



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

INGRID CAROLINE MOTA DE SENA

**INVESTIGAÇÃO DE ONDAS DO TIPO *SWELL* NO LITORAL NORTE
DA BAHIA UTILIZANDO SAÍDAS DO MODELO WAVEWATCH III E
DE REANÁLISE ATMOSFÉRICA**

Salvador

2018

INGRID CAROLINE MOTA DE SENA

**INVESTIGAÇÃO DE ONDAS DO TIPO SWELL NO LITORAL NORTE
DA BAHIA UTILIZANDO SAÍDAS DO MODELO WAVEWATCH III E
DE REANÁLISE ATMOSFÉRICA**

Monografia apresentada ao Curso Graduação em Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Clemente Augusto Souza Tanajura

Salvador

2018

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Deus que eu creio. Depois, aos meus pais, Justino Azevedo e Maria Vanda, que através do amor me trouxeram a este mundo. Principalmente a minha mãe, a mulher maravilha da minha vida, meu orgulho. A minha família materna e paterna, por ser a base de quem eu sou hoje, principalmente, a minha Tia Nilzete e a Marinaldo. E não menos importante meu padastro, Fernando, que me criou como sua filha.

A todos os meus amigos de infância e adolescência, no qual o tempo não foi capaz de separar: Fernanda, Juliana, Naiara, Jeferson, Suelen, José Matheus, Helen Duda e Karolyne.

Aos meus amigos do CEFET, especialmente ao Alex, as “AVES” e os “Meninos de MEC”, sem vocês aquele colégio seria um dragão sem o São Jorge pra me defender, rs. Também aos professores Rita e Cleverton, que sempre acreditaram no meu potencial muito mais que eu.

Agradeço aos professores da UFBA, por ter proporcionado que mais um profissional fosse habilitado ao mercado de trabalho, principalmente a Juliana Leonel, Miguel Accioly e Hebe Queiroz. A vivência na iniciação científica, fomentada pelo FAPESB/UFBA, que deu o apoio financeiro para mais um aluno. Ao Grupo de Pesquisa de Rede de Modelagem e Observações Oceanográficas (REMO) por todo o subsidio na parte de programação. Não menos importantes, aos professores Clemente Tanajura, Guilherme Lessa e Janini Pereira, que permitiram a geração deste trabalho. E as peças fundamentais da conclusão deste foram: André, Brisa, Lucas, Rafael Mariani, Mirela e Julinha, que diariamente me auxiliaram na busca dos resultados.

A Família Atlanticus, por todas as vivências e as dificuldades passadas, principalmente, a minha eterna presidente Priscilla Karen, que sempre iluminou a minha vida, me apoiou e está comigo independente da distância.

A minha turma 2013.1, que foi um dos elos mais forte que eu tive na vida, porque mesmo com a distância, eu nunca consigo desvencilhar o Eu do Nós. Foram muitas batalhas vencidas nesse processo da Graduação, muitas vencidas em conjuntos e outras individualmente, mas compartilhada a felicidade por todos. Por muitos encontros dentro e fora da faculdade, os congressos e as Cervejas Infinitas que o digam!

Obrigada mais que especial a Ulisses, pelas braçadas nas terças, às 6h da manhã, no ano passado rs... Pela ajuda e incentivo, por todos os conselhos e reflexões. E por ser junto com Willian, o meu porto seguro! São pessoas que admiro muito e quero levar pra vida, e sou grata por ter conhecido vocês.

Obrigada a você, Wil, por todo o suporte, por ser o meu irmão mais velho que eu não tive, mesmo sendo mais novo. A minha alma gêmea good vibes, Gargur, sem ela aquele embarque não seria o mesmo. Aquela menina que eu sempre tive um *crush* de amizade e hoje tenho a honra de chamá-la de amiga. Ao meu tripé do amô, Bia e Wil, por todo amor envolvido durante esses anos. As minhas rainhas, Laís, Mari e Amanda, exemplo de mulheres no qual eu me espelho. Sempre ajudando a coleguinha a passar de fase no jogo da UFBA, rs.

A minha Equipe de trabalho no Laboratório de Monitoramento Ambiental da Embasa, que mesmo com o pouco tempo de convivência, sempre acreditou em mim e sempre motivou os meus sonhos, principalmente, a Marciana, meu espelho de mulher guerreira.

RESUMO

As ondas superficiais são perturbações geradas pelo cisalhamento do vento na superfície do oceano. As ondas superficiais gravitacionais dividem-se em *sea*, geradas localmente, e *swell*, geradas remotamente. O objetivo do presente trabalho foi relacionar a chegada de ondas tipo *swell* no Litoral Norte da Bahia com os padrões de vento e pressão no Atlântico Sul, a fim de compreender aspectos do clima de ondas. Coletaram-se as previsões de ondas do modelo WaveWatch III (WW3) da NOAA e os ventos empregados nessas previsões no período de 02/2005 a 12/2016. Foram analisados os seguintes parâmetros: altura de onda significativa, período de pico e direção de pico de onda, intensidade do vento e campo de pressão das reanálises do Coupled Forecasting System Reanalysis (CFSR) da NOAA. Segundo Pond e Pickard, *swell* são caracterizados por períodos de 9 a 15 segundos e *super swell* de 15 a 30 segundos. Com o processamento dos dados, obteve-se a frequência de ocorrência de períodos de onda. No outono e inverno, houve maior ocorrência de períodos maiores ou iguais a 9 segundos, principalmente em maio. A direção da onda do tipo *swell* se deu de leste/sudeste, sudeste, sul/sudeste, e em menor frequência de leste e de sul. As maiores alturas de onda ocorreram no inverno. Nos campos de intensidade de vento e pressão, observaram-se ventos fortes nas passagens de giros ciclônicos no quadrante de 45°S a 15°S e 36°W a 5°W. As pistas formadas pela intensificação dos ventos alísios, que em sua maioria foram energizadas pela passagem da frente ou por anticiclones móveis, tiveram ventos moderados, com o quadrante da pista de vento preponderantemente entre 11°S – 41°S e 3°W – 34°W. A média da velocidade do vento para os eventos mais energéticos foi igual a 22 m/s. Houve a persistência dos sistemas frontais antes ou durante o *swell*. Percebeu-se uma forte relação entre a presença de sistemas frontais e a chegada de *swell* no litoral norte da Bahia com defasagem de 1 a 3 dias.

Palavras-chave: Swell, Modelo de onda, Frentes frias, Ventos alísios.

ABSTRACT

Surface waves are disturbances generated by wind shear on the ocean surface. The gravitational surface waves are divided into sea, locally generated, and remotely generated. The objective of the present study was to relate the arrival of swell on the north coast of Bahia, with the wind and pressure patterns in the South Atlantic, in order to understand aspects of the wave climate. Wave forecasts by the WaveWatch III (WW3) NOAA model and the forecasted winds employed to produce the wave forecasts were collected from 02/2005 to 12/2016. The following quantities were investigated: wave significant height, peak period and wave peak direction, wind intensity and pressure field, the latter produced by the Coupled Forecasting System Reanalysis (CFSR), NOAA. According to Pond and Pickard, swells are characterized by periods from 9 to 15 seconds and super swells from 15 to 30 seconds. By processing the data, the frequency of peak was obtained. In autumn and winter, mainly in May, periods greater or equal to 9 seconds were more commonly found. The direction of the corresponding periods occurred from east / southeast, southeast, south / southeast, and less frequently from east to south. The highest wave heights occurred in winter. Strong winds associated with the passage of cold fronts and cyclones in the quadrant of 45°S to 15°S and 36°W to 5°W formed the main swell fetches. Fetches formed by the intensification of the trade winds were also observed. These were mostly energized by the front passage or by displacements of anticyclones with moderate winds. The prevailing quadrant of the wind fetch associated with the trade winds were between 11°S - 41°S and 3°W - 34°W. The average wind speed for the most energetic events was 22 m/s. Existing frontal systems were observed before or during the swell events. A strong relationship between frontal systems and the arrival of swells in the north coast of Bahia was observed with time lag of 1 to 3 days.

Keywords: Swell, Wave model, Cold fronts, Trade winds.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Atlântico Sul e os centros de pressão (Fonte: Christina & Nogueira, 2014). | 6 |
| Figura 2. Área do Litoral Norte da Bahia com ponto, em vermelho, mostrando a posição do ADCP, e em branco, mostrando a posição do ponto para comparação dos dados com o modelo WW3. E o quadrante vermelho área representativa do Litoral Norte da Bahia (Fonte: Adaptado de Pires, 2017). | 7 |
| Figura 3. Tamanhos de pista de vento e pressão (Fonte: Campos, 2009). | 11 |
| Figura 4. Período de pico (Tp(s)) em vermelho e altura significativa de onda (hs(m)) em azul, plotado nas coordenadas de 12,5°S e 37,5°W para os anos 2005 a 2016. | 16 |
| Figura 5. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do <i>swell</i> litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 21 de abril de 2008). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de abril de 2008. | 19 |
| Figura 6. Campo de vento e pressão dos dias (a) 20, (b) 21 e (c) 22 de abril de 2008. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento. | 22 |
| Figura 7. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do <i>swell</i> litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 13 de maio de 2008). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de maio de 2008. | 24 |
| Figura 8. Campo de vento e pressão dos dias (a) 10, (b) 11, (c) 12 e (d) 13 de maio de 2008. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento. | 28 |
| Figura 9. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do <i>swell</i> litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 21 de maio de 2012). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de maio de 2012. | 30 |
| Figura 10. Campo de vento e pressão dos dias (a) 17, (b) 18, (c) 19, (d) 20 e (e) 21 de maio de 2012. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento. | 35 |

Figura 11. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do *swell* litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 13 de maio de 2007). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de maio de 2007..... 37

Figura 12. Campo de vento e pressão dos dias (a) 03, (b) 04, (c) 05, (d) 06, (e) 07, (f) 08, (g) 09, (h) 10, (i) 11 e (j) 12 de maio de 2007. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento. 48

Figura 13. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do *swell* litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 24 de junho de 2009). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de junho de 2009. 50

Figura 14. Campo de vento e pressão dos dias (a) 21, (b) 22, (c) 23 e (d) 24 de junho de 2009. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento. 54

Figura 15. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do *swell* litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 03 de maio de 2008). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de maio de 2008..... 56

Figura 16 Campo de vento e pressão dos dias (a) 01 e (b) 02 de maio de 2008. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento. 58

Figura 17. Gráfico de dispersão da altura de onda significativa para o Litoral Norte da Bahia (12,5°S e 37,5°S). O eixo das abcissas (y) representa o dado modelado (WW3) e o eixo das coordenadas (x) representa dados do ADCP. 59

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Conversão Meteorológica (Φ MET) com os valores em graus e nomenclatura da direção do vento | 9 |
| Tabela 2. Guia de interpretação de correlação linear..... | 13 |
| Tabela 3. Total de ocorrências de <i>swell</i> para todos os meses e estações do ano. | 14 |
| Tabela 4. Padrões de vento e os valores médios da posição, tamanho, velocidade, direção e duração dos ventos. | 17 |
| Tabela 5. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda. | 18 |
| Tabela 6. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda. | 23 |
| Tabela 7. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda. | 29 |
| Tabela 8. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda. | 36 |
| Tabela 9. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda. | 49 |
| Tabela 10. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda. | 55 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 OBJETIVO | 5 |
| 2.1 Objetivo Geral | 5 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 5 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 6 |
| 3.1 Área de estudo | 6 |
| 3.2 Descrição do modelo | 7 |
| 3.3 Descrição do software | 8 |
| 3.4 Conversão no formato dos dados | 8 |
| 3.5 Processamento dos dados | 8 |
| 3.6 Seleção dos casos | 12 |
| 3.7 Comparação de dados <i>in situ</i> versus simulação do modelo WaveWatch | 12 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 14 |
| 4.1 Evento de Ciclone Subtropical | 18 |
| 4.2 Evento com 2 Ciclones Extratropicais | 22 |
| 4.3 Evento Convergência de Ventos | 28 |
| 4.4 Evento de Convergência de Ventos e Intensificação dos Alísios | 35 |
| 4.5 Evento Intensificação dos Alísios | 48 |
| 4.6 Evento Ventos Anticiclônicos | 54 |
| 4.7 Comparação dos dados <i>in situ</i> com as simulações do WW3 | 58 |
| 5 CONCLUSÃO | 61 |
| 6 REFERÊNCIAS | 62 |

1 INTRODUÇÃO

A interação do oceano-atmosfera gera, dentre outros fenômenos, os movimentos oscilatórios de superfície que possuem alta complexidade e ainda não estão totalmente compreendidos (Thomson et al., 2014; Martins, 2014). Existem dois tipos principais de ondas de superfície, a do tipo *swell*, gerada remotamente, e *wind-sea*, que são ondas locais (Casa-Prat et al., 2014). As ondas de *swell* são consideravelmente mais energéticas, são associadas a eventos extremos e geradas por diversos eventos meteorológicos (Pianca et al., 2010). A energia dissipada pelo *swell* na região costeira é um dos principais fatores responsáveis pela dinâmica de sedimento na zona litorânea (Domingues e Bitencourt, 2012)

Os efeitos das ondas são importantes de diversas formas, impactando tanto o oceano aberto, nas operações de navios e plataforma, como na zona costeira, alterando a morfodinâmica local, agravando a erosão costeira, entre outros processos, que influenciam diretamente na vida humana (Semedo et al., 2013). Assim, estudos da modelagem de ondas estão associados à segurança humana e da navegação.

Os eventos ondulatórios também estão inseridos no contexto das mudanças climáticas que vêm sendo muito discutida por causa da possibilidade de impacto na sociedade e no meio ambiente num futuro próximo. O aumento do efeito estufa contribui principalmente para a elevação da temperatura global, mas também para mudanças da pressão atmosférica e dos padrões de vento tanto em escala regional como global, modificando o clima de ondas. Esses efeitos poderão produzir diversos impactos na costa com possibilidade de mudança de linha de costa, inundação, aumento do nível do mar e falha de estrutura portuária. Sabe-se que a maior concentração populacional se situa na zona costeira, e desta forma, estudos de previsibilidade de ondas tanto a curto como a longo-prazo são de extrema importância para evitar prejuízos causados por ondas extremas associadas a eventos sinóticos de alta energia (Casa-Prat et al., 2014).

Dentre os principais padrões de circulação atmosférica estão as células de Hadley e Ferrel. Nas células de Hadley, há o predomínio dos ventos alísios na superfície, que, de modo geral, são ventos de sudeste no Hemisfério Sul. Já nas células de Ferrel, o predomínio do vento é de noroeste na superfície (Campos, 2009).

Além dos grandes padrões, as trocas térmicas entre atmosfera, sol e oceano permitem a formação de alguns eventos que são as principais pistas de vento geradora do *swell* que chega a costa da Bahia. Os eventos são: os ciclones, giros de ar associados ao centro de baixa pressão (Reboita et al., 2017), e os anticiclones, giros de ar associados ao centro de alta pressão. No Hemisfério Sul, o giro ciclônico

ocorre no sentido horário (Reboita et al., 2017) e o giro anticiclônico no sentido anti-horário.

O sistema meteorológico que predomina no Atlântico Sul é um centro semi-permanente de alta pressão, conhecido como Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). O ASAS é responsável pela geração dos ventos alísios e desloca-se sazonalmente devido à migração da Zona de Convergência intertropical (ZCIT) que em média varia de 14°N (agosto e setembro) para 2°S à 5°S, nos meses de março e abril (Silva et al., 2011; Carvalho et al., 2013). A intensificação dos ventos alísios gera uma importante pista de vento. Outro sistema meteorológico são os centros de baixa pressão. Na latitude onde predomina o centro de baixa pressão em 50° S, existe uma importante região para a formação das frontogênese e ciclogênese, ou seja, é a região que se formam as frentes frias e giros ciclônicos móveis (Garrison, 2010).

Na zona de convergência subtropical do Atlântico Sul, originam-se as frentes frias e formam-se os ciclones extratropicais. Ocorrem principalmente no inverno, quando o gradiente térmico é maior devido a um resfriamento mais acentuado do Hemisfério Sul. Dessa forma, a massa de ar se torna mais densa nas latitudes mais altas em relação aos trópicos, onde as massas de ar são mais quentes. Devido à diferença de densidade, as massas de ar não se misturam facilmente, formando de um lado do centro de baixa pressão, uma frente fria, e do outro lado, uma frente quente (Garrison, 2010). A frente fria, ao se deslocar para norte, desloca a massa de ar quente para cima e provoca chuvas.

A maior incidência da frente fria e dos ciclones, durante o inverno, é devido ao fluxo de diferentes massas de ar que, com o resfriamento sazonal, intensificam as diferenças de temperaturas. As diferenças nas massas de ar são favorecidas pela topografia da América do Sul com a presença dos Andes, que funcionam como uma barreira para as massas, ao se deslocarem do Pacífico para o Atlântico. Dessa forma, todos esses fatores influenciam no gradiente de pressão, no qual vão se situar zonas de instabilidades favoráveis a frontogênese e a ciclogênese (Berry et al., 2011).

O litoral nordestino e o litoral baiano ficam susceptíveis aos ventos alísios e outros fenômenos devido a sua configuração geográfica (Innocentini et al., 2005). No nordeste brasileiro, o *swell* de SE e S/SE é gerado por ventos fortes que ocorrem durante a passagem de giros ciclônicos que atingem latitudes médias nos meses de inverno (Pianca et al., 2010). A exemplo da entrada dos giros ciclônicos, outros eventos meteorológicos, como os anticlones transientes são responsáveis por perturbações no oceano Atlântico Sul e formação de *swell* (Campos, 2009).

Na Bahia, a plataforma continental de Salvador é caracterizada como uma plataforma curta (10 km), porém possui peculiaridades, como o alongamento da

plataforma na região do banco de Royal Charlote e o Banco de Abrolhos. Essas regiões funcionam como um amortecedor das ondas, através da difração. Assim, a região de Caravelas ilustra o importante papel como uma barreira das ondas que chegam a Bahia, já que nem toda onda de sul e sul/sudeste chegará na região. Adicionalmente, devido à pequena profundidade da plataforma continental baiana, as ondas com altura significativa (H_{sig}) entre 2,5 e 3m, que são 1/3 das maiores alturas, e períodos entre 9 e 13 segundos são capazes de mobilizar os sedimentos que a recobrem (Campos & Dominguez 2010).

