackson et al., 2013). Desta forma, podemos extrair a partir de uma imagem SAR, alguns parâmetros básicos de onda: comprimento, número de onda e velocidade.

2.2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à região conhecida como Bacia de Campos (Figura 7), escolhida por ser a principal área sedimentar de exploração de óleo e gás no Brasil, estendendo-se de Vitória (ES) até Arraial do Cabo (RJ) e abrangendo cerca de 100.000 km². Por ser uma região de intensa atividade de engenharia marinha, o estudo das ondas internas é especialmente relevante, já que essas ondas, devido à grande quantidade de energia que transportam, representam riscos para plataformas, dutos e tubulações (Borges; De Lima; Kowsmann, 2015). A Figura 7 apresenta a região selecionada (polígono vermelho), que compreende parte da costa dos estados de RJ e ES. O painel à esquerda mostra a delimitação sobre o mapa de referência, enquanto os painéis à direita ilustram a sobreposição com dados batimétricos e as principais isóbatas.

FIGURA 7 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA BACIA DE CAMPOS. O POLÍGONO VERMELHO DELIMITA A ÁREA DE ANÁLISE SOBRE (ESQUERDA) O MAPA DE REFERÊNCIA E (DIREITA) A BATIMETRIA DA REGIÃO (ISÓBATAS EM METROS).



Fonte: Elaborado pelo autor

A circulação oceânica da região é influenciada pelos ventos e dinâmicas das correntes oceânicas. A área de estudo faz parte do oceano Atlântico Sul, então as principais correntes que influenciam a Bacia de Campos são a Corrente de Contorno Intermediária e a Corrente do Brasil (Da Silveira et al., 2000). A região sudeste da América do Sul também recebe a influência da Corrente das Malvinas, que se encontra com a Corrente do Brasil e formam a Confluência Brasil-Malvinas.

A Bacia de Campos tem a presença de algumas massas d'água que caracterizam a estratificação da região, as principais são: Água Costeira (AC), Água Tropical (AT) e Água Central do Atlântico Sul (ACAS) (De Castro Filho et al., 2015) e a Água Intermediária Antártica (AIA).

A dinâmica de maré na Bacia de Campos é controlada pela interação de processos como ondas de tempestade e vórtices de mesoescala. Segundo Viana et al., (1998), a partir de medições de correntes de fundo no bordo da plataforma

indicam fluxos bidirecionais que são fortemente modulados pelo regime de ventos, pela passagem de frentes frias e processos de maré. A região apresenta um regime de maré de baixa amplitude, variando entre 0,5 e 1,5m. As análises espectrais de séries temporais de correntes mostram que a região possui uma assinatura semidiurna.

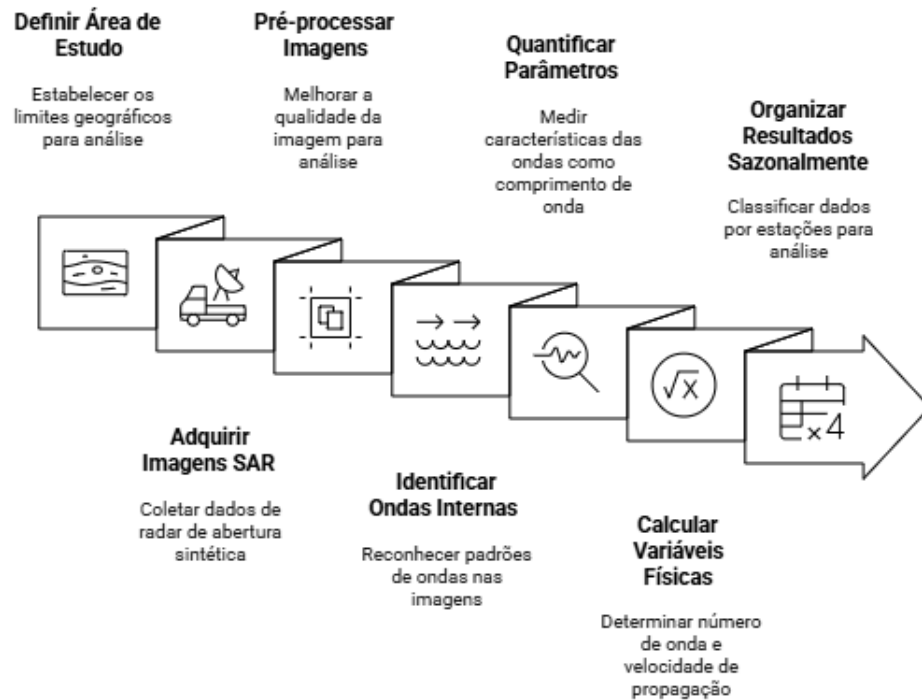
Apesar da baixa amplitude, estes movimentos de maré exercem um papel relevante no transporte sedimentar local, assim o regime de maré semidiurno da Bacia de Campos, juntamente com os forçantes meteorológicos e geostróficos regionais, formam um sistema hidrodinâmico de baixa energia mas com importância sedimentar e oceanográfica (Viana et al., 1998).