Dados observados, medidas de satélites altimétricos e simulações de modelo são utilizados para mensurar ondas. No trabalho de Casa-Prat et al. (2014), o método foi baseado na construção da relação empírica entre as variáveis atmosférica e parâmetros do clima de ondas, usando observações ou dados de reanalises, nas previsões futuras para a região do Mar Mediterrâneo, onde se obteve resultados de altura de onda significativa modelada representativa do *swell* que chegaram a costa. No trabalho de Alves et al. (2001), foram usados dados coletados através da bóia de espectro direcional para investigação do clima de onda do litoral de Santa Catarina, onde as ondas foram advindas principalmente de leste/nordeste e sul/sudeste para os *wind-sea*, ondas de leste e *swell* de sudeste. No trabalho de Alves et al. (2009), ele utiliza as saídas do modelo WaveWatch III (WW3) para reconstituir o clima de onda pretérito na costa do Rio de Janeiro do período de 01/1997 a 03/2005. Já no trabalho de Dimitrova et al. (2013), as saídas do modelo WW3 são validadas com os dados coletados a partir do satélite altimétrico Jason-2 para o Mar Negro, no qual as reanalises e os dados de satélites tem uma correlação alta e uma boa concordância. No trabalho de Innocentini et al. (2005), foram utilizados os campos marítimos do WW3 e o modelo atmosférico do GFS para detecção dos distúrbios de leste no litoral nordeste do Brasil, que verificou que, embora alguns eventos ocorram por distúrbios de leste, a dominância são dos alísios. Como citado, o estudo de ondas e caracterização dos eventos sinóticos tem diversas aplicabilidades, com formas diversas na adesão dos parâmetros de onda e os campos de vento.

Enquanto isso, as previsões de onda em oceano aberto vêm se desenvolvendo ao longo das últimas décadas devido ao melhoramento dos modelos, com campos de ventos mais sensíveis (Vledder et al., 2015). Assim, os modelos de geração de onda são representados por processos físicos complexos, de acordo com Vledder et al. (2015). Segundo Caetano e Innocentini (2003), diversos serviços nacionais de meteorologia vêm simulando as previsões de ondas, geradas por ventos de superfície, usando modelos numéricos com condições de contorno fornecidos por modelos operacionais atmosféricos.

Segundo Dimitrova et al. (2013), simulação histórica de eventos de tempestade é a chave para desvendar o potencial de desastres costeiros. Na falta de dados observados, no local específico e com carência da série temporal do vento e ondas, a entrada computacional se faz necessária, possibilitando uma série histórica longa e com valores extremos que podem ser contabilizados para reconstrução dos eventos de onda. Os modelos são importantes ferramentas para episódios de eventos extremos e previsibilidade de curto ou longo-prazo, porque as saídas de modelos são completas com média no tempo e no espaço. Dessa forma, as análises das séries históricas de ondas são a chave para entender a climatologia de ondas regionais e entender a propensão à chegada de *swell*.

Alves et al. (2009) traz como vantagens dos modelos de simulação de ondas, como o WW3, a produção de saídas pontuais e a maior possibilidade de detalhamento dos campos de ventos e ondas. Campos (2009) cita como vantagem a possibilidade de simulação em diversas regiões do globo.

Com isso, os modelos operacionais de ondas são ferramentas importantíssimas na caracterização da climatologia de onda, principalmente na região do Litoral Norte da Bahia, onde não há trabalhos amplamente publicados, que tenham como característica série temporal longa e investigação dos padrões precursores de *swell*. Nesse trabalho, será usado o WW3 - Wavewatch III (TOLMAN,1999), um modelo operacional de ondas, produto do National Oceanic and Atmospheric Administration/National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP), com resolução espacial de $1^\circ \times 1,25^\circ$ para latitude e longitude. Será utilizada uma série temporal de fev/2005-dez/2016, com o objetivo de estudar a altura de onda significativa (hs), direção (dp) e período (tp) de ondas que atingem o Litoral Norte da Bahia ($12^\circ\text{S } 36,5^\circ\text{W}$, $13^\circ\text{S } 36,5^\circ\text{W}$, $12^\circ\text{S } 37,5^\circ\text{W}$, $13^\circ\text{S } 37,5^\circ\text{W}$) e campo de vento produzidos pelo modelo Wavewatch III, além de utilizar reanálise do campo de pressão, produto do Coupled Forecasting and Reanalysis System (CFSR) da NOAA, para o oceano Atlântico Sul, a fim de correlacionar a entrada de *swell* com a ocorrência de frente fria, ou identificar os padrões de ventos que possam estar gerando essas perturbações.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Estudar a relação entre padrões de vento e de pressão ao nível do mar e a geração de *swell* que atingem o Litoral Norte da Bahia.

2.2 Objetivos Específicos

- Relacionar a entrada de *swell* de E, E/SE e SE/S e S que atingem o Litoral Norte da Bahia, com a ocorrência de frentes frias e outros padrões de ventos que possam gerar essas perturbações;
- Caracterizar a altura significativa (h_s), período de pico (t_p) e direção (d_p) de ondas do tipo *swell*, que atingem o Litoral Norte da Bahia ($12^\circ\text{S } 36,5^\circ\text{W}$, $13^\circ\text{S } 36,5^\circ\text{W}$, $12^\circ\text{S } 37,5^\circ\text{W}$, $13^\circ\text{S } 37,5^\circ\text{W}$) empregando as saídas do WW3;
- Correlacionar os parâmetros de ondas do tipo *swell* com os dados observados do ADCP localizado na Praia do Forte.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo do presente trabalho é o Atlântico Sul, situado a 10°N e 58°S, que apresenta na porção central uma cordilheira Meso-Oceânica. Na superfície, os regimes meteorológicos são dominados zonalmente por campos de ventos alísios (0° - 30°S), com ventos intensificados durante o inverno, e ao sul desse sistema os ventos de oeste (30°S - 60°S) (Pickard et al., 2011). O Litoral Norte da Bahia, ponto de coleta dos parâmetros de onda, localiza-se na região costeira, banhando os municípios de Salvador até Mangue seco, na divisa com Sergipe, da costa até a quebra da Plataforma Continental de Salvador. Dentro do Litoral Norte da Bahia, está localizado a Praia do Forte (PF), que é pertencente ao município de Mata de São João – BA. Nesta região, está situado o ADCP (longitude 37° 58' 31.8" W e latitude 12° 36' 13.8" S), onde foram coletados os dados *in situ*, para comparação breve com os dados do WW3.

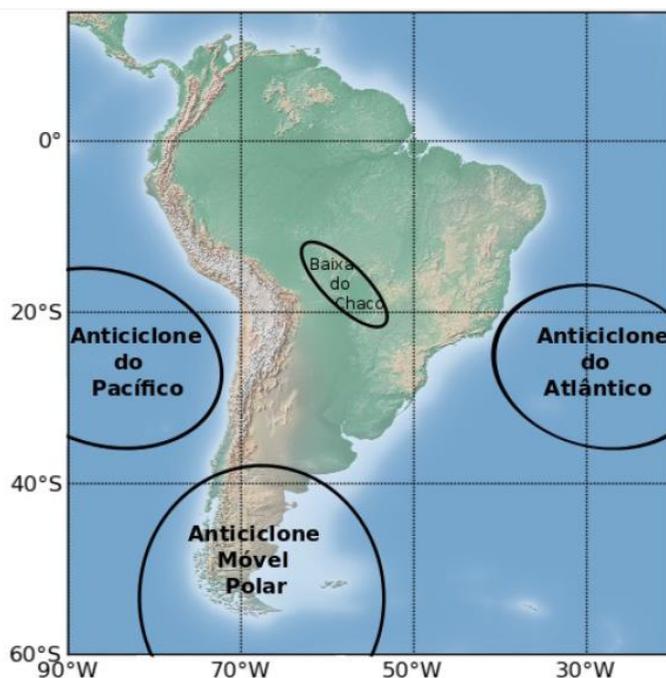


Figura 1. Atlântico Sul e os centros de pressão (Fonte: Christina & Nogueira, 2014).

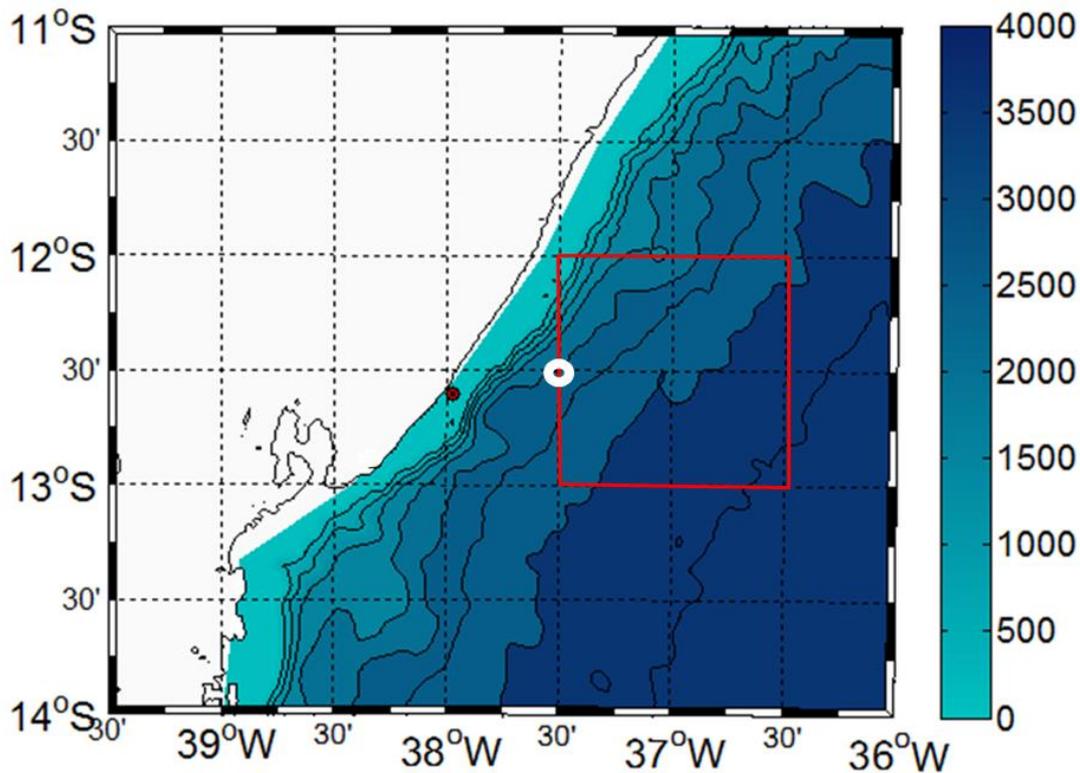


Figura 2. Área do Litoral Norte da Bahia com ponto, em vermelho, mostrando a posição do ADCP, e em branco, mostrando a posição do ponto para comparação dos dados com o modelo WW3. E o quadrante vermelho área representativa do Litoral Norte da Bahia (Fonte: Adaptado de Pires, 2017).

3.2 Descrição do modelo

Nesse trabalho será usado o WW3 - Wavewatch III (Tolman, 2009), um modelo operacional de ondas, no qual são obtidas as saídas de reanálise a partir da rodada do modelo com as forçantes do vento do NCEP/CFR interpolado juntamente com os dados observados de boias e satélites, produto do NCEP/NOAA, com resolução espacial de $1^\circ \times 1,25^\circ$ para latitude e longitude. Esse modelo foi desenvolvido pelo laboratório *Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB)* do *Environmental Modeling Center (EMC)*, pertencente ao NCEP/NOAA. A versão utilizada neste trabalho foi a 3.14 (Laing et al., 1998; Tolman, 2009; Campos, 2009).

Assim como outros modelos numéricos de onda de superfície, o WW3 também é governado através de equações que tem como parâmetros as componentes de ondas espectrais limitadas pelo fundo e média da corrente. O modelo se baseia na resolução da equação do balanço da densidade espectral da ação da onda para cada espectro de direção-número de onda (Pianca et al., 2010; Dimitrova et al., 2013). O crescimento, refração e decaimento de cada componente do estado do mar são

resolvidos para cada frequência específica e direção, dando uma completa e realística característica do campo de ondas transientes (Pianca et al., 2010). Os processos físicos incluídos no modelo são: refração e dispersão, crescimento de onda e decaimento devido às ações do vento, interações ressonantes não-lineares, dissipação por arrebentação em mar aberto (*white-capping*) e fricção com o fundo devido as variações espaciais e temporais da profundidade média da água e da corrente média (Pianca et al., 2010).

Assim, depois do modelo definir os processos e aplicá-los na equação, têm-se os parâmetros de saída:

- Altura de onda significativa de onda (m)
- Direção de pico (convenção meteorológica)
- Período de pico (s)

As previsões de vento (velocidade média e direção) utilizadas para forçar o modelo são oferecidas juntamente com as saídas dos parâmetros de onda do WW3.

3.3 Descrição do software

O MATLAB (MATrixLABoratory) é um software interativo que possui uma linguagem de programação própria voltado para o cálculo numérico. O MATLAB processa diversos tipos de dados e possibilita a análise e visualização de dados, cálculos matemáticos, desenvolvimento de algoritmos, entre outras aplicações.

3.4 Conversão no formato dos dados

Os dados do modelo estavam no formato grib2, que se trata de um formato compactado que não pode ser lido no MATLAB. Por isso, eles foram transformados no formato NetCDF para facilitar sua manipulação no MATLAB. As saídas do WW3 foram baixadas e extraídas do website: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves>.

3.5 Processamento dos dados

A série global coletada foi de aproximadamente 11 anos, do período de 02/2005 a 12/2016, em que se investigou o clima de ondas na costa do Litoral Norte da Bahia. As grandezas físicas foram: direção e intensidade de vento a 10m da superfície do mar (U e V), altura de onda significativa, direção e período de pico de onda.

O processamento dos dados foi feito no MATLAB, onde se delimitou o domínio para o quadrante do oceano Atlântico Sul e foram calculadas médias diárias dos parâmetros em estudo. O cálculo das médias foi baseado no trabalho de Pereira &

Oliveira (2015), no qual se calculou a média para cada variável por todo o período de análise das previsões, a fim de eliminar os picos de alta frequência. As simulações foram coletadas em intervalo de 3 em 3 horas, em 00:00h, 03:00h, 06:00h, 09:00h, 12:00h, 15:00h, 18:00h e 21:00h para todos os dias do mês. As previsões de direção de pico da onda são fornecidas com o referencial de direção da convenção meteorológica. Assim, 0° representa N (norte) e os valores dos graus vão aumentando no sentido horário. Abaixo, segue uma tabela relacionando a direção da rosa-dos-ventos com a direção em graus:

Tabela 1. Conversão Meteorológica (ΦMET) com os valores em graus e nomenclatura da direção do vento (Fonte: <http://meteoropole.com.br/2014/01/vento-conversao-da-direcao/>).

| Abreviatura | Direção do vento | Graus |
|-------------|------------------|--------|
| N | Norte | 0° |
| NNE | Norte-Nordeste | 22.5° |
| NE | Nordeste | 45° |
| ENE | Leste-Nordeste | 67.5° |
| E | Leste (ou Este) | 90° |
| ESE | Leste-sudeste | 112.5° |
| SE | Sudeste | 135° |
| SSE | Sul-sudeste | 157.5° |
| S | Sul | 180° |
| SSW | Sul-sudoeste | 202.5° |
| SW | Sudoeste | 225° |
| WSW | Oeste-sudoeste | 247.5° |
| W | Oeste | 270° |
| WNW | Oeste-noroeste | 292.5° |
| NW | Noroeste | 315° |
| NNW | Norte-noroeste | 337.5° |

Além disso, para os parâmetros de onda, definiu-se um setor costeiro (12°S 36,5°W; 13°S 36,5°W; 12°S 37,5°W; 13°S 37,5°W), a fim de se obter representatividade da região. Situado entre a plataforma continental de Salvador e o talude, englobando o Litoral Norte da Bahia, foram calculadas médias da área dos parâmetros em estudo.

A caracterização do *swell* foi realizada considerando o período de pico de onda, no qual t_p deve ser igual ou maior que 9 segundos, pois esse critério foi empregado por Pond & Pickard (2005). Portanto, ondas com período menor que 9 segundos, do tipo *sea*, não são ondas de relevância para este trabalho específico. Após a separação por meio do período, selecionou-se a data ocorrida, velocidade

orbital, altura significativa, direção de pico da onda para esses *swell* e, em seguida, o número de *swell* foi contabilizado. Séries temporais foram construídas a fim de visualizar a chegada desses eventos.

Para complementar as saídas do WW3, foram coletadas as saídas da reanálise acoplada do NOAA do *Coupled Forecast and Reanalyses System* (CFSR) de pressão ao nível do mar. Foram baixados de forma similar aos dados anteriores, porém esses são produto do CFSR, provido de intervalo de tempo de 6 em 6 horas, em 00:00h, 06:00h, 12:00h e 18:00h para todos os dias (Vledder *et al.*, 2015).

As previsões baixadas pertenciam a uma grade global, no qual se delimitou o domínio para o quadrante do oceano Atlântico Sul nas análises objetivas de campo de vento e pressão reduzida ao nível do mar. Foi feita uma análise da passagem de frentes frias e da pista de formação das ondas, em diferentes regiões do Oceano Atlântico Sul, dentro do quadrante (10° N, 58° W, 65° S e 0°L), estudando o campo de pressão na superfície e a intensidade, direção e tempo de duração dos ventos, além da variabilidade de ambos. Definiu-se a pista de vento a partir do tamanho, direção e intensidade do vento de Sul, Sudoeste e Sudeste (latitudes maiores) e de leste e Nordeste (latitudes menores) (Campos, 2009). Verificou-se também a deflação ou deflexão dos ventos devido à força de Coriolis e quão associados estão os ventos fortes dos sistemas frontais, com o intuito de identificar padrões. Os campos foram médios diários e instantâneos para os horários 00:00h, 06:00h, 12:00h e 18:00h. As pistas foram analisadas para caso de *swell* no qual a altura significativa foi igual ou maior que a média sazonal, divididas em 2 médias, uma para a primavera-verão e outra para outono-inverno, feita para toda a série temporal. Baseado no trabalho de Campos (2009), classificou-se as pistas de ventos em 4 tamanhos. Primeiramente definiu-se 5 médias longitudinais, referente a três pontos de pressão, equidistante meridionalmente, onde os ventos estavam mais intensificados, formando tríades equidistantes, como apresentado na figura abaixo; o centro de pressão do ciclone e do anticiclone foi a base pra iniciar a tríade 0. O tamanho da pista, em graus de distâncias foi classificado de acordo com a diferença entre as médias dos campos de pressão e vento (Campos, 2009):

- Tamanho 1: é quando a diferença entre as médias do campo de pressão e vento da tríade 1 – 0 é maior em relação as demais, resultando em uma pista de dimensões de 5° de longitude e 17,5° de latitude.
- Tamanho 2: é quando a diferença dos campos de vento e pressão da tríade 2 – 1 é maior que os demais, resultando em uma pista de dimensões de 7,5° de longitude e 20° de latitude.
- Tamanho 3: é quando a diferença do campo de vento e pressão da tríade 3 – 2 é maior que as demais, resultando em uma pista de dimensões de 10° de longitude e 22,5° de latitude.
- Tamanho 4: é quando a diferença do campo de vento e pressão da tríade 4 – 3 é maior que as outras tríades, resultando em uma pista de dimensões de 12,5° de longitude e 25° de latitude.