2.3 OBTENÇÃO DE IMAGENS SAR

As imagens SAR utilizadas neste estudo foram obtidas pelo satélite da missão Sentinel-1A, lançado em 2013. Este satélite está equipado com um radar que opera na banda C das microondas, recomendado para o estudo de oceanos (Moreira et al., 2013). Possui esquema de polarização dupla (VH e VV), sendo a co-polarização VV utilizada para análises de ondas internas (Lavrova; Mityagina, 2017). Outro fator determinante para a escolha do Sentinel-1 é a disponibilidade gratuita de suas imagens, oferecidas pelo Copernicus Browser, da Agência Espacial Européia (ESA) (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>).

Foram obtidas imagens mensais de janeiro de 2020 até dezembro de 2024, totalizando 54 imagens de SAR, já que alguns meses não apresentaram imagens disponíveis. O diagrama metodológico de trabalho desde a obtenção de imagens até a produção dos resultados é apresentado na Figura 8. O processo se inicia com a definição da área de estudo e a aquisição e pré-processamento das imagens SAR. A seguir, são executadas as etapas de identificação de ondas internas e a quantificação de seus parâmetros, como a contagem de pacotes e o comprimento de onda. Por fim, são calculadas as variáveis físicas (número de onda e velocidade de propagação) e os resultados são organizados sazonalmente para a análise.

FIGURA 8 – DIAGRAMA DAS ETAPAS METODOLÓGICAS DO ESTUDO. O DIAGRAMA ILUSTRA A SEQUÊNCIA DE PROCEDIMENTOS ADOTADOS NESTE TRABALHO.

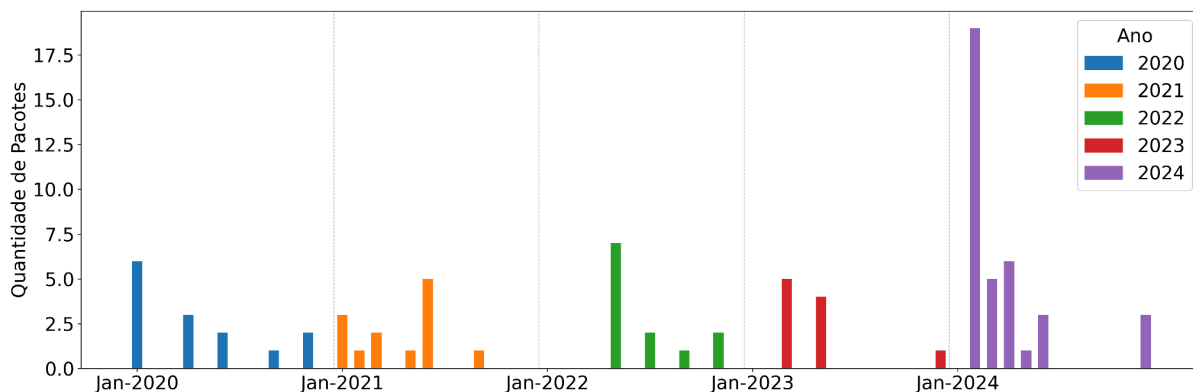


Fonte: Elaborado pelo autor

2.4 RESULTADOS

Foram analisadas 51 imagens SAR do Sentinel-1 referentes ao período de 2020 a 2024. Embora o satélite produza, em média, uma imagem mensal da Bacia de Campos, alguns meses não tiveram registros disponíveis. Cada imagem foi individualmente analisada para a contagem dos pacotes de onda, na Figura 9 está documentado a quantidade de pacotes por mês, cada barra representa um mês e as cores das barras representam o ano ao qual aquele mês pertence, percebe-se que o mês de fevereiro de 2024 foi o mês com maior ocorrência absoluta de todo o período de estudo, e o segundo mês com a maior ocorrência absoluta foi o mês de julho de 2022. Através da Figura 9 vemos também como houveram 35 meses sem ocorrência de ondas internas, desses 35 meses, 27 não tiveram ocorrência de ondas internas encontradas, enquanto que os 8 meses restantes não tiveram imagens obtidas pois o satélite Sentinel-1 não as produziu.

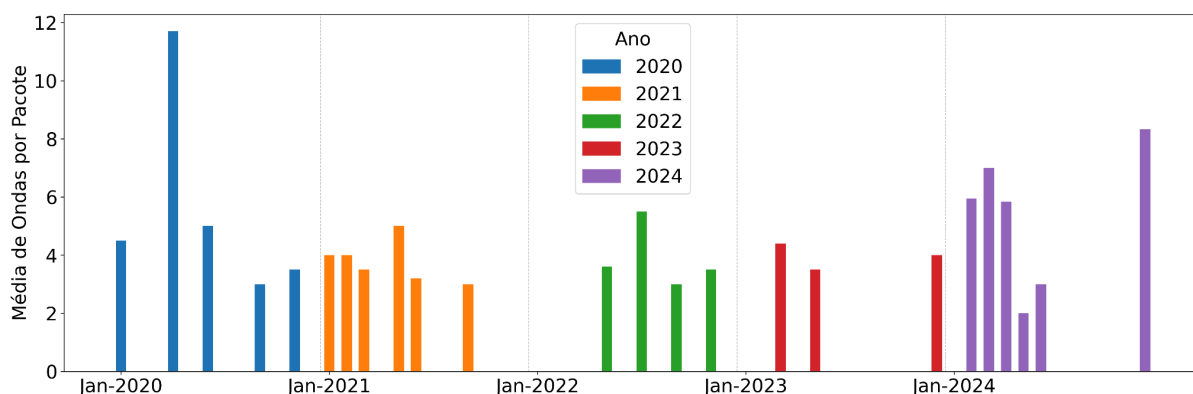
FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO MENSAL DA QUANTIDADE DE PACOTES DE ONDAS REGISTRADOS ENTRE 2020 E 2024. CADA BARRA REPRESENTA UM MÊS E CADA COR REPRESENTA O ANO ESPECÍFICO.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 10 mostra o cálculo da média de ondas por pacote, ou seja, quão grandes eram estes pacotes de onda, seguindo a mesma formatação de cores para diferentes anos e cada barra representando um mês. Em abril de 2020 é que vemos a maior média de ondas por pacote de onda encontrado, com uma média de 11,7 ondas. Em 2024 também se percebe um pico de quantidade média de ondas, chegando a 8,3 ondas no mês de dezembro.

FIGURA 10 – VARIAÇÃO MENSAL DA QUANTIDADE MÉDIA DE ONDAS POR PACOTE ENTRE 2020 E 2024. CADA BARRA REPRESENTA UM MÊS E CADA COR REPRESENTA O ANO ESPECÍFICO.

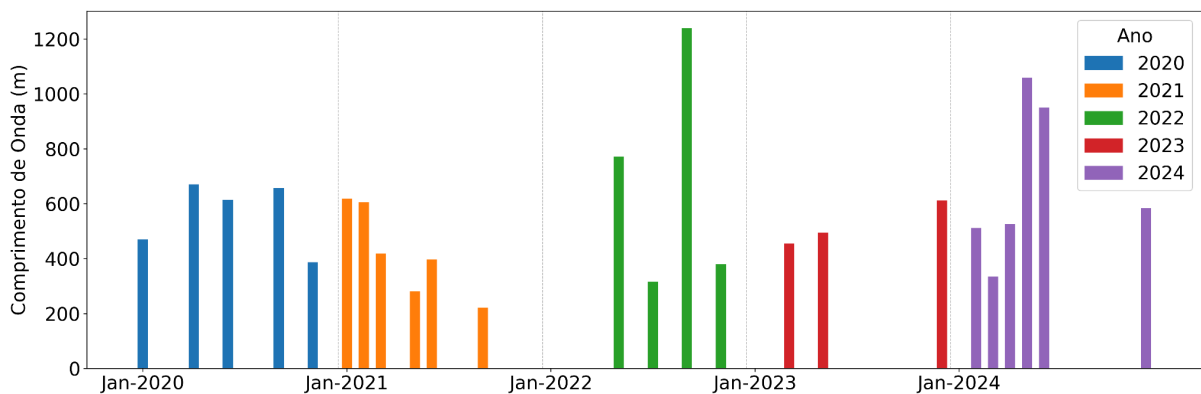


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 11 contém a medida do comprimento de onda, medido através do software ESA Snap com a ferramenta de medição de distâncias entre dois *pixels*, neste caso, foi medida a distância entre dois *pixels* de faixas claras (cristas das ondas) ou dois *pixels* de faixas escuras (cavas das ondas). Os anos de 2022 e 2024

contiveram os maiores valores, chegando a 1240 m em setembro de 2022 e 1059 m em maio de 2024. Com a média do comprimento de onda, posteriormente calculou-se o número de onda (k), que teve uma média de $0,014 \text{ m}^{-1}$. Os gráficos permitem a comparação da variabilidade sazonal (dentro de um mesmo ano) e interanual (entre anos diferentes), evidenciando meses com maior ou menor atividade.

FIGURA 11 – MÉDIA MENSAL DO COMPRIMENTO DE ONDA ENTRE 2020 E 2024. CADA BARRA REPRESENTA UM MÊS E CADA COR REPRESENTA O ANO ESPECÍFICO.

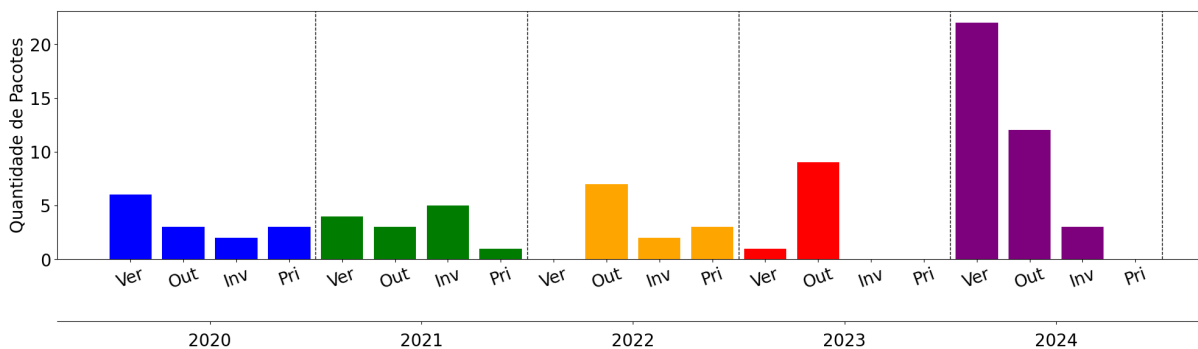


Fonte: Elaborado pelo autor

Foram também elaborados os histogramas das principais características das ondas por estação do ano (Figura 12, 13, 14) a fim de verificar a maior ocorrência de ondas internas no verão, como sugerido por Lorenzetti & Dias (2013) e como suas características variam sazonalmente.