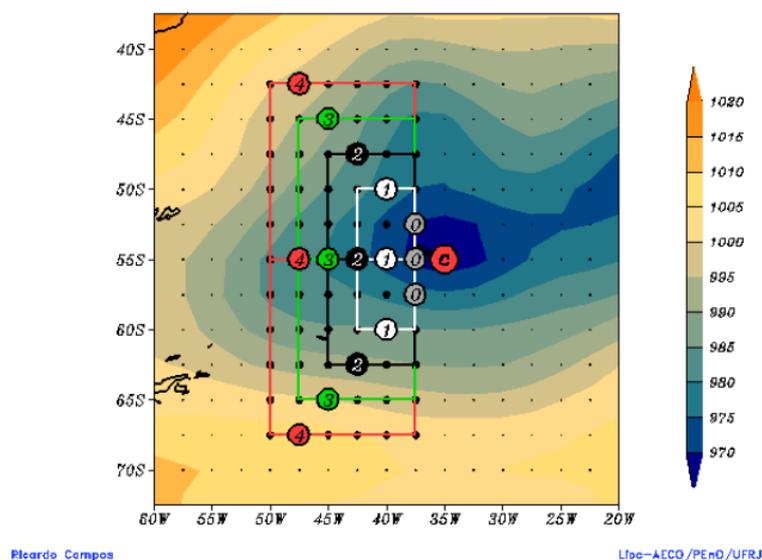


Figura 3. Tamanhos de pista de vento e pressão (Fonte: Campos, 2009).

Outros critérios para definição do tamanho da pista podem ser usados considerando a direção da pista, isto é, rotacionando a região de acordo com a direção do vento predominante. Mas não houve rotação da pista nesse trabalho.

É importante ressaltar que há uma defasagem no tempo das análises objetivas dos campos de vento e da identificação de *swell*. Logo, para avaliar os eventos de *swell*, foram investigados campos atmosféricos de dias pretéritos, variando entre uma semana a 3 dias antes. E a fim de ajudar na identificação das pistas de vento, que posteriormente provocarão o *swell*, utilizou-se a calculadora geográfica, produto do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial – INPE (<http://www.dpi.inpe.br/calcula/>), que converte os graus em quilômetros. Assim, a partir da distância das ondas de *swell*, das

pistas de ventos que foram identificadas e da velocidade de propagação do *swell*, estimou-se o tempo de propagação da onda da pista de vento até o Litoral Norte da Bahia.

3.6 Seleção dos casos

Neste trabalho, foram selecionados, primeiramente, os dias de ocorrência de *swell*. Eventos efêmeros com apenas um dia de duração foram desconsiderados. Posteriormente, confrontou-se a direção do trem de ondas com períodos iguais e/ou maiores que 9 segundos e com a direção da pista de vento, sendo que eventos com direções distintas foram descartados. Para os eventos extremos, foram classificados aqueles com altura significativa maiores que as médias sazonais da literatura (Pianca et al., 2010), em que, na primavera-verão, as ondas tinham que ser maiores que 2 metros e, no outono-inverno, maiores que 3 metros. E por fim, foram selecionados os tipos de fenômenos meteorológicos precursores das ondas. Assim, fenômenos com características específicas e com diferentes níveis de complexidade foram selecionados e agrupados e foi calculada a ocorrência em percentagem.

3.7 Comparação de dados *in situ* versus simulação do modelo WaveWatch III

As simulações do WW3 foram comparadas com os dados *in situ* do ADCP (Perfilador Acústico de Correntes), modelo Teledyne-RDI de 600 MHz, pertencente ao Programa de Pós-graduação em Geofísica da UFBA, situado na Praia do Forte, nas coordenadas geográficas de longitude 37° 58' 31.8" W e latitude 12° 3' 13.8" S, fundeado a 30 metros (Pires, 2017).

Os dados do ADCP empregados para comparação com as previsões do WW3 cobriram do período de novembro de 2014 até dezembro de 2016. Esses dados são periodicamente descarregados em um computador através de softwares fornecidos pela empresa fabricante (Teledyne). O tratamento dos dados foi realizado no software MATLAB. Os dados foram organizados em colunas e ajustados para as unidades do Sistema Internacional (Pires, 2017).

A variável de altura significativa foi coletada de 3 em 3 horas do ADCP (Pires, 2017).

Foram calculados o coeficiente de correlação linear ou Coeficiente de Pearson (r), que indica o quão associadas estão as variáveis observada e modelada, e o coeficiente de regressão linear (r^2), que indica o quão dependente a variável modelada pode estar da observada (Lira, 2004).

O valor de r está entre -1 e +1, $r = 0$ correspondendo à não associação.

Tabela 2. Guia de interpretação de correlação linear (Fonte: Lira, 2004).

| Valor de r (- ou +) | Interpretação |
|-----------------------------|------------------------|
| 0,00 - 0,19 | Correlação muito fraca |
| 0,20 - 0,39 | Correlação fraca |
| 0,40 - 0,69 | Correlação moderada |
| 0,70 - 0,89 | Correlação forte |
| 0,90 - 1,00 | Correlação muito forte |

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisadas as seguintes grandezas: altura da onda significativa, período de pico e direção da onda, intensidade e direção do vento e pressão na superfície do mar. Assim, com o processamento dos dados, obteve-se a série temporal para fevereiro/2005 a dezembro/2016.

Os dias de ocorrência de *swell* foram contabilizados e agrupados de acordo com mês, para todos os anos, considerando o período de aproximadamente 11 anos. Foi identificado um total de 1297 dias/*swell*, sendo que *swell* ocorridos em dias consecutivos foram agrupados em eventos/*swell*, obtendo um total de 284 eventos/*swell*, que variaram entre 2 a 8 dias consecutivos de ocorrência de *swell*, com uma média de 4,5 dias/*swell* para cada evento. Nos meses de outono, foram registradas as maiores ocorrências, com 484 dias/*swell*, seguido do inverno, com 375 dias/*swell*, e da primavera, com 302 dias/*swell*; os meses de verão tiveram pouca ocorrência (136 dias/*swell*) em relação às outras estações (Tabela 3). Dessa forma, foi caracterizada a entrada de *swell*, sendo que a direção de onda se deu principalmente de leste-sudeste, sudeste e sul-sudeste, com eventuais ocorrências de ondas de leste. Dentre os 284 eventos/*swell*, também foram identificados raros registros de ondas de sul, mas causados por fenômenos meteorológicos similares aos que serão citados.

Apesar da ocorrência de *swell* nos meses de verão (Tabela 3), o número foi reduzido, com pequenas alturas de onda e baixa potência energética se comparado com as outras estações do ano. No verão, há maior predominância de ondas de leste, leste/nordeste e nordeste, associadas aos ventos alísios de nordeste (Pianca et al., 2010), tendo uma configuração de direção de onda diferente dos casos apresentados.

Tabela 3. Total de ocorrências de *swell* para todos os meses e estações do ano.

| Estação do ano | Total de eventos para as estações | Direção da onda | Mês do ano | Eventos diários/ <i>swell</i> |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|------------|-------------------------------|
| Verão (DJF) | 136 | Leste | Dezembro | 46 |
| | | | Janeiro | 44 |
| | | | Fevereiro | 46 |
| Outono (MAM) | 484 | Leste - sudeste e sudeste | Março | 133 |
| | | | Abril | 151 |
| | | | Maio | 200 |
| Inverno (JJA) | 375 | Sudeste e sul-sudeste | Junho | 126 |
| | | | Julho | 136 |
| | | | Agosto | 113 |
| Primavera (SON) | 302 | Leste - sudeste | Setembro | 133 |
| | | | Outubro | 95 |
| | | | Novembro | 74 |

A altura significativa e período de pico de onda, plotada na série temporal, se localizaram a 12,5°S e 37,5°W, posição mais próxima do ADCP (Figura 3). As maiores alturas ocorreram principalmente nos meses de inverno, atingindo um pico máximo de 4,09 m, no dia 01 de julho de 2006, com média de altura de 2,03 m para todo o período (Figura 3). A média sazonal das alturas para primavera-verão foi de 1,50 m e para outono-inverno 2,55 m.

A maioria dos casos separados possui pelo menos um trem de ondas com altura significativa maior que a média sazonal calculada. Segundo Pianca *et al.* (2010), a altura para o setor leste (9°S – 33,75°W) tem a média de 1 – 2 m para primavera e verão e de 2 – 3 m para outono e inverno. A predominância de altura das ondas na costa nordestina de 1 – 2 m, havendo uma maior entrada de onda de 2 – 3 m durante o outono e o inverno, deve-se a entrada mais frequente de ventos fortes, principalmente de sudeste, em latitudes médias associados a sistema frontais.

A relevância dos resultados dos meses de outono e inverno tem a ver com a intensificação do gradiente de temperatura na atmosfera, devido ao resfriamento meridional em direção ao Polo Sul. Segundo Rodrigues *et al.* (2004), durante o inverno há maior ocorrência de frentes frias e penetração de sistemas frontais em regiões subtropicais do Atlântico Sul e do Oceano Atlântico Sul. Nessa época do ano, a função frontogenética é mais forte e há uma maior frequência de ciclogêneses, produção de frentes frias e ciclones, ou seja, maior probabilidade de geração de ondas de leste/sudeste, sudeste, sul/sudeste e eventualmente de sul. Durante os meses de maio a outubro, tem-se maior frequência de entrada de frentes frias em relação aos meses de dezembro a fevereiro. No verão, a atividade frontal permanece em latitudes mais altas e apenas resquícios das frentes frias conseguem penetrar em latitudes mais baixas.

Maiores períodos de pico também ocorreram no outono-inverno, com uma diferença suave em relação aos outros meses. O valor de período de pico máximo foi 18,1 s, no dia 03 de junho de 2016, com média de 8,5 s para todo o período de tempo. E média sazonal de primavera-verão de 6,5 s e de outono-inverno de 11,5 s. Segundo Pianca *et al.* (2010), no setor leste, os períodos médios variam, na primavera-verão, entre 6 e 8 s e, no outono-inverno, entre 8 e 12 s.

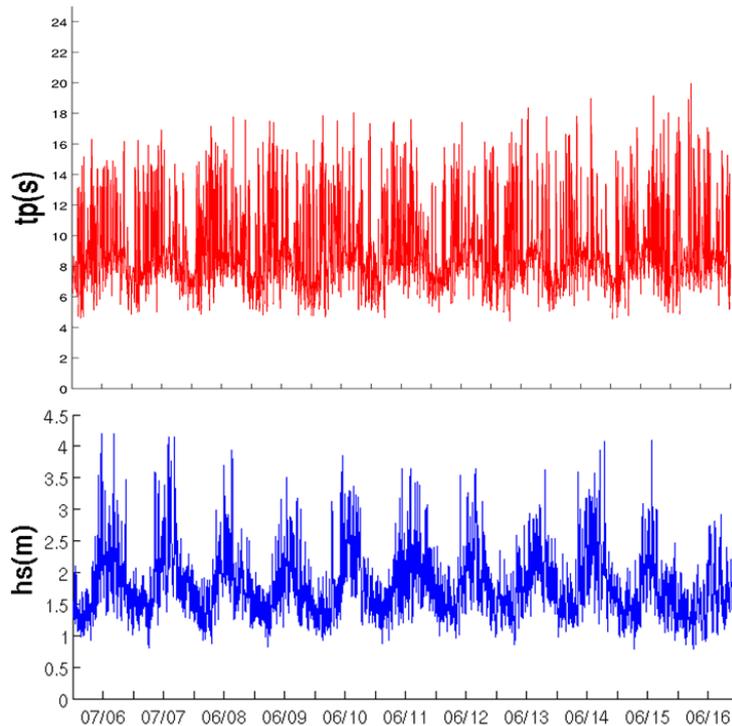


Figura 4. Período de pico (T_p (s)) em vermelho e altura significativa de onda (h_s (m)) em azul, plotado nas coordenadas de $12,5^\circ\text{S}$ e $37,5^\circ\text{W}$ para os anos 2005 a 2016.

Após identificar os eventos de *swell*, investigaram-se quais os fenômenos que poderiam estar gerando a pista de onda. Os padrões de ventos similares foram agrupados; dentre os padrões encontrados, é possível citar: ventos ciclônicos, ventos anticiclônicos, convergência de ventos e intensificação dos ventos alísios.

Foram avaliados os padrões de pista gerados pela passagem da frente acompanhada de ciclone e perturbação dos ventos do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), por intensificação nos ventos alísios (vento de leste), convergência dos ventos entre a circulação ao redor do centro de alta pressão e baixa pressão, ciclones tropicais e extratropicais, e anticiclones transientes.

Nas reanálises dos campos de intensidade de vento e pressão, foram observados giros ciclônicos associados à pista do *swell*. Há convergência com o ASAS ou anticiclones móveis, sendo esses principalmente extratropicais e pós-frontais, com visível aumento do gradiente de pressão. As passagens de giros ciclônicos e centros de baixa pressão que acompanharam a frente fria foram predominantes na formação de pista de ventos. Os ventos ciclônicos, estatisticamente, foram as maiores geradoras de pistas de vento, localizadas maioritariamente entre o quadrante de 45°S a 15°S e 36°W a 5°W .

As pistas formadas pela intensificação dos ventos alísios que, em sua maioria, foram energizadas pela passagem da frente ou anticiclones móveis, tiveram ventos moderados se comparados aos eventos de ciclones. O quadrante de pista de vento que esteve preponderante ficou entre 11°S – 41°S e 3°W – 34°W.

Foram 284 casos de eventos/swell analisados e, através da investigação dos campos de ventos e pressão, foram selecionados os fenômenos geradores de *swell*. As pistas de vento foram ocasionadas em 36,4% dos casos por ciclones, 30,2% por convergência de ventos do centro de baixa pressão com de alta pressão, 26,5% por intensificação dos ventos alísios e 6,9% por anticiclones transientes.

A média da magnitude do vento, calculada espacialmente na pista de vento para todo o período de tempo em que ocorreu o evento, teve como máximo 20 m/s para os fenômenos mais energéticos. Para os eventos mais moderados ficou aproximadamente em 16 m/s (Tabela 4). Houve a persistência dos sistemas frontais por alguns dias antes da chegada do *swell*, seguida por frontólise no dia em que a onda chegou ao Litoral Norte ou mesmo dias depois. Assim, percebeu-se uma forte relação entre a presença dos sistemas frontais e a formação do *swell*. O estudo de casos e identificação de padrões do sistema atmosférico – oceânico pode oferecer informações para a previsibilidade de curto-prazo da chegada de *swell* no norte do litoral da Bahia.

Tabela 4. Padrões de vento e os valores médios da posição, tamanho, velocidade, direção e duração dos ventos.

| Padrão de vento | Posição média da pista | Tamanho médio da pista | Velocidade média dos ventos (m/s) | Direção dos ventos | Duração média (dia) |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--|----------------------------|
| Ventos ciclônicos | 22°W - 34,5°W e 20°S - 45°S | 4 | 20 | Sudeste, sul/Sudeste e sul | 3 |
| Ventos anticiclônicos | 18°W - 30,5°W e 22°S - 47°S | 3 | 18 | Leste, leste/sudeste, sudeste, sul/sudeste e sul | 3 |
| Convergência dos ventos | 15°S - 45°S e 32,5°W - 20°W | 4 | 20 | Leste, leste/sudeste, sudeste, sul/sudeste e sul | 3 |
| Intensificação dos alísios | 12°W - 24,5°W e 11°S - 36°S | 3 | 16 | Leste, leste/sudeste e sudeste | 5 |

Em seguida, serão discutidos alguns dos casos que foram selecionados, a fim de demonstrar os padrões predominantes no Atlântico Sul seguindo a ordem decrescente da frequência de ocorrência dos eventos geradores de *swell*, sem seguir

uma ordem cronológica. Por isso, o primeiro caso apresentado será de formação ciclônica e por último giro anticiclônico.

4.1 Evento de Ciclone Subtropical

A pista de vento que provocou as ondas de *swell*, nos dias 21 a 28 de abril de 2008, foi formada em dias anteriores e perdurou nos primeiros dias da chegada do trem de ondas. Foram 7 dias de ocorrência de *swell*, com período de 9,52 a 15,23 segundos (Tabela 5). O tempo de deslocamento do primeiro trem de ondas a partir da zona de formação foi 2 dias e 1 hora, percorrendo cerca de 3643 km até chegar a costa da Bahia. As direções de onda predominaram de sudeste e sul-sudeste, mas também ocorreu oscilação de leste-sudeste (Tabela 5). Essas ondulações foram associadas a um ciclone gerado no sul da América.

As alturas significativas da onda não superaram a média sazonal estipulada por Pianca et al. (2010), nem a calculada neste trabalho (Figura 5). Dessa forma, acredita-se que, apesar do evento de *swell*, a onda se conservou sem anomalia ou sem características de ondas próximas do valor máximo de 4 metros, no inverno de 2006 (figura 4).

Subdividindo os períodos, percebeu-se que as ondas com os períodos de 13,5 – 15 segundos, vieram de sul-sudeste; 10,6 – 13,3 segundos, ondas de sudeste; de 9 – 10 segundos, ondas de leste-sudeste. Logo, as direções de ondas corroboram a entrada do ciclone. Devido a distância, a defasagem das ondas em relação ao tempo do ciclone foram de 2 dias; assim, a agitação ocasionada desde o dia 18 já influenciava a pista de vento, que só veio ser favorável a entrada de ondas no Litoral Norte da Bahia no dia 20.

Tabela 5. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda.

| Data | Período de pico (s) | Direção de pico de onda (°) | Altura significativa de onda (m) |
|------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 21/04/2008 | 13,03 | 144,15 | 1,34 |
| 22/04/2008 | 9,52 | 112,93 | 1,41 |
| 23/04/2008 | 10,64 | 135,13 | 1,64 |
| 24/04/2008 | 14,19 | 167,55 | 2,09 |
| 25/04/2008 | 15,23 | 159,11 | 1,90 |
| 26/04/2008 | 13,52 | 159,21 | 1,46 |
| 27/04/2008 | 12,12 | 157,18 | 1,44 |
| 28/04/2008 | 13,89 | 166,06 | 1,54 |

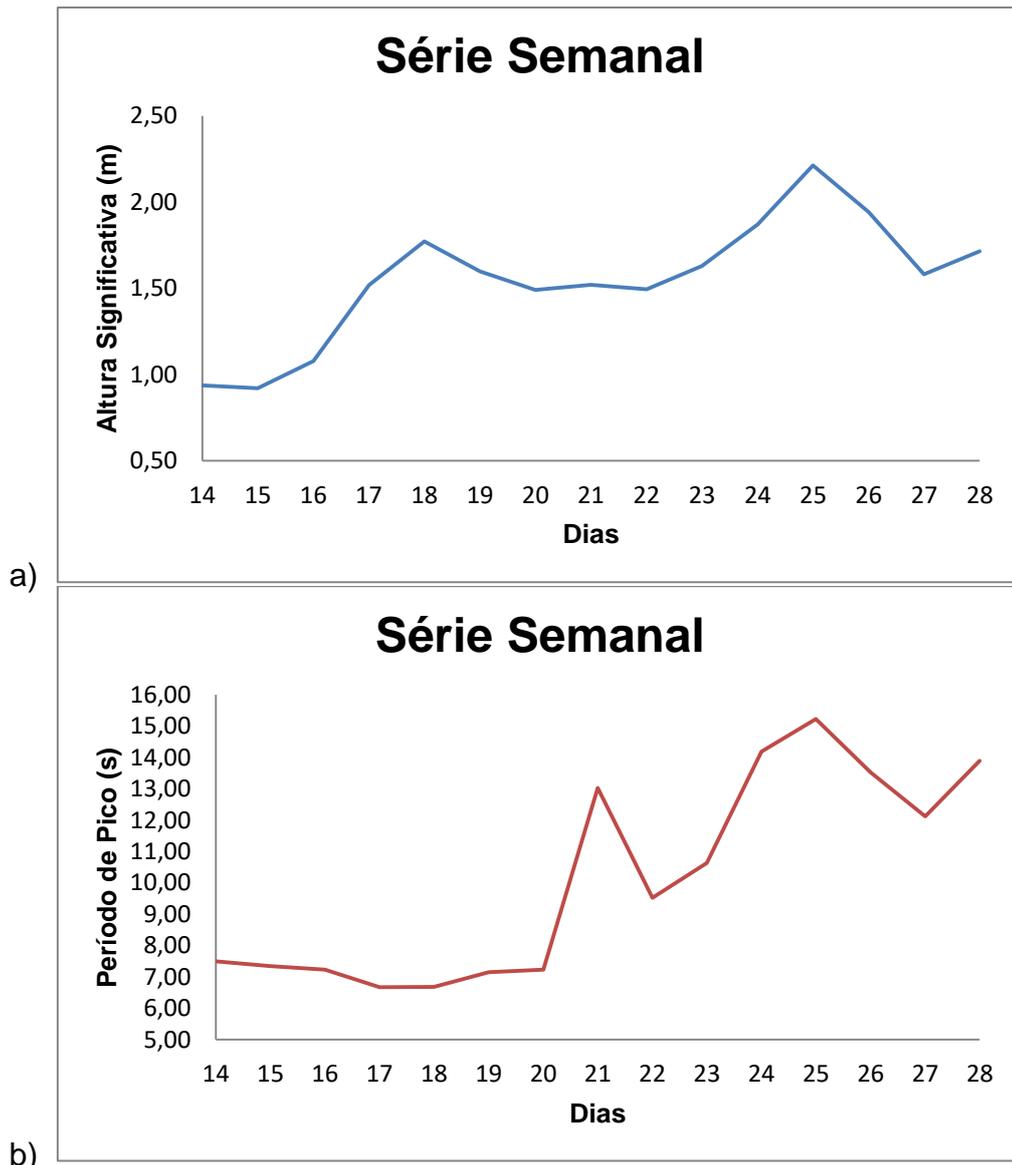
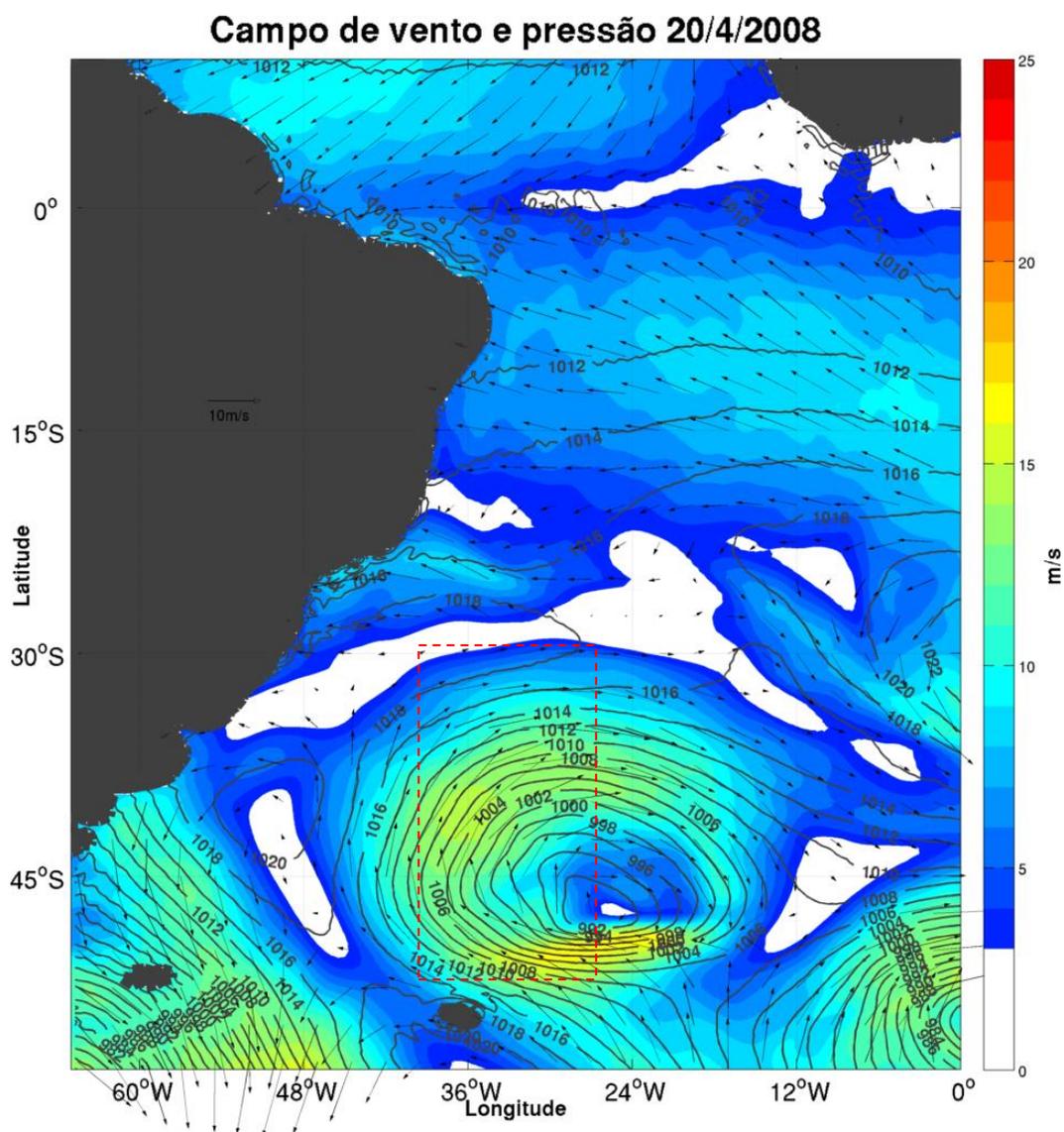


Figura 5. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do *swell* litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 21 de abril de 2008). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de abril de 2008.

A pista de vento móvel foi formada por um centro de baixa pressão oriundo na Argentina com deslocamento de sudoeste para leste, com formação no dia 18/04/2008, mas com posição favorável a pista de vento nos dias 20 e 21/04/2008 e dissipação 22/04/2008 (Figura 6), e com velocidade média dos ventos 23 m/s. A pista situou-se no lado esquerdo do centro de baixa pressão, que possuía pressão mínima de 986 hPa, centrado nas coordenadas: 47°S e 24°W, dia 20, 47°S e 18°W, no dia 21 e 45°S e 12°W, no dia 22, que foram os dias propensos a formação de pista de *swell* no Litoral Norte da Bahia. A pista provocada por esse fenômeno foi de grande extensão e ventos fortes, tendo um pico de velocidade dos ventos de 25 m/s, a sudoeste do centro da baixa pressão, que estava situado nas coordenadas de 47° S e 18°W, no dia 21. O tamanho de pista foi 4, situando-se no quadrante: 24°W – 36,5°W e

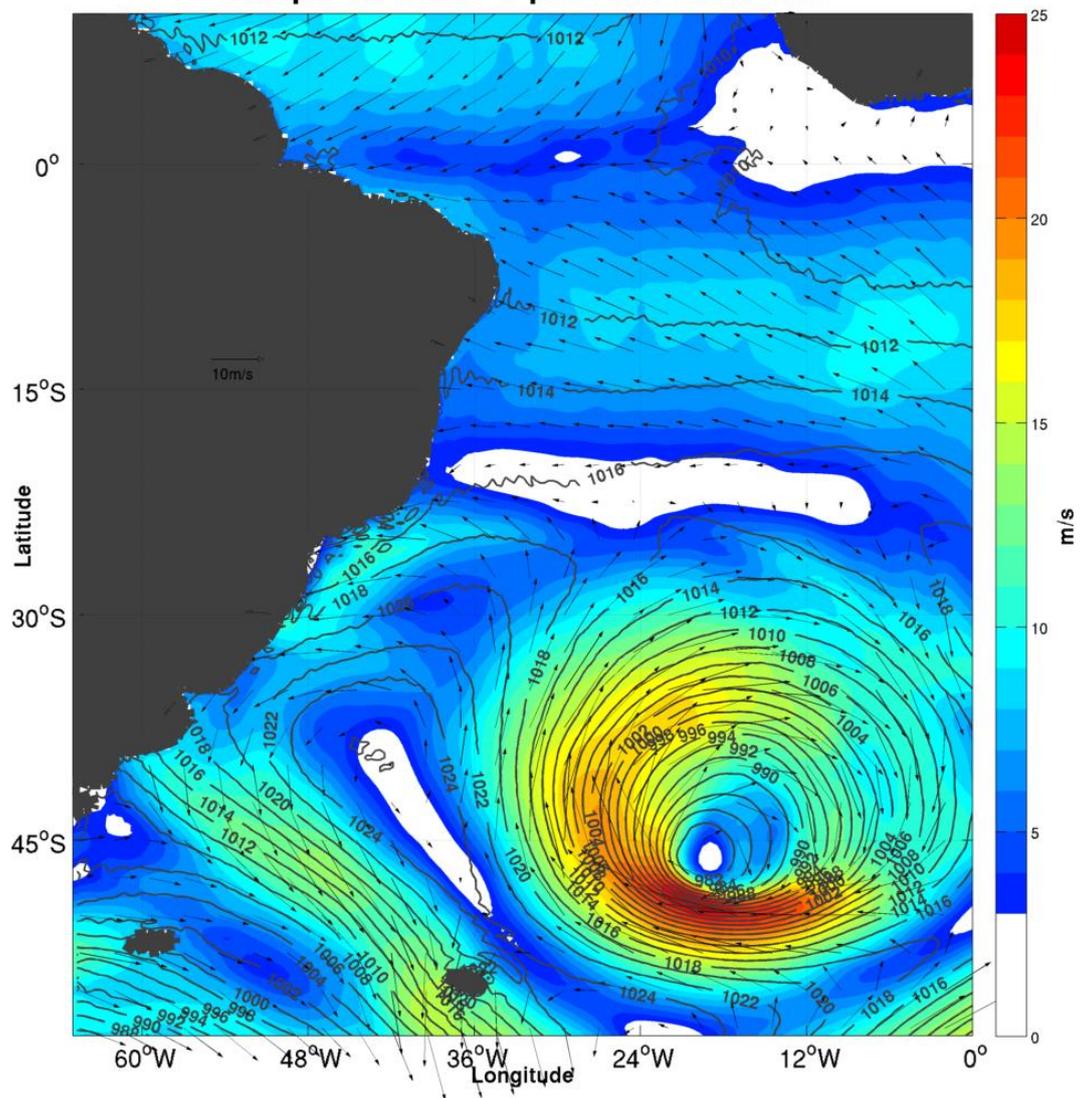
30°S – 55°S, no dia 20 e nos dias 21 e 22, a pista foi de tamanho 3 com dimensões de 14°W – 24°W e 29°S – 51,5°S.

Os ciclones são classificados de acordo com a ciclogênese, área de atuação, tempo de vida e das forças que os mantém (Rocha et al., 2016). No caso estudado, trata-se de ciclone subtropical, que gerou um cavado, mas não a frente fria (Rocha et al., 2016). Segundo Rocha et al. (2016), nos meses de abril, os giros ciclônicos permanecem em uma área maior do Atlântico Sul, assim há uma área maior de anomalia no gradiente de pressão. A combinação das áreas de convergência, entre o ciclone e a ASAS causam o escoamento dos ventos intensos. A formação do cavado junto com o centro de baixa pressão foram responsáveis por propiciar o aparecimento da pista de vento (Rocha et al., 2016).

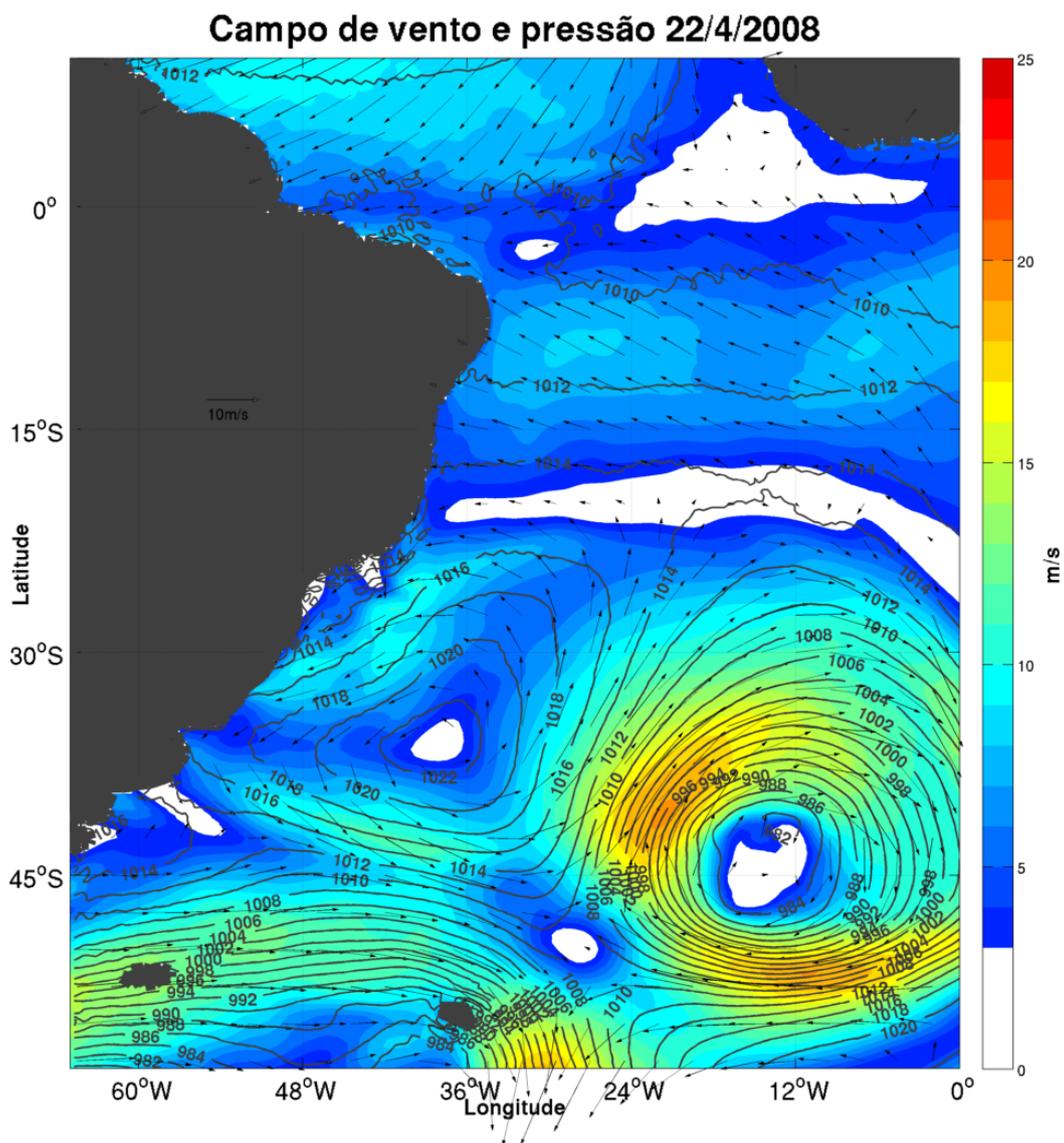


(a)

Campo de vento e pressão 21/4/2008



(b)



(c)

Figura 6. Campo de vento e pressão dos dias (a) 20, (b) 21 e (c) 22 de abril de 2008. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento.