A Figura 12 mostra o gráfico da distribuição de pacotes de ondas internas assim como a Figura 9, porém agora organizado sazonalmente. Cada cor de barra representa o ano em que aquelas barras fazem parte, e cada barra representa uma estação daquele ano. A estação com maior ocorrência de pacotes de ondas internas foi no verão de 2024, e vemos que os verões e outonos possuem maior ocorrência em geral, com exceção do ano de 2021, onde o inverno foi a estação com mais ocorrência e 2022 onde o verão não teve nenhum pacote de onda identificado, porém o verão de 2022 não teve imagem produzida pelo Sentinel-1 nem em janeiro nem em fevereiro, fazendo com que a estação de verão fosse representada apenas por dezembro, que teve zero ocorrências de ondas internas.

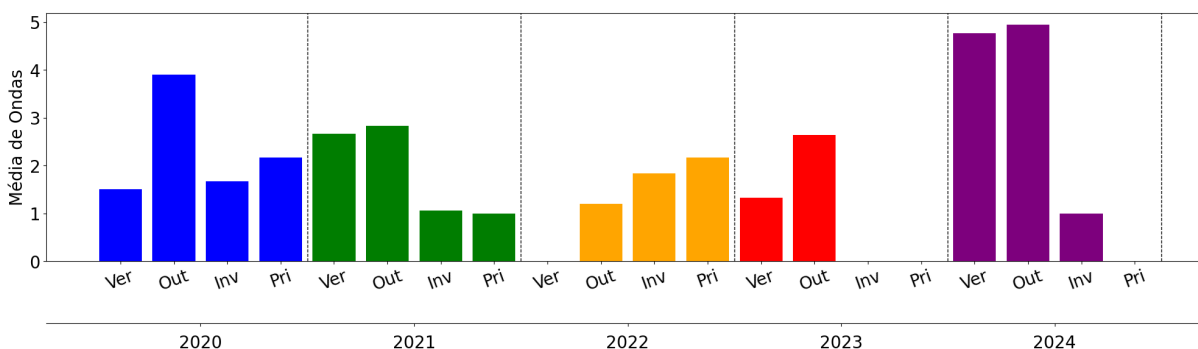
FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DE PACOTES DE ONDA POR ESTAÇÃO (VER: VERÃO; OUT: OUTONO; INV: INVERNO; PRI: PRIMAVERA) ENTRE 2020 E 2024.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 13 contém o gráfico que informa a média de ondas internas em cada pacotes de ondas, ou seja, quão grande eram os pacotes de ondas encontrados. A formatação de cores e barras do gráfico segue o mesmo padrão da Figura 12, para que a análise dos dados seja facilitado quando relacionando uma imagem com a outra. A estação com os maiores pacotes de ondas foi novamente o verão e outono de 2024, e nos demais anos o padrão de verão e outono serem as estações com mais ocorrência se mantiveram, salvo 2022 por causa dessa falta de imagens para os meses de verão.

FIGURA 13 – QUANTIDADE MÉDIA DE ONDAS POR PACOTE, POR ESTAÇÃO DO ANO (VER, OUT, INV, PRI), ENTRE 2020 E 2024.

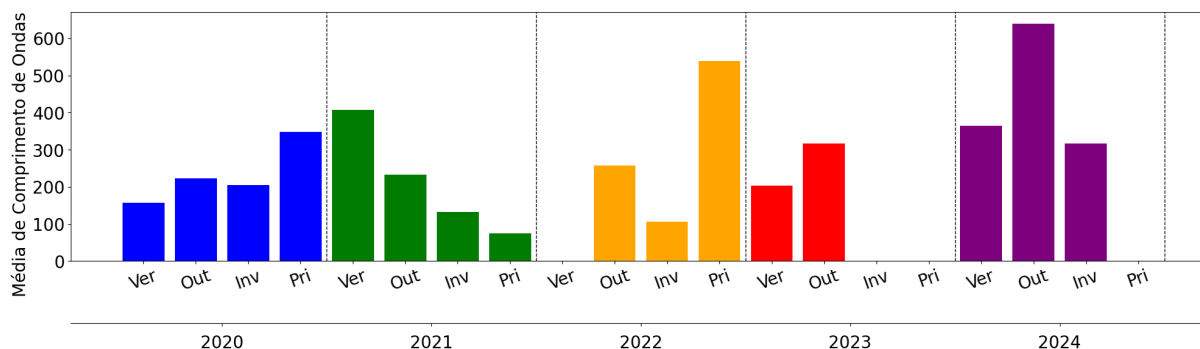


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 14 mostra o gráfico do comprimento médio de ondas em metros por estação, quando analisamos este gráfico, percebemos que o comprimento de onda não mantém todos os padrões percebidos anteriormente, 2024 continua tendo o valor destaque no outono, mas vemos que a primavera também obteve maiores

comprimentos de onda nos anos de 2020 e 2022, em 2021 e 2024 essa posição se manteve nos verões e outonos.