4.2 Evento com 2 Ciclones Extratropicais

O *swell* atingiu a costa da Bahia nos dias 13 a 17 de maio de 2008, com 4 dias de ocorrência, com períodos de pico de onda entre 10,17 – 12,33 segundos. A pista de vento foi formada em dias anteriores, dissipando-se após o primeiro dia da entrada de onda. O primeiro trem de ondas chegou depois de 3 dias e 12 horas, percorrendo cerca de 3479 km até o Litoral Norte da Bahia, com direções de onda predominantemente de sudeste e também de sul-sudeste (Tabela 7).

O primeiro evento meteorológico, a chegada do primeiro ciclone no Oceano Atlântico Sul, ocorreu na semana anterior à entrada do primeiro trem de ondas. As

perturbações oceânicas foram associadas à chegada de 2 ciclones extratropicais acompanhados de uma frente fria. O primeiro sistema se deslocou para as regiões oceânicas, dissipando-se no dia 11. A segunda frente entrou no oceano dias depois da primeira, dissipando apenas no dia 13, ou seja, no mesmo dia que chegou o primeiro trem de ondas à costa baiana. Os períodos de pico de onda dividiram-se entre 11 – 12 segundos, em ondas de sudeste, e 10 – 10,5 segundos, em ondas de sul-sudeste, mostrando que as direções de onda coincidiram com a trajetória dos eventos geradores de oscilações marítimas.

As alturas significativas de ondas atingiram alturas superiores à média calculada e a descrita em literatura (Pianca et al., 2010), nos três primeiros dias de ocorrência de *swell* (Figura 7).

Tabela 6. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda.

| Data | Período de Pico (s) | Direção de pico de onda (°) | Altura significativa de onda (m) |
|------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 13/05/2008 | 10,17 | 160,68 | 2,87 |
| 14/05/2008 | 12,33 | 154,02 | 2,74 |
| 15/05/2008 | 11,75 | 149,87 | 2,79 |
| 16/05/2008 | 11,27 | 148,01 | 2,38 |
| 17/05/2008 | 11,06 | 147,13 | 2,02 |

A pista formada ao lado esquerdo do ciclone iniciou com formação meandrante sobre o oceano e, posteriormente, formação do giro ciclônico centrado em 29°S e 47°W no dia 04/05/2008, acompanhado de uma frente fria à esquerda, permanecendo a oeste e deslocando-se para sudeste até o dia 11/05/2008. No dia 07/05/2008, houve entrada de outro giro ciclônico extratropical centrado em 45°W e 48°S, deslocando-se de sudoeste para nordeste, fornecendo mais energia para a pista de vento, até o dia 13/05/2008 (Figura 8). Ocorreu um pico na velocidade dos ventos ciclônicos de 19 m/s, com o centro localizado em 37°S e 9°W, no dia 12. A pista de vento gerada por uma sucessão de dois centros de baixa pressão, centrados nas coordenadas de 35°S e 10°W e 33°S e 25°W, teve velocidade média dos ventos de 16 m/s e com pista extensa. A pista foi de tamanho 4, situada a 23,5°W – 36°W e 18°S – 43°S para o período de 4 dias de pista de vento.

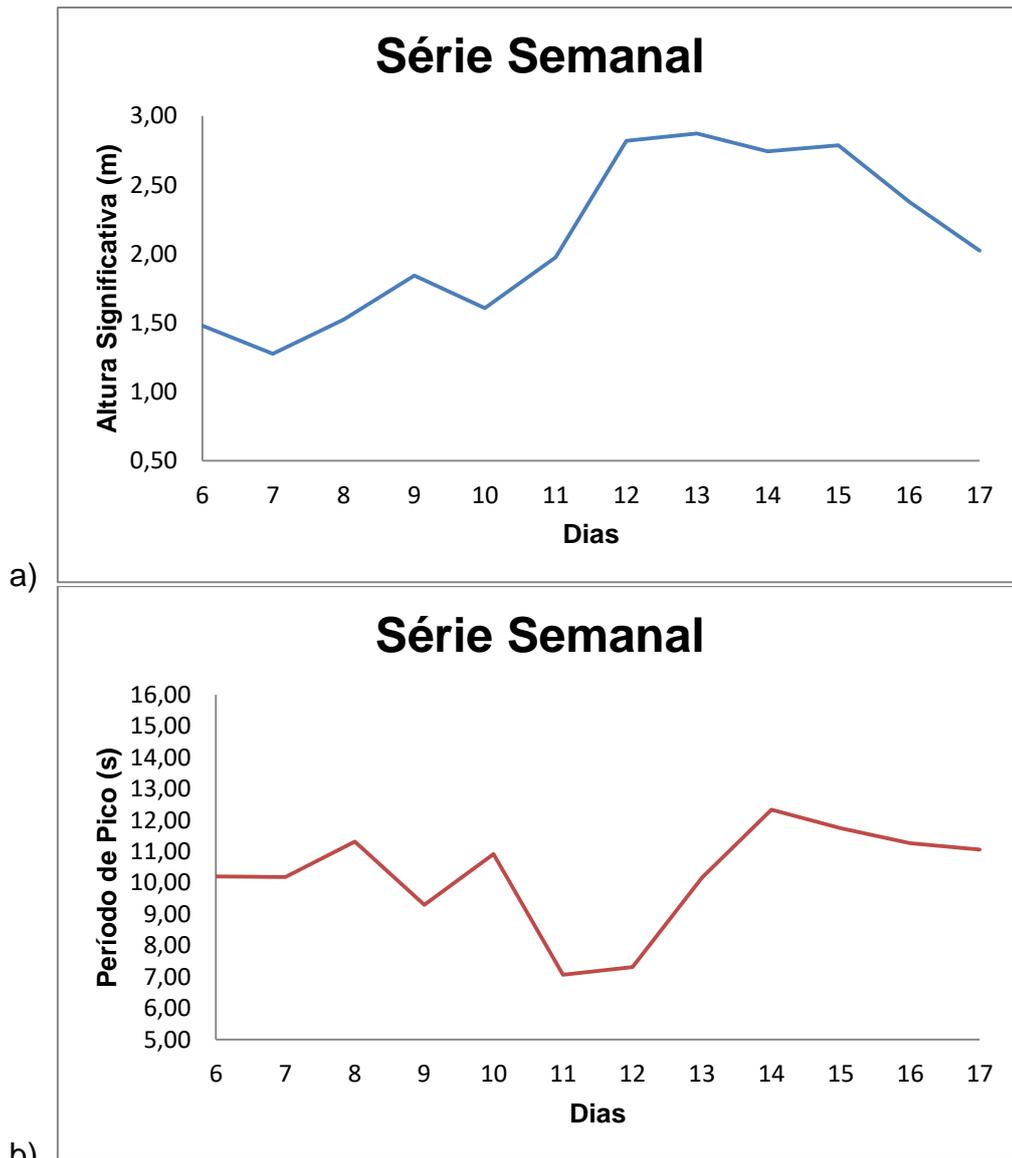
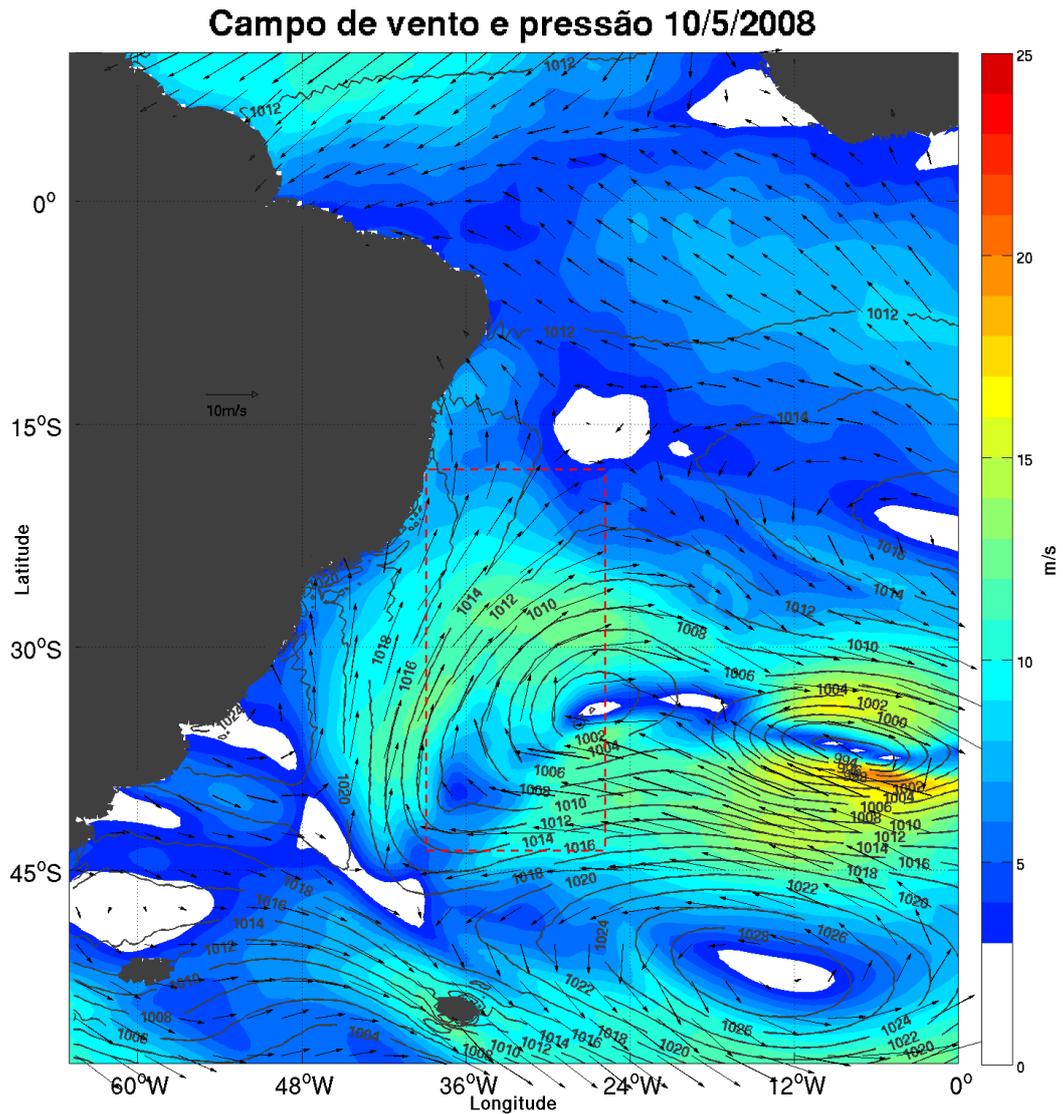


Figura 7. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do *swell* litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 13 de maio de 2008). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de maio de 2008.

A pista formada ao lado esquerdo do ciclone iniciou com formação meandrante sobre o oceano e, posteriormente, formação do giro ciclônico centrado em 29°S e 47°W no dia 04/05/2008, acompanhado de uma frente fria à esquerda, permanecendo a oeste e deslocando-se para sudeste até o dia 11/05/2008. No dia 07/05/2008, houve entrada de outro giro ciclônico extratropical centrado em 45°W e 48°S, deslocando-se de sudoeste para nordeste, fornecendo mais energia para a pista de vento, até o dia 13/05/2008 (Figura 8). Ocorreu um pico na velocidade dos ventos ciclônicos de 19 m/s, com o centro localizado em 37°S e 9°W, no dia 12. A pista de vento gerada por uma sucessão de dois centros de baixa pressão, centrados nas coordenadas de 35°S e 10°W e 33°S e 25°W, teve velocidade média dos ventos de 16 m/s e com pista

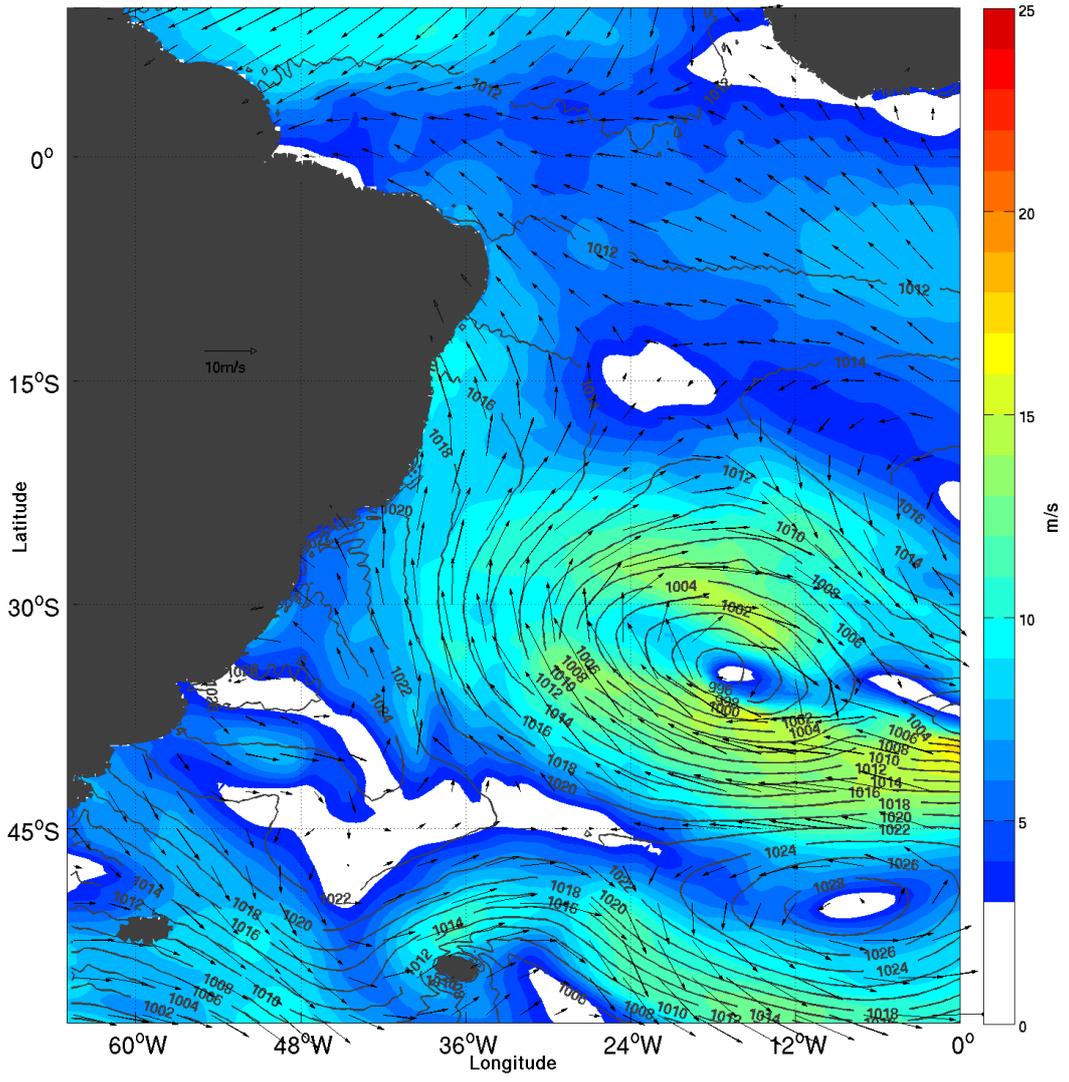
extensa. A pista foi de tamanho 4, situada a $23,5^{\circ}\text{W} - 36^{\circ}\text{W}$ e $18^{\circ}\text{S} - 43^{\circ}\text{S}$ para o período de 4 dias de pista de vento.

Segundo Rodrigues et al. (2004), nas estações mais frias, os ciclones possuem menor extensão, mas alta frequência de ocorrência, se comparado as estações mais quentes, com ocorrência mensal de 3 a 4 frentes. Como complemento, Escobar (2016) indica que a maior frequência frontogenética é entre maio e setembro.



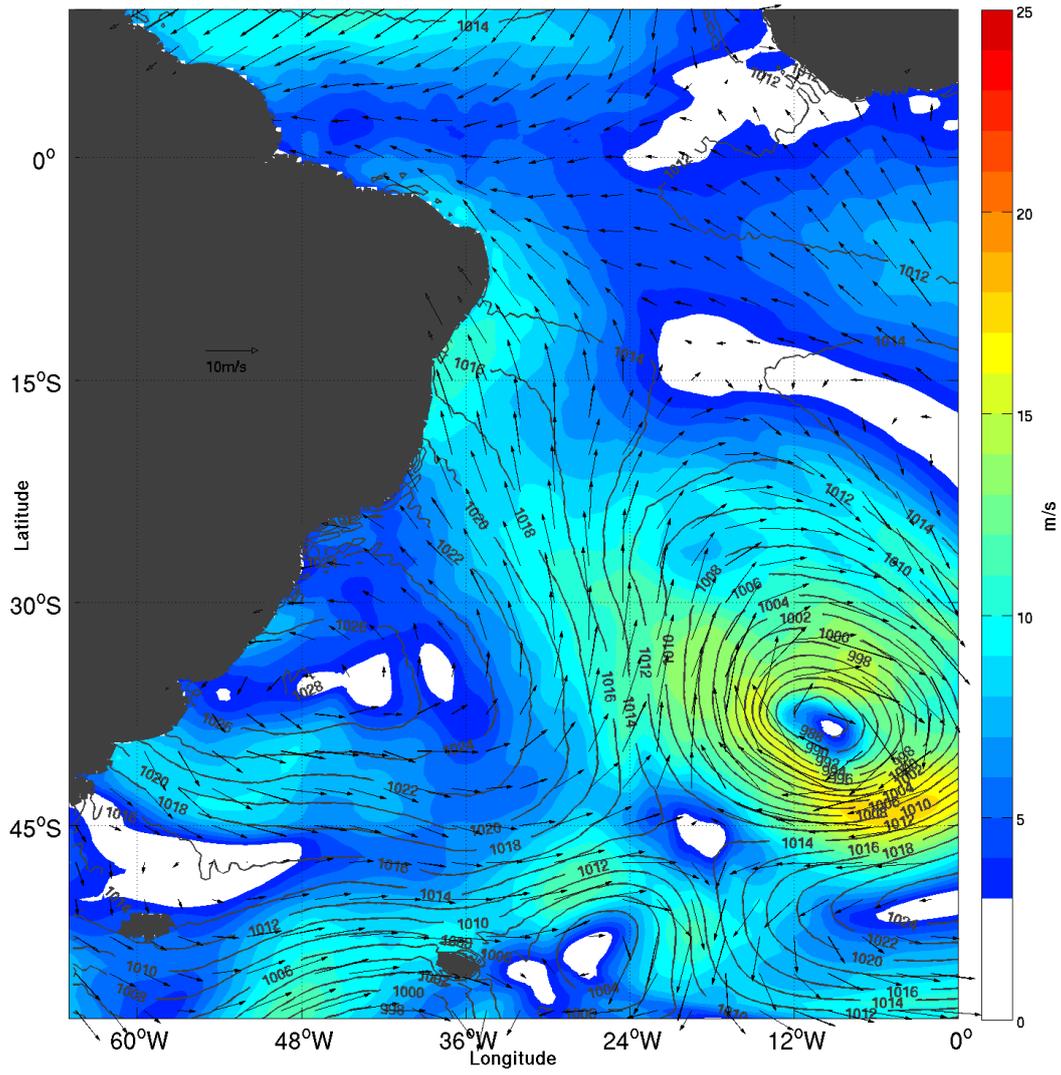
(a)

Campo de vento e pressão 11/5/2008

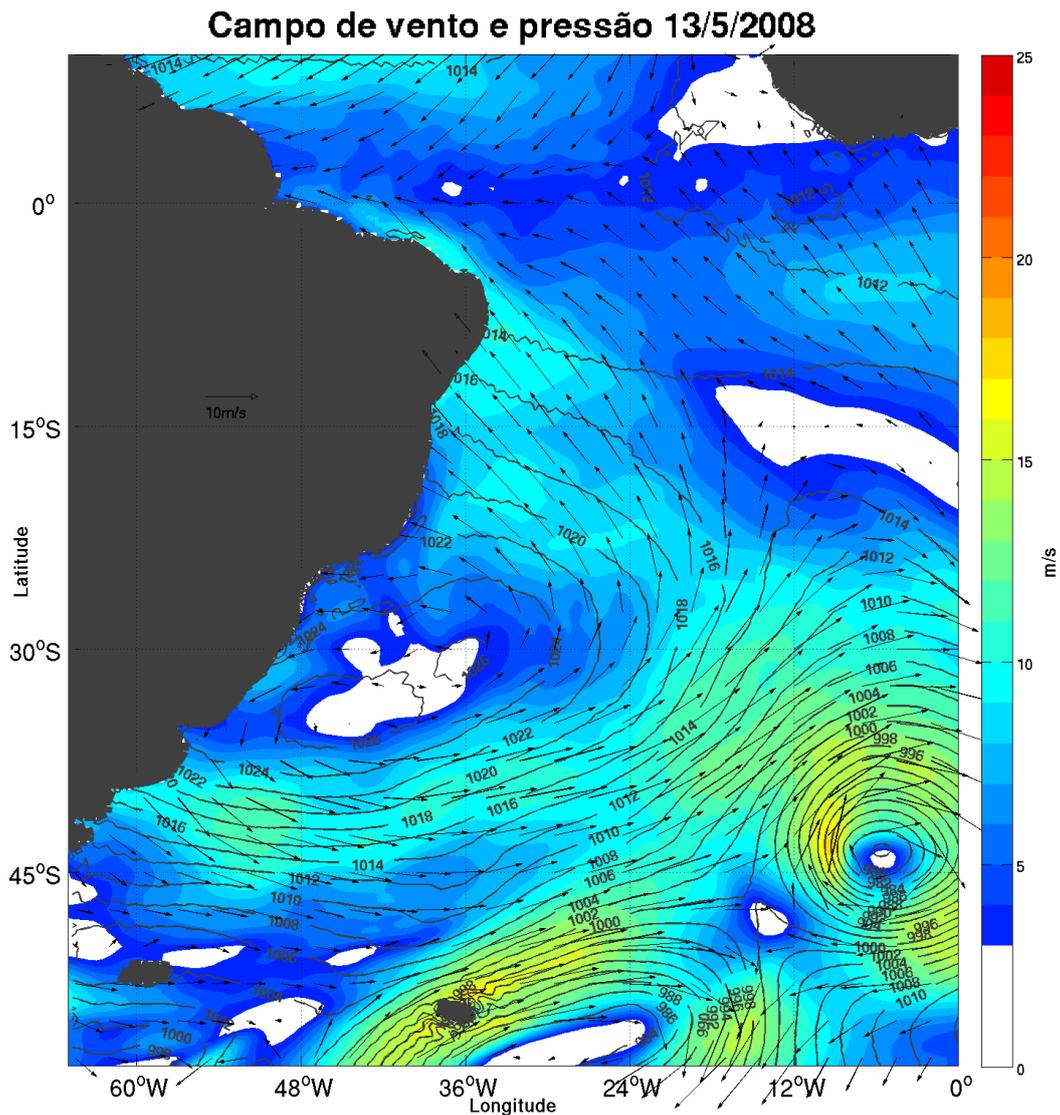


(b)

Campo de vento e pressão 12/5/2008



(c)



(d)

Figura 8. Campo de vento e pressão dos dias (a) 10, (b) 11, (c) 12 e (d) 13 de maio de 2008. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento.

4.3 Evento Convergência de Ventos

A pista de vento foi formada em dias anteriores e persistiu após a entrada do primeiro trem de ondas, que ocorreu depois de 2 dias. O *swell* se propagou por 3754 km até atingir a costa da Bahia. As direções de onda predominaram de sul-sudeste e em menor proporção de sudeste (Tabela 8). As ondulações chegaram ao Litoral Norte da Bahia nos dias 21 a 24 de maio de 2012 (Tabela 8), com 3 dias de ocorrência do *swell*. O período de pico de onda foi entre 9,86 e 12,36 segundos (Tabela 8), com chegada do evento meteorológico antecedendo 4 dias a entrada do primeiro trem de

ondas. As ondas, neste caso, estão associadas ao aparecimento da frente fria acompanhada de um giro ciclônico no Oceano Atlântico Sul convergindo com um anticiclone pós-frontal. O evento adentrou o oceano no dia 17, dissipando-se em dias posteriores a ocorrência do primeiro *swell* na costa norte da Bahia. A faixa de período de pico de 9,8 – 10 segundos foi das ondas de sudeste, e de 10,5 – 12,5 segundos foi das ondas de sul-sudeste (Tabela 7). As direções de ondas coincidiram com a trajetória do evento.

Além da complexidade da pista, as alturas de onda nos primeiros dias atingiram 3,47 e 3,34 m, caracterizando um evento extremo de onda, já que as alturas foram bem superiores à média dominante para o Nordeste, na literatura e calculada (Figura 9). Durante todo o evento, as alturas de onda foram superiores à média calculada, porém destacaram-se os primeiros dias. Segundo Young et al. (2013), ondas de superfície causada por ventos fortes podem ser caracterizadas como um evento extremo. E quanto maior a altura de onda, mais energética ela será, pois a energia é proporcional ao quadrado da altura significativa de onda (Pianca et al., 2010). Portanto, a identificação de pista de ondas com essas características são importantes para tentar se precaver aos impactos que essas podem causar.

Tabela 7. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda.

| Data | Período de pico (s) | Direção de pico de onda (°) | Altura significativa de onda (m) |
|-------------|----------------------------|------------------------------------|---|
| 21/05/2012 | 9,86 | 152,62 | 3,47 |
| 22/05/2012 | 12,33 | 158,26 | 3,34 |
| 23/05/2012 | 12,36 | 158,63 | 2,86 |
| 24/05/2012 | 10,67 | 157,88 | 2,66 |

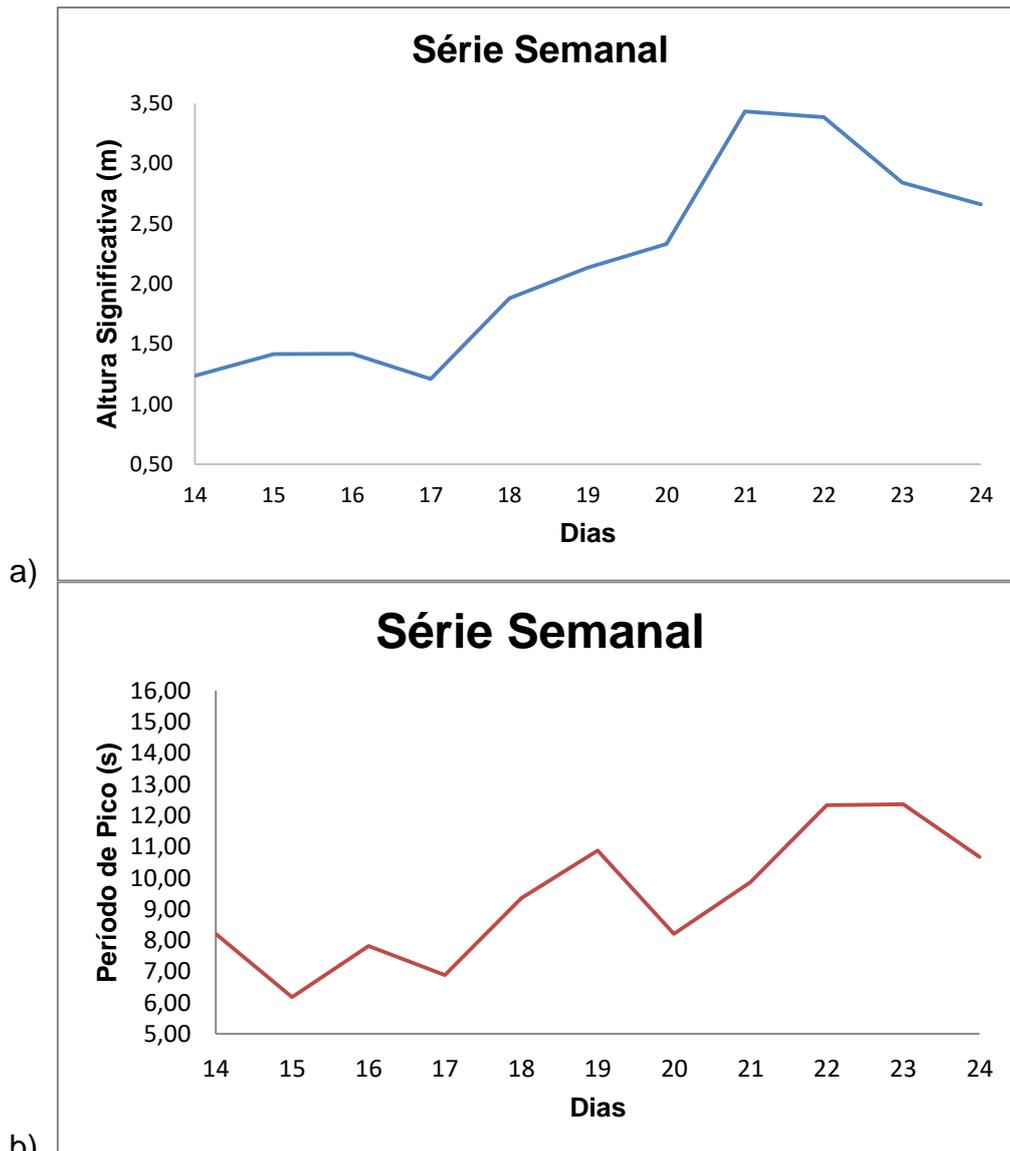
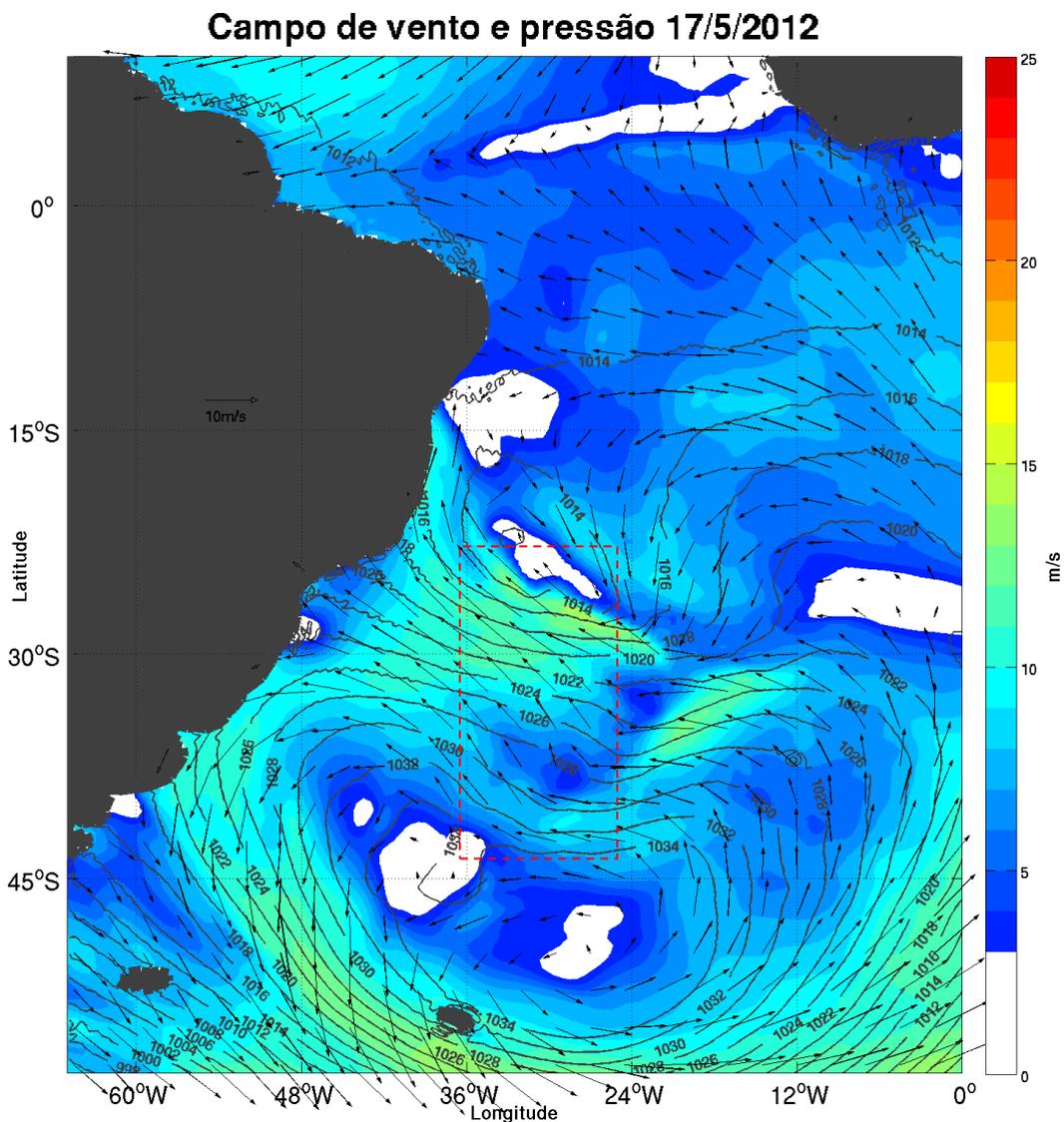


Figura 9. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do *swell* litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 21 de maio de 2012). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de maio de 2012.

A pista foi formada após a passagem da frente fria pela convergência dos ventos e intensificação dos alísios, centrado na alta pressão em 29°W e 52°S no dia 17/05/2012. O ciclone deslocou-se sobre o oceano de oeste para sudeste, dissipando-se dia 23/05/2012. O centro de baixa pressão localizou-se no meio do Atlântico, centrado em 35°S e 22°W, durante os dias 18 a 20 com intensificação dos ventos ciclônicos, atingindo velocidade média dos ventos de 21m/s (Figura 10). O pico de velocidade dos ventos ciclônicos foi de 23 m/s e ocorreu no dia 19, no lado esquerdo do ciclone. A pista foi de tamanho 4, situada no quadrante 23,5°W – 36°W e 17°S – 42°S, para os 4 dias em que a pista foi favorável para formação de *swell* que atingiu a costa da Bahia.

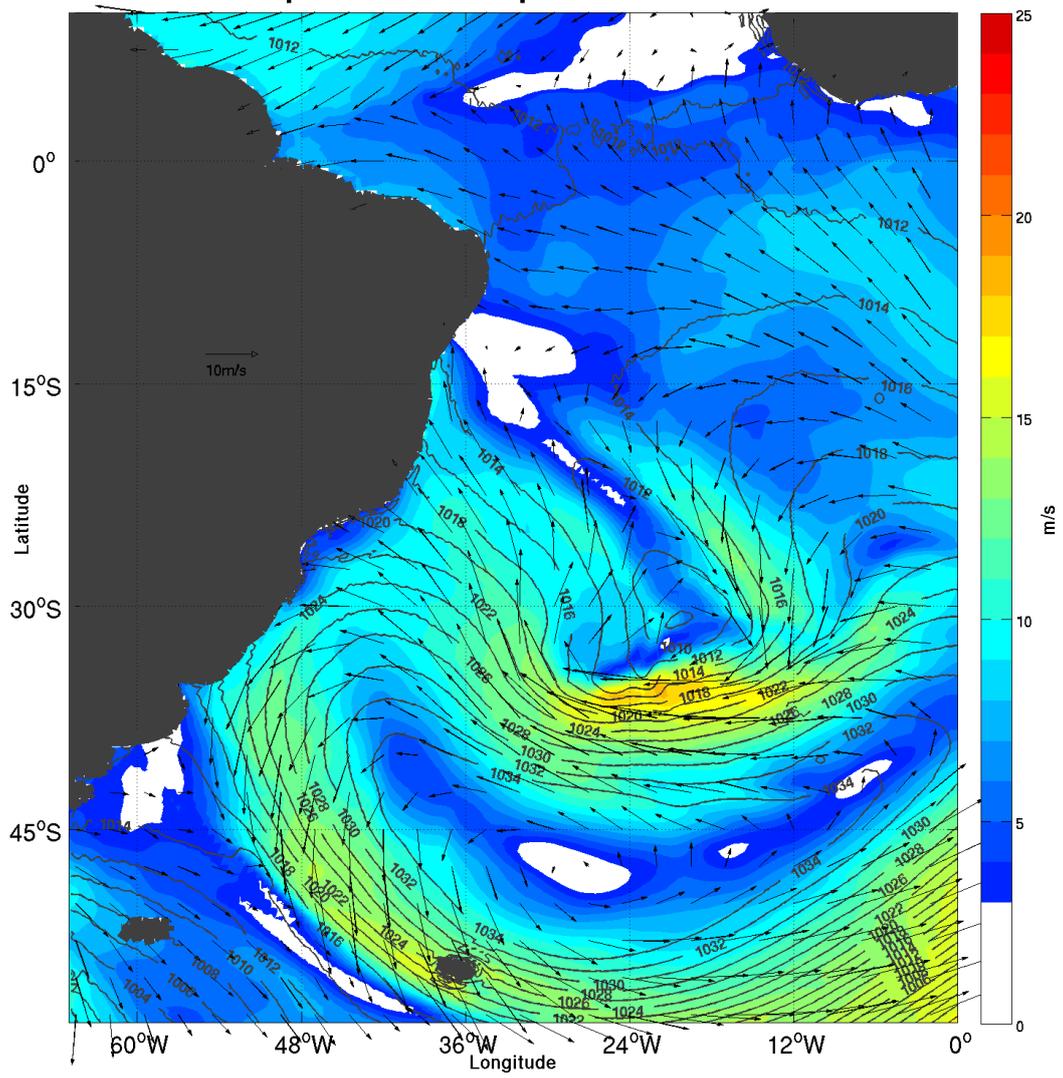
Segundo Carvalho (2013), dos meses de março a abril, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) desloca-se para 2°S podendo chegar a 5°S, o que interfere na posição do ASAS e faz com que o anticiclone semipermanente se posicione mais ao sul. O deslocamento para sul da ZCIT, junto com o sistema frontal forte que se deslocou para latitudes menores, foi responsável pela complexidade da pista de vento localizada a 17°S – 42°S e 23,5°W – 36°W.