FIGURA 14 – COMPRIMENTO MÉDIO DAS ONDAS (M) POR ESTAÇÃO DO ANO (VER, OUT, INV, PRI) ENTRE 2020 E 2024.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os parâmetros estatísticos das ondas internas (média, mediana e desvio-padrão) foram calculados apenas para os meses com ocorrência registrada, e seus resultados estão sintetizados na Tabela 1. Nesta tabela temos as propriedades contadas (quantidade de pacotes, quantidade de ondas por pacote), medidas (comprimento de onda, distância entre pacotes) e calculadas (número de onda, velocidade de propagação). Para cada propriedade é dado o valor máximo e mínimo encontrado, bem como as estatísticas calculadas.

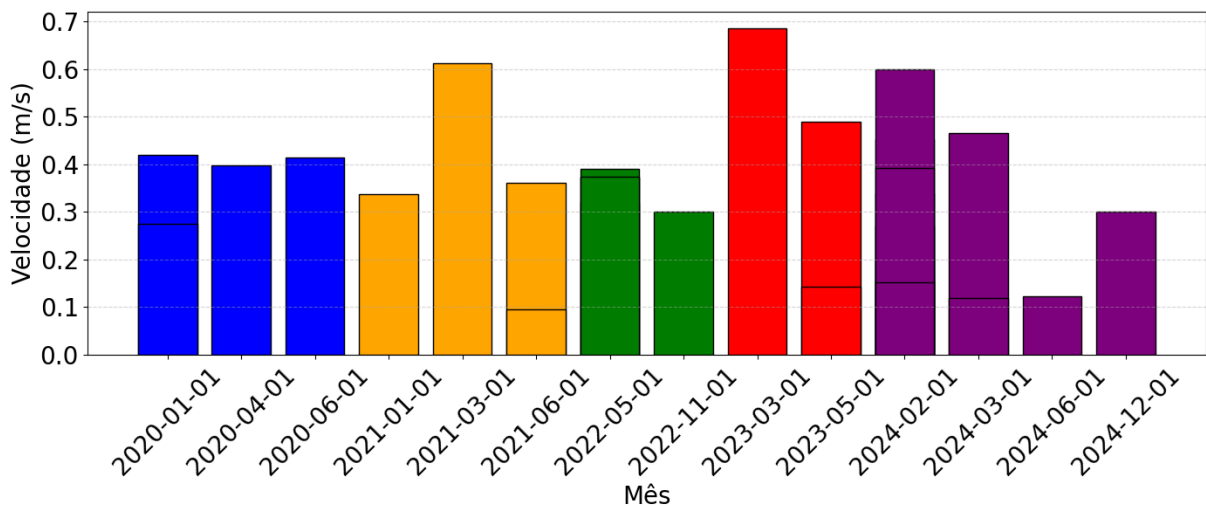
TABELA 1: RESUMO ESTATÍSTICO DAS ONDAS ENCONTRADAS

Propriedade	Máximo	Mínimo	Média (condicional)	Mediana (condicional)	Desvio Padrão (condicional)
Quantidade de pacotes	19	0	3,58	2,50	3,77
Comprimento de onda (m)	1240	174	539,50	494,50	245,85
Número de onda (1/m)	0,036	0,005	0,014	0,012	0,006
Quantidade de ondas por pacote	23	2	5,08	4	3,17
Distância entre pacotes (km)	30,67	4,23	15,25	15,65	6,84
Velocidade (m/s)	0,68	0,09	0,34	0,35	0,15

Fonte: Elaborado pelo autor

A velocidade de propagação foi estimada a partir da distância entre pacotes identificados no quadrante próximo ao talude continental, reforçando a interpretação de que sua geração está associada à interação da maré com a topografia de fundo (Jackson et al., 2013). Considerando o regime semi-diurno predominante na costa brasileira (Velloso & Alves, 2004 apud Soares, 2013), utilizou-se o período correspondente para o cálculo da velocidade de propagação. Os resultados do cálculo de velocidade estão representados no gráfico da Figura 15.

FIGURA 15 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO (m/s) ESTIMADA PARA PACOTES DE ONDA (2020-2024). O CÁLCULO CONSIDERA APENAS MESES COM MÚLTIPLOS PACOTES DA MESMA DIREÇÃO.



Fonte: Elaborado pelo autor

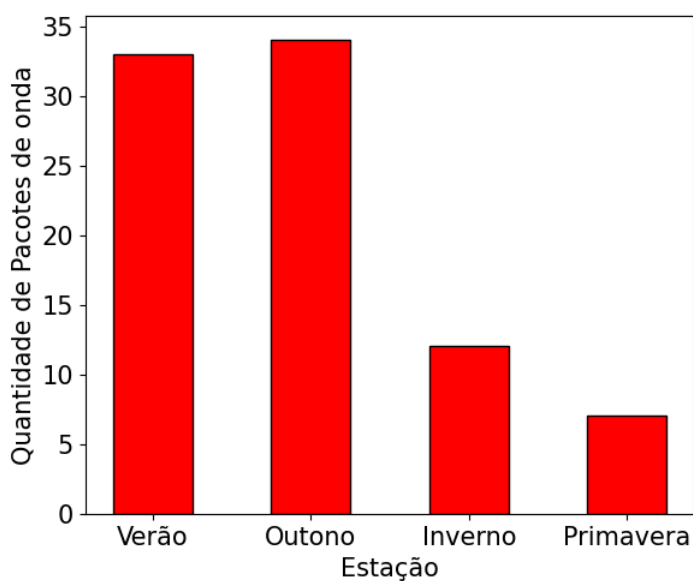
A análise da velocidade inclui apenas os dados dos meses em que houve a ocorrência de dois pacotes de onda provenientes da mesma direção. Este gráfico de velocidade de propagação possui algumas segmentações em algumas barras, isso ocorre pois nestes meses, a situação de ocorrer dois pacotes de ondas vindos da mesma direção que permitiram a medição da distância entre pacotes aconteceu mais de uma vez, permitindo que dois valores de velocidades fossem calculados.

Em fevereiro de 2024 esta situação aconteceu três vezes, ou seja, em três pontos diferentes da imagem SAR, apareceram dois pacotes de onda que vinham da mesma direção. A maior velocidade calculada aconteceu em março de 2023, com uma onda alcançando $0,68 \text{ ms}^{-1}$, a segunda maior velocidade aconteceu em março

de 2021, registrando $0,61 \text{ ms}^{-1}$. Estas duas maiores velocidades ocorreram em meses de outono. A média de todas as velocidades calculadas foi de $0,34 \text{ ms}^{-1}$.

Em 2024 registrou-se a maior média anual de pacotes de ondas, a maior média de ondas por pacote e a segunda maior média de comprimento de onda, concentrando 43% de todos os pacotes observados ao longo do período. A análise sazonal foi realizada por meio de dois gráficos: um mostrando o número absoluto de pacotes em cada estação (Figura 16) e outro apresentando sua distribuição percentual por ano (Figura 17), com cada cor das barras representando uma estação, e cada barra representando o ano, estes gráficos foram discutidos na seção 2.5.

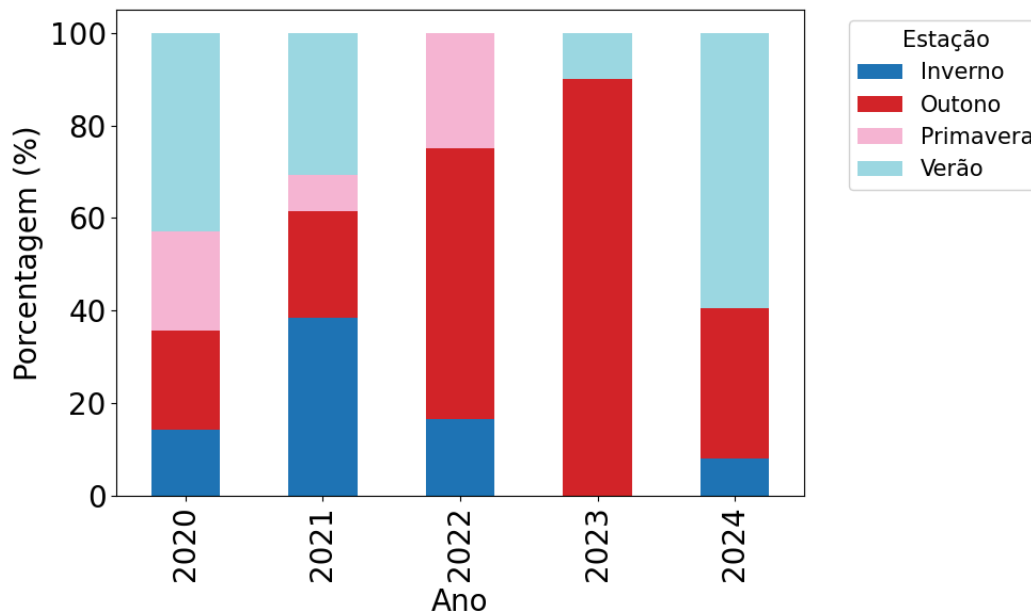
FIGURA 16 – DISTRIBUIÇÃO SAZONAL DO NÚMERO TOTAL DE PACOTES DE ONDA IDENTIFICADOS NO PERÍODO DE 2020 A 2024 NA BACIA DE CAMPOS.



Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA 17 – COMPOSIÇÃO SAZONAL PERCENTUAL DOS PACOTES DE ONDA POR ANO (2020-2024).

CADA BARRA REPRESENTA 100% DOS EVENTOS DAQUELE ANO.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.5 DISCUSSÃO

A análise sazonal (Figura 16) evidencia uma nítida concentração dos eventos no verão e no outono, os dois períodos com maior frequência. Em contrapartida, o inverno e a primavera apresentam uma quantidade de ocorrências substancialmente menor. O verão foi a estação com maior ocorrência de ondas internas em 2020 e 2024, enquanto em 2022 e 2023 o outono se destacou, e em 2021, o inverno. Vale ressaltar que, em 2022, não houve imagens para janeiro e fevereiro, de modo que o verão foi representado apenas por dezembro, o que provavelmente explica sua baixa ocorrência neste ano. De forma geral, observa-se que verão e outono concentram a maior parte dos eventos na Bacia de Campos. Esse padrão pode ser associado à influência das frentes frias, que tendem a destruir a termoclina e reduzir a estratificação da coluna d'água (Curtarelli, 2012), condição essencial para a propagação de ondas internas. Assim, durante o inverno e a primavera, quando essas frentes são mais frequentes, há menos registros. Já no verão, o aquecimento da superfície do mar intensifica a estratificação, e no outono ainda se mantêm seus

efeitos (Stachelski, 2024), criando um ambiente mais favorável à geração e propagação dessas ondas.