A pista de onda foi grande e com velocidade de vento forte, produzindo maior capacidade de transferência de energia. Dessa forma, além da larga variação de período e altura de onda, pistas com essas características formam ondas dispersivas energéticas como foi o caso do evento anterior.



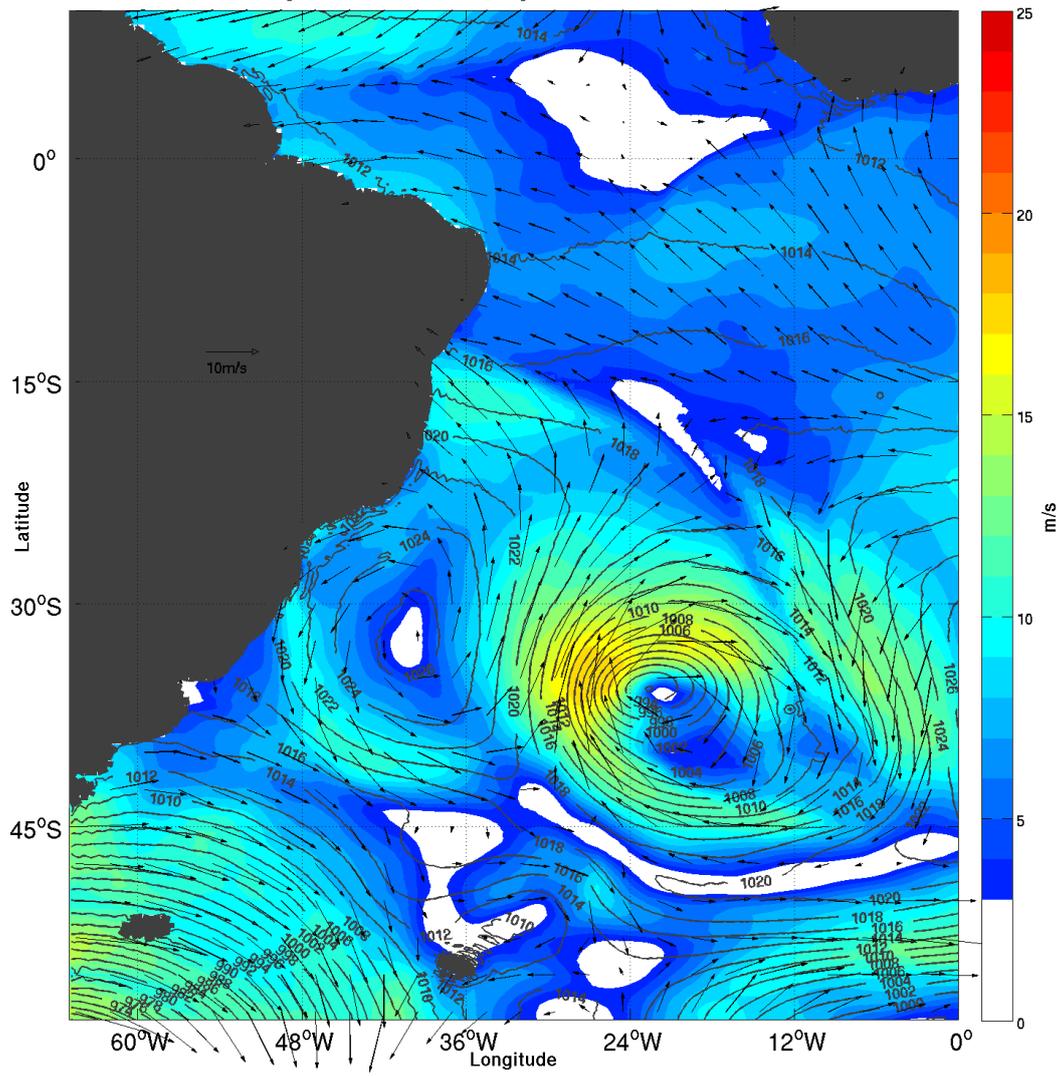
(a)

Campo de vento e pressão 18/5/2012



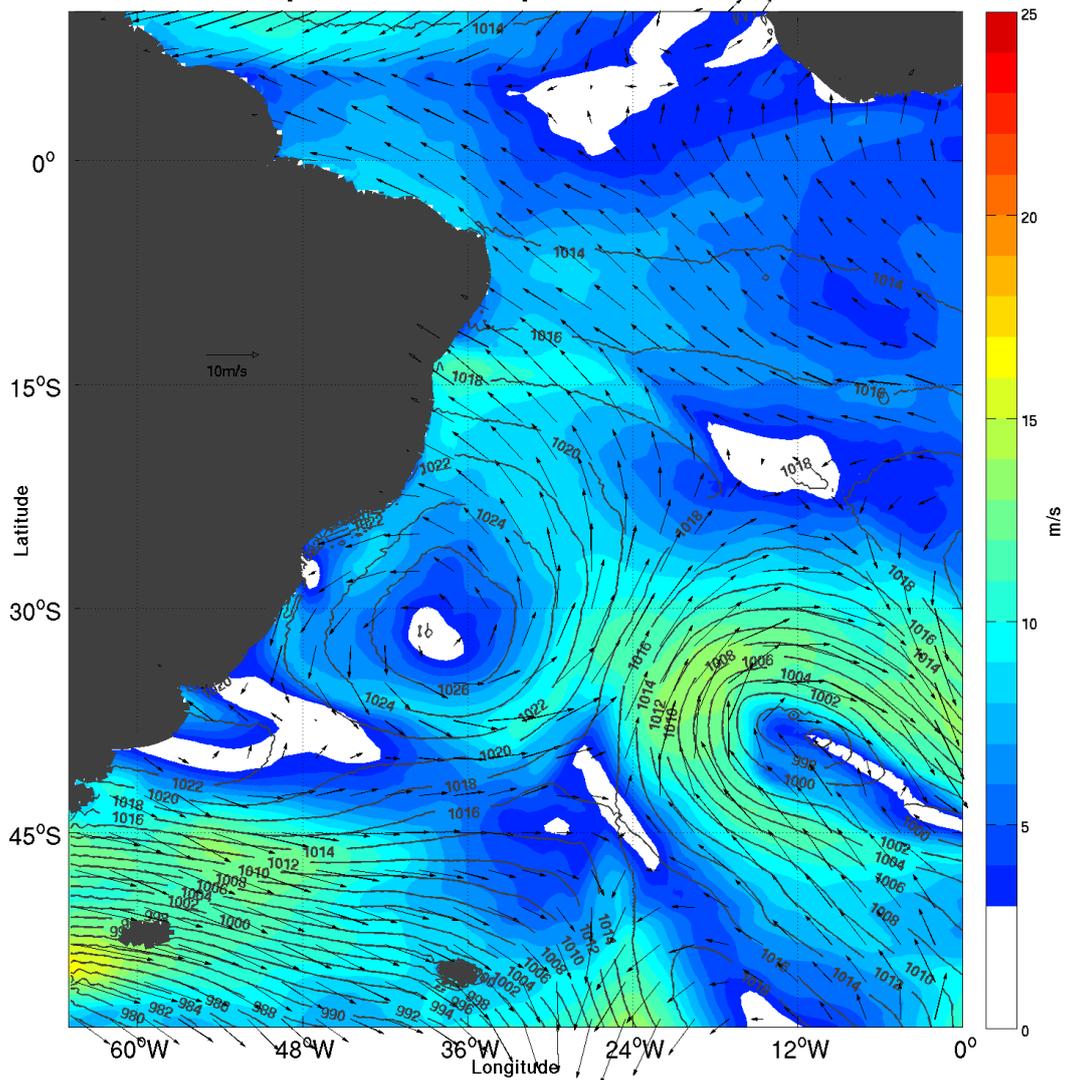
(b)

Campo de vento e pressão 20/5/2012



(d)

Campo de vento e pressão 21/5/2012



(e)

Figura 10. Campo de vento e pressão dos dias (a) 17, (b) 18, (c) 19, (d) 20 e (e) 21 de maio de 2012. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento.

4.4 Evento de Convergência de Ventos e Intensificação dos Alisios

A pista de vento que gerou as ondulações no Litoral Norte da Bahia foi formada nos dias 13 a 18 de maio de 2007, com 5 dias de ocorrência do *swell*. A pista ocorreu dias anteriores se relacionado ao primeiro trem de ondas, que chegou depois de 1 dia e 22 horas e percorreu cerca de 3061 km até chegar a Bahia. As direções de onda predominaram de sudeste, com uma parcela menor de sul-sudeste (Tabela 6).

O período de onda variou entre 9,42 – 12,35 segundos. As ondas ocorreram após uma semana desde o primeiro evento sinótico (Tabela 6). Essas ondulações

foram associadas a uma pista composta por uma convergência de ventos do anticiclone pós-frontal e do ciclone que acompanhava a frente fria, intensificação dos ventos alísios e convergência dos ventos ciclônicos com o giro anticiclônico. O primeiro sistema frontal do mês se dissipou no dia 06. Dos dias 07 a 09, prevaleceu a intensificação dos ventos alísios e, dos dias 10 a 12, houve outra frente fria que se desfez no dia 13. Os períodos de *swell* que atingiram o Litoral Norte da Bahia se dividiram em: de 9,4 – 11,6 segundos, ondas de sudeste e, de 11,5 – 12,4 segundos, ondas de sul-sudeste (Tabela 6). Assim, as direções de onda corroboram para a pista de vento que foi gerada nos últimos dias. As ondas adentraram a costa norte baiana depois de quase dois dias, sugerindo que a sucessão de eventos provocou a agitação do mar.

Como já foi citado, as maiores alturas significativas são observadas no outono-inverno. Essa série de ondas apresentou um pico na altura de onda de 3,04 m (Figura 11), ultrapassando a média sazonal, segundo Pianca et al. (2010), e a média calculada, nos dias 13 e 14 (Tabela 8). Assim como o período da onda, a altura significativa depende da transferência de momento e também está relacionada ao coeficiente de fricção e ao fluxo turbulento de momentum. Quanto maior o fluxo, maiores as ondas (Paskyabi et al, 2013).

Tabela 8. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda.

| Data | Período de Pico (s) | Direção de pico de onda (°) | Altura significativa de onda (m) |
|-------------|----------------------------|------------------------------------|---|
| 13/05/2007 | 10,26 | 145,21 | 3,04 |
| 14/05/2007 | 10,58 | 155,83 | 2,65 |
| 15/05/2007 | 9,42 | 136,89 | 2,21 |
| 16/05/2007 | 11,62 | 138,48 | 2,08 |
| 17/05/2007 | 12,35 | 159,04 | 2,13 |
| 18/05/2007 | 11,58 | 164,03 | 2,05 |

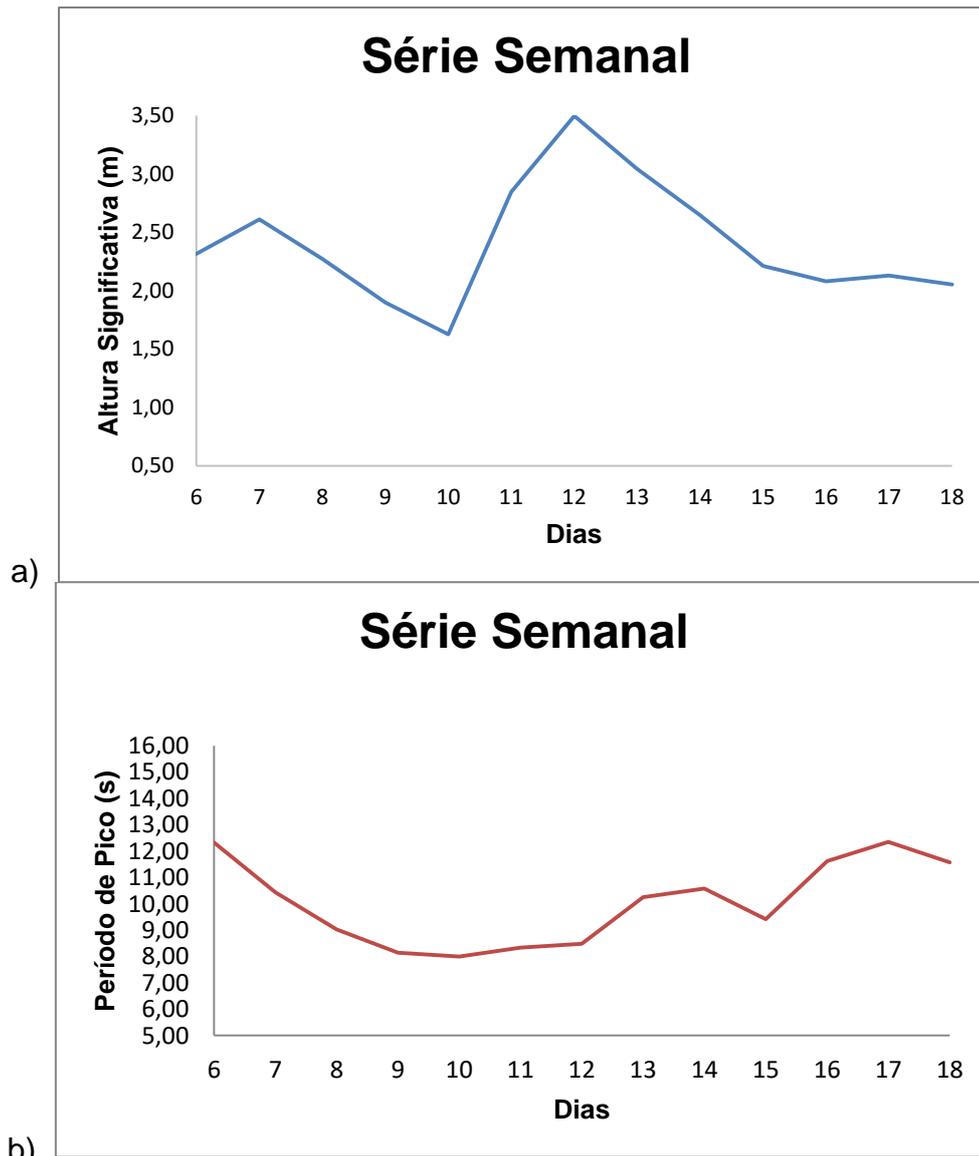


Figura 11. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do *swell* litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 13 de maio de 2007). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de maio de 2007.

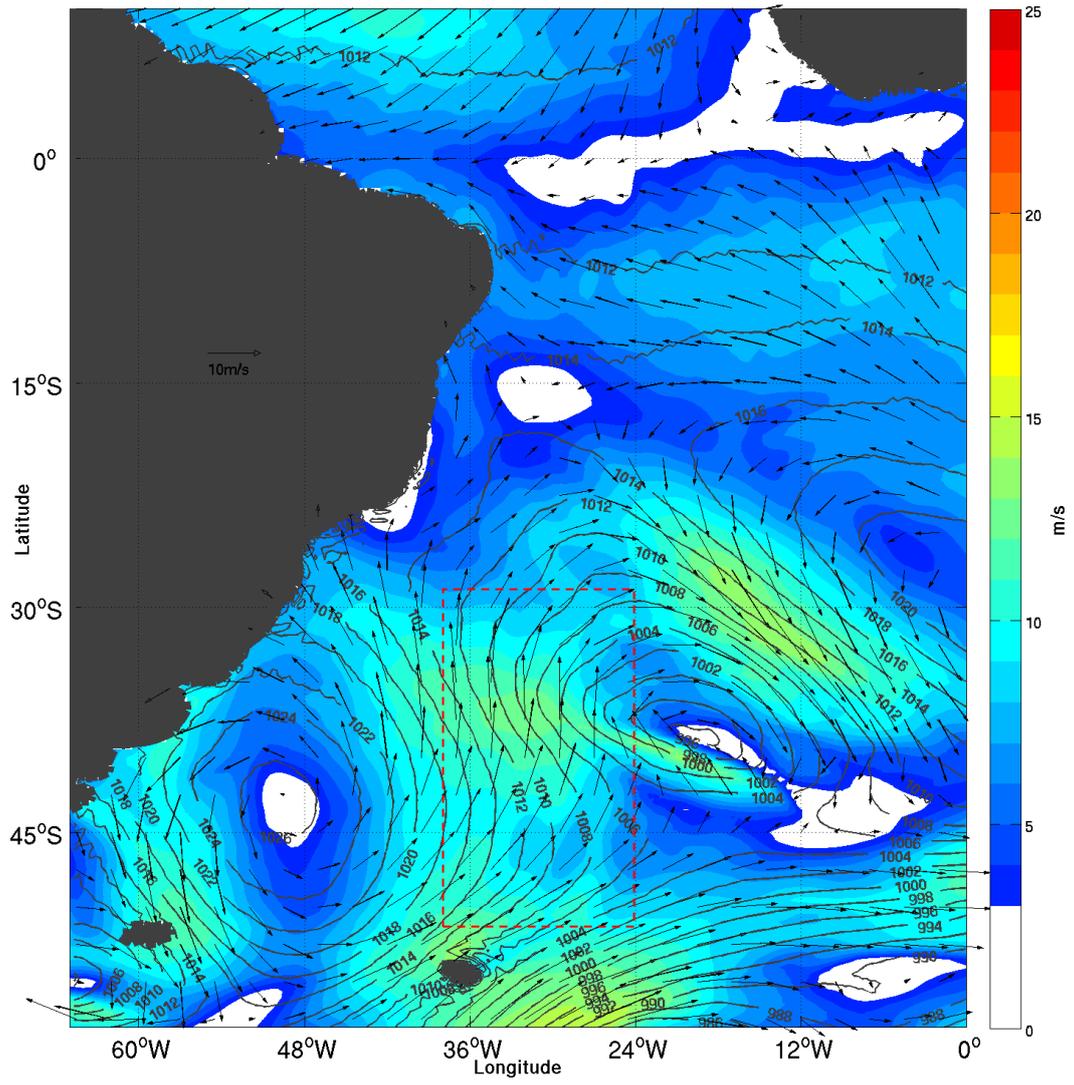
A pista ocorreu na região de convergência dos ventos entre os centros de alta pressão, com pressão máxima de 1025 hPa, localizado em 44°S e 48°W, e baixa pressão, com pressão mínima de 996 hPa, localizado em 41°S e 20°W, acompanhado da frente fria, no dia 03/05/2007, deslocando de noroeste para sudeste (Figura 12). A pista de vento durou de 03/05/2007 a 06/05/2007, com velocidade média dos ventos de 15 m/s, entre os centros. A pista de vento foi extensa e com ventos moderados, com um pico de velocidade do vento no dia 10, chegando a 18 m/s, com a baixa pressão, localizado em 33°S e 16°W, e alta localizada em 34°S e 54°W.