A composição percentual (Figura 17) permite comparar a importância relativa das estações ao longo dos anos, destacando como a sazonalidade variou. Nota-se, por exemplo, que o ano de 2023 foi quase inteiramente dominado por eventos de outono, enquanto 2020 teve uma distribuição mais equilibrada.

Ao analisar a distribuição sazonal (Figura 12), identifica-se a variabilidade na ocorrência dos pacotes, com destaque para o pico observado no verão de 2024. Da mesma forma, a quantidade média de ondas por pacote (Figura 13) mostra períodos com maior geração de ondas, com as maiores médias no outono de 2020 e no verão e outono de 2024. O comprimento de onda (Figura 14) também apresenta grande variabilidade, com o pico de maior comprimento médio no outono de 2024.

Os resultados confirmam parcialmente o resultado descrito por Lorenzetti & Dias (2013), segundo a qual a ocorrência de ondas internas é maior no verão na plataforma continental sudeste, embora neste estudo o outono também tenha apresentado elevada frequência. Uma possível explicação para o fato de o outono apresentar ocorrência ligeiramente maior de ondas internas do que o verão neste estudo é a diferença na disponibilidade de imagens SAR, já que três meses de verão não tiveram registros, enquanto apenas um mês de outono ficou sem cobertura. Assim, o verão foi representado por menos observações e, mesmo assim, a diferença absoluta entre as duas estações foi mínima, apenas um pacote de onda a mais no outono.

A Figura 14 mostra que na maioria dos anos, a média de comprimento de ondas aconteceu no verão ou no outono, vemos pela Figura 11 que em 2020, o maior comprimento de onda foi observado em março, em 2021 foi em janeiro, fevereiro e março, e em 2023 foi em dezembro. Hall; Huthnance; Williams, 2013 discutem que quando a estratificação diminui o comprimento de onda tende a diminuir também, como o verão possui maior estratificação e o outono mantém os efeitos da estratificação, observamos que é nestes meses que o comprimento de onda atingiu seu máximo.

Da mesma forma, o trabalho de Hall; Huthnance; Williams, 2013 observou que a diminuição da estratificação não só influencia no comprimento de onda mas também na velocidade, e se analisarmos a Figura 15 vemos que as maiores velocidades observadas aconteceram em março de 2021 e março de 2023.

Como observado neste trabalho, a análise de sazonalidade foi comprometida pela ausência de imagens do Sentinel-1 em determinados meses, especialmente em períodos-chave do verão. Isso introduz uma incerteza estatística que impede uma conclusão definitiva sobre a predominância de ondas internas no verão em comparação com o outono. Para trabalhos futuros, sugere-se fortemente a densificação da série temporal. Isso pode ser alcançado não apenas estendendo o período de análise, mas principalmente pela fusão de dados de múltiplas missões SAR. A integração de imagens de outros satélites que operam na Banda C (como o Radarsat-2), aumentaria a frequência de observação da área de estudo, preenchendo as lacunas deixadas pelo Sentinel-1. Uma série temporal mais robusta e completa permitiria uma análise estatística mais confiável da variabilidade sazonal e interanual das ondas internas na Bacia de Campos.

O presente estudo baseou-se inteiramente em dados de sensoriamento remoto para a identificação e caracterização das ondas, com estimativas de velocidade de propagação baseadas na teoria da maré semidiurna. Um avanço fundamental seria a validação desses resultados com dados *in situ*. Recomenda-se a aquisição e análise de dados de perfiladores acústicos de corrente (ADCPs), termistores ou sensores de condutividade, temperatura e profundidade (CTDs) instalados em plataformas ou linhas de fundeio na Bacia de Campos. A correlação entre as assinaturas de superfície vistas pelo SAR e as medições diretas da estrutura vertical da coluna d'água permitiria validar a metodologia, confirmar as velocidades de propagação e entender melhor o impacto vertical real dessas ondas.

3 CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia de pré-processamento proposta por Filipponi (2019) através do software ESA Snap permitiu a visualização e medição de alguns parâmetros das ondas internas na região da Bacia de Campos, tais como: comprimento de onda, número de onda e velocidade de propagação. A partir da contagem das ondas em cada imagem SAR, pudemos compreender a sazonalidade da ocorrência dessas ondas na área de estudo.

Os resultados evidenciaram uma sazonalidade clara, com maior ocorrência de ondas internas nas estações de verão e outono, sugerindo uma forte relação com a maior estratificação da coluna d'água nesta época do ano. A média de comprimento

de onda observada foi de 540 m, com velocidade média de propagação de 0,34 ms^{-1} . Estes resultados estão em concordância com os obtidos por Lorenzetti & Dias (2013), que também sugeriram maior ocorrência de ondas internas nas estações mais quentes.

Apesar das limitações na disponibilidade temporal das imagens SAR, que restringiram algumas análises em determinados meses, o estudo demonstrou a eficácia das técnicas de sensoriamento remoto na detecção e observação de ondas internas. A metodologia aqui apresentada pode ser aprimorada com a integração de dados provenientes de múltiplas missões SAR e com validação por meio de observações in situ, como medições de CTD e ADCP.

Conclui-se portanto que o sensoriamento remoto é uma opção viável para o monitoramento de ondas internas em regiões de grande importância econômica, como é o caso da Bacia de Campos devido a exploração de petróleo e gás. Além da contribuição para o conhecimento científico sobre a dinâmica oceânica local, a técnica e os resultados obtidos no presente trabalho possuem uma potencial aplicação para a indústria de óleo e gás, auxiliando na mitigação de riscos e segurança das atividades de exploração.

REFERÊNCIAS

- ASIYABI, Reza Mohammadi et al. Synthetic Aperture Radar (SAR) for Ocean: A Review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 16, p. 9106–9138, 2023.
- BAO, Sude et al. Detection of ocean internal waves based on Faster R-CNN in SAR images. **Journal of Oceanology and Limnology**, v. 38, n. 1, p. 55–63, jan. 2020.
- BARINTAG, Saheya et al. MTU2-Net: Extracting Internal Solitary Waves from SAR Images. **Remote Sensing**, v. 15, n. 23, p. 5441, 21 nov. 2023.
- BORGES, Ricardo Garske; DE LIMA, Alexandre Cavalcante; KOWSMANN, Renato Oscar. ÁREAS PROPENSAS A ESCORREGAMENTOS NO TALUDE CONTINENTAL. In: **Geologia e Geomorfologia**. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 99–136.
- BUENO, Rafael De Carvalho; BLENINGER, Tobias Bernward. Wind-induced internal seiches in Vossoroça reservoir, PR, Brazil. **RBRH**, v. 23, n. 0, 18 jun. 2018.
- BUIJSMAN, Maarten C. et al. Internal Gravity Waves. In: **Encyclopedia of Ocean Sciences**. [S.l.]: Elsevier, 2019. p. 622–632.
- CURTARELLI, M. P. - Estudo Da Influência De Frentes Frias Sobre a Circulação e os Processos de Estratificação e Mistura no Reservatório de Itumbiara (GO): Um Enfoque por Modelagem Hidrodinâmica e Sensoriamento Remoto. 2012. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, São José dos Campos, 2012.
- DE CASTRO FILHO, Belmiro Mendes et al. CORRENTES E MASSAS DE ÁGUA NA PLATAFORMA CONTINENTAL. In: **Meteorologia e Oceanografia**. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 191–254.
- ESRI. Introduction to SAR—ArcGIS Pro | Documentation. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/help/analysis/image-analyst/introduction-to-synthetic-aperture-radar.htm>. Acesso em: 20 nov. 2025
- FILIPPONI, Federico. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. In: INTERNATIONAL ELECTRONIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING. 3rd International Electronic

Conference on Remote Sensing. **MDPI**, 4 jun. 2019. Disponível em:
<<https://www.mdpi.com/2504-3900/18/1/11>>. Acesso em: 15 set. 2025

HALL, Rob A.; HUTHNANCE, John M.; WILLIAMS, Richard G. Internal Wave Reflection on Shelf Slopes with Depth-Varying Stratification. **Journal of Physical Oceanography**, v. 43, n. 2, p. 248–258, 1 fev. 2013.

HERSBACH, H.; STOFFELEN, A.; DE HAAN, S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 112, n. C3, p. 2006JC003743, mar. 2007.

HUANG, Xiaodong et al. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 30041, 21 jul. 2016.

JACKSON, Christopher et al. Nonlinear Internal Waves in Synthetic Aperture Radar Imagery. **Oceanography**, v. 26, n. 2, 1 jun. 2013.

LAVROVA, Olga; MITYAGINA, Marina. Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas. **Remote Sensing**, v. 9, n. 9, p. 892, 28 ago. 2017.

LORENZZETTI, João A.; DIAS, Fabian G. Internal Solitary Waves in the Brazilian SE Continental Shelf: Observations by Synthetic Aperture Radar. **International Journal of Oceanography**, v. 2013, p. 1–11, 27 mar. 2013.

MOREIRA, Alberto et al. A tutorial on synthetic aperture radar. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 1, n. 1, p. 6–43, mar. 2013.

MOSS LANDING MARINE LABS. Internal Waves in Monterey Bay – Physical Oceanography. Disponível em:
<https://mlml.sjsu.edu/physoce/internal-waves-in-monterey-bay/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

PETTORELLI, Nathalie et al. Satellite Remote Sensing for Conservation. **WWF Conservation Technology Series**, v. 1, n. 4, 2018.

RODENAS, J. A.; GARELLO, R. Internal wave detection and location in SAR images using wavelet transform. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 1494–1507, set. 1998.

SILVA, José Carlos B. da et al. The effect of the North Equatorial Counter Current on the generation and propagation of internal solitary waves near the Amazon River shelf as observed in SAR imagery. In: **Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto**, 17., 2015, João Pessoa. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2015. p. 1929–1936.

SILVEIRA, Ilson Carlos Almeida da et al. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171–183, 2000.

VIANA, A. R. et al. Hydrology, morphology and sedimentology of the Campos continental margin, offshore Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 115, n. 1–4, p. 133–157, jan. 1998.

SOARES, J. L. Análise da Variabilidade Espaço-temporal de Dados de Nível ao Longo do Litoral Brasileiro. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Oceanografia) - **Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2013.

STACHELSKI, L. Fluxos De Calor Entre O Oceano E A Atmosfera No Atlântico Tropical: Uma Comparação Entre Diferentes Parametrizações Bulk. 2024. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, São José dos Campos, 2024.

TOPOUZELIS, Konstantinos N. Oil Spill Detection by SAR Images: Dark Formation Detection, Feature Extraction and Classification Algorithms. **Sensors**, v. 8, n. 10, p. 6642–6659, 23 out. 2008.