A primeira entrada da frente fria forneceu energia para intensificação dos alísios, situado entre 1°S e 28°S, contribuindo para pista de vento. No dia 06, outra

frente fria adentrou no oceano. Formou-se um ciclone com pressão mínima de 996 hPa, localizado em 28°S e 14°W, no dia 07, deslocando-se de sudoeste para sudeste e dissipação dia 12. Houve a convergência do giro ciclônico com o anticiclone pós-frontal, gerando a pista de vento favorável a formação de *swell* que se propaga para a Bahia, nos dias 10 a 12. A pista foi de tamanho 4, móvel, dias 03 e 04 situando-se em 22,5°W – 35°W e 25°S – 50°S; já nos dias 05 a 09, encontrava-se em 11,5°W – 24°W e 20°S – 45°S; e nos dias 11 e 12, pista em 23,5°W – 36°W e 12°S – 37°S.

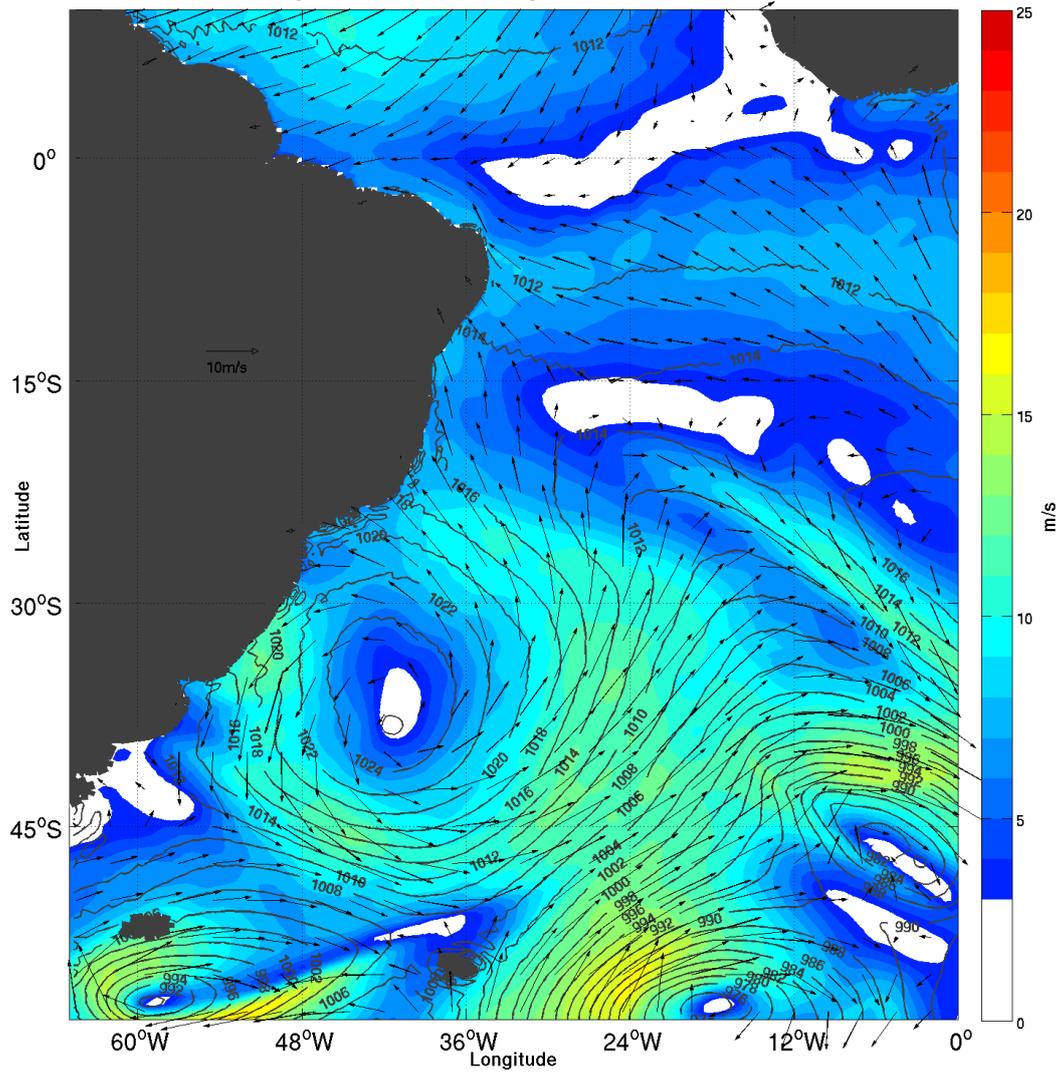
Segundo Lewis et al. (2014), os principais fenômenos meteorológicos que causam a climatologia das ondulações marítimas são os ciclones extratropicais, anticlones móveis e o ASAS, sendo que as ondas do ASAS são predominantemente de leste, enquanto os outros eventos são associados a ondas predominantemente de sudeste (Lewis et al., 2017). De acordo com Escobar et al. (2016), as frentes frias se deslocam com mais frequência para latitudes menores nos meses de maio a setembro, com trajetória média de propagação de sudoeste para nordeste. Segundo Saldanha et al. (2010), Berry et al. (2011), Pedroso et al. (2013) e Escobar et al. (2016), a região de forte frontogênese está entre o Rio Grande do Sul e a Patagônia Argentina. Isso ocorre, porque nessas latitudes se situam o Rio Grande do Sul e o Paraguai, onde se distinguem as massas de ar mais fria de Sul e mais quente do Norte, que se chocam e causam o contraste térmico (Saldanha et al., 2010; Berry et al., 2011).

Campo de vento e pressão 3/5/2007



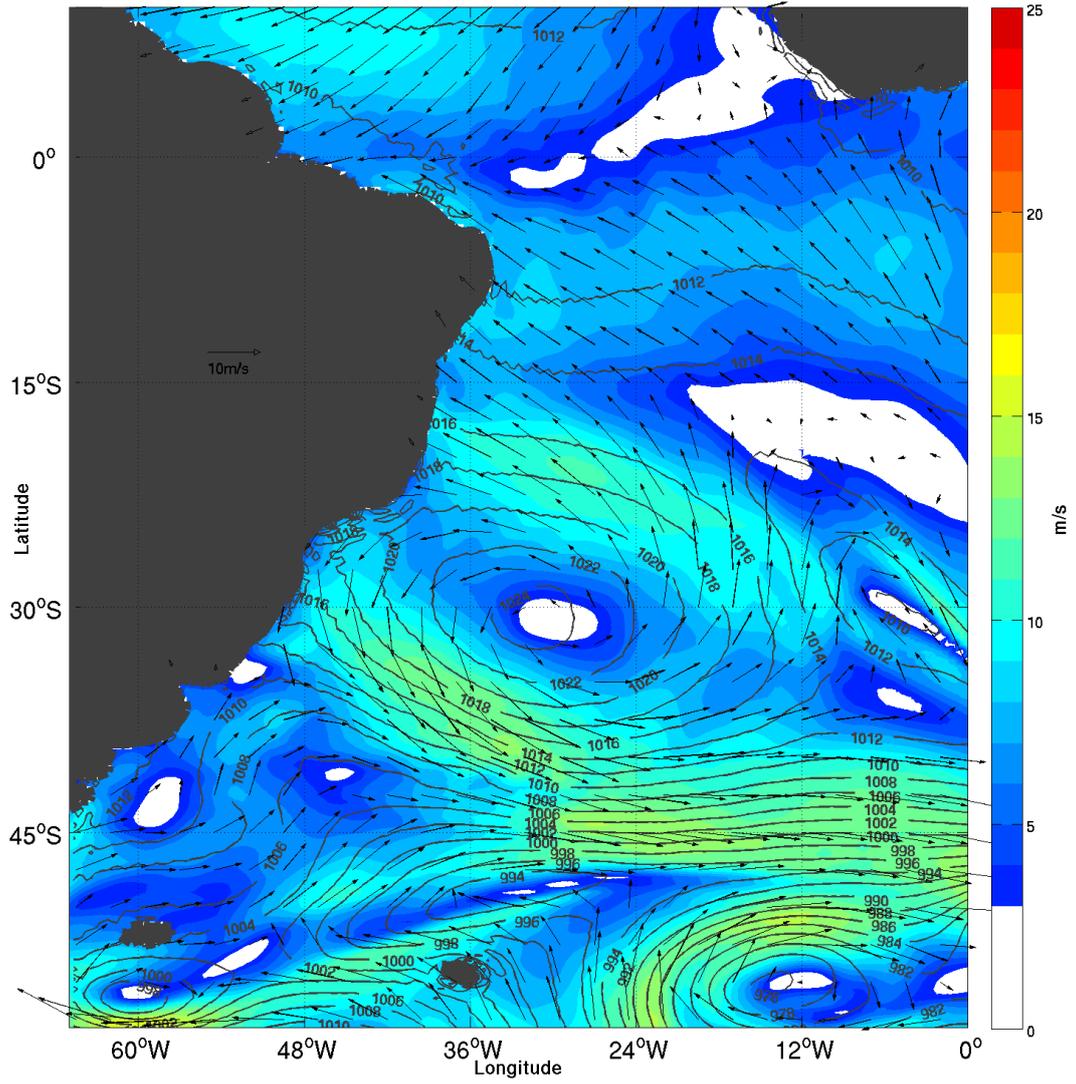
(a)

Campo de vento e pressão 4/5/2007



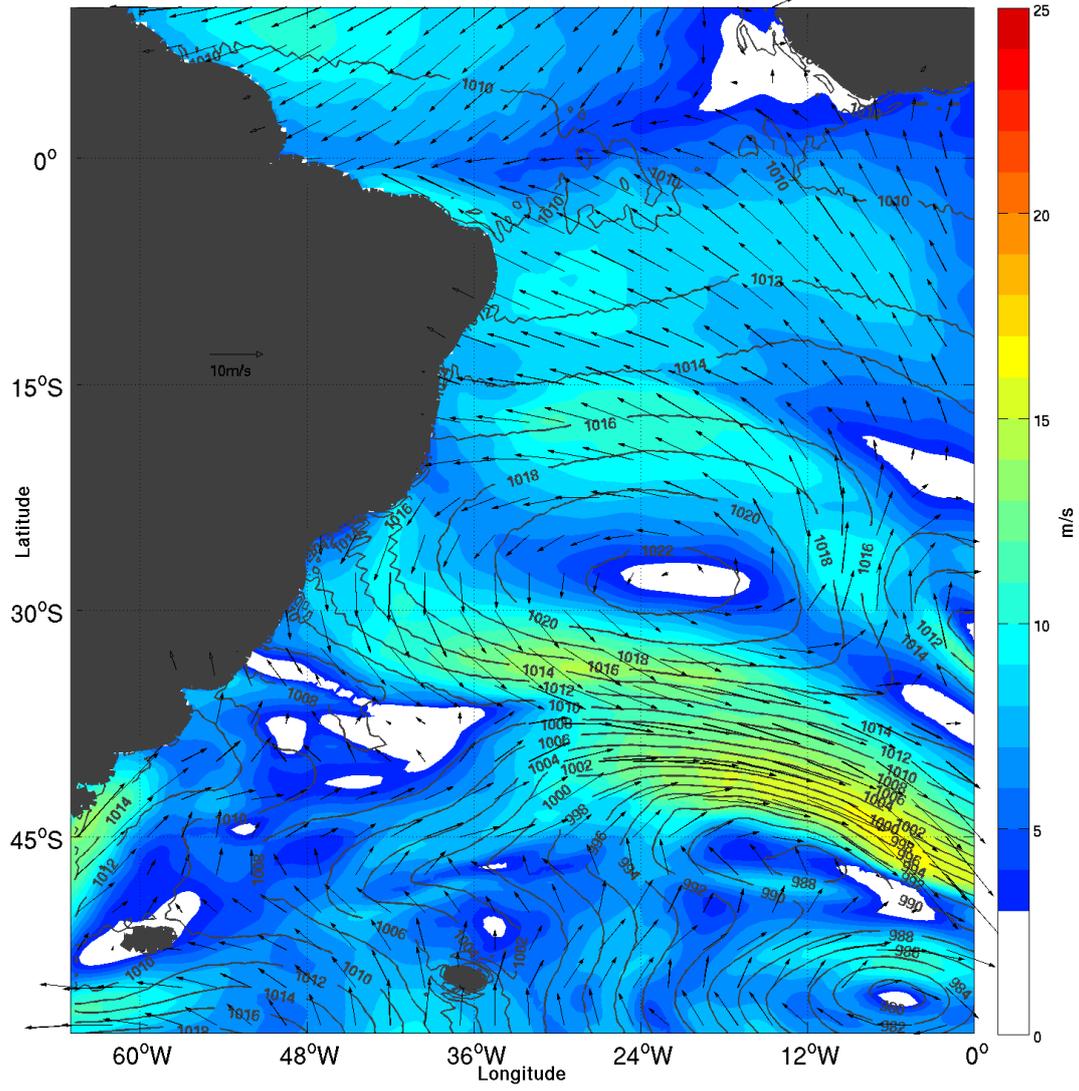
(b)

Campo de vento e pressão 5/5/2007



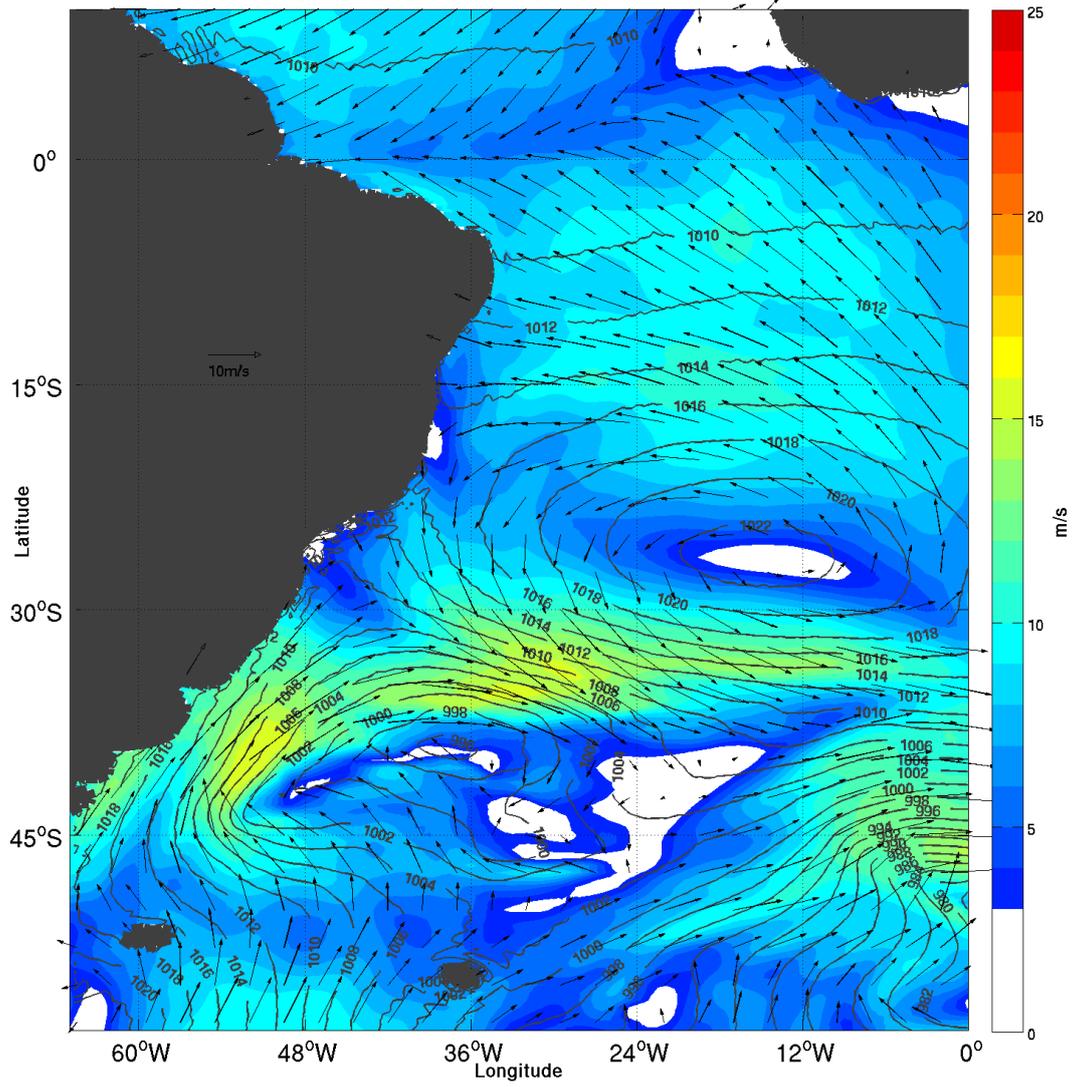
(c)

Campo de vento e pressão 6/5/2007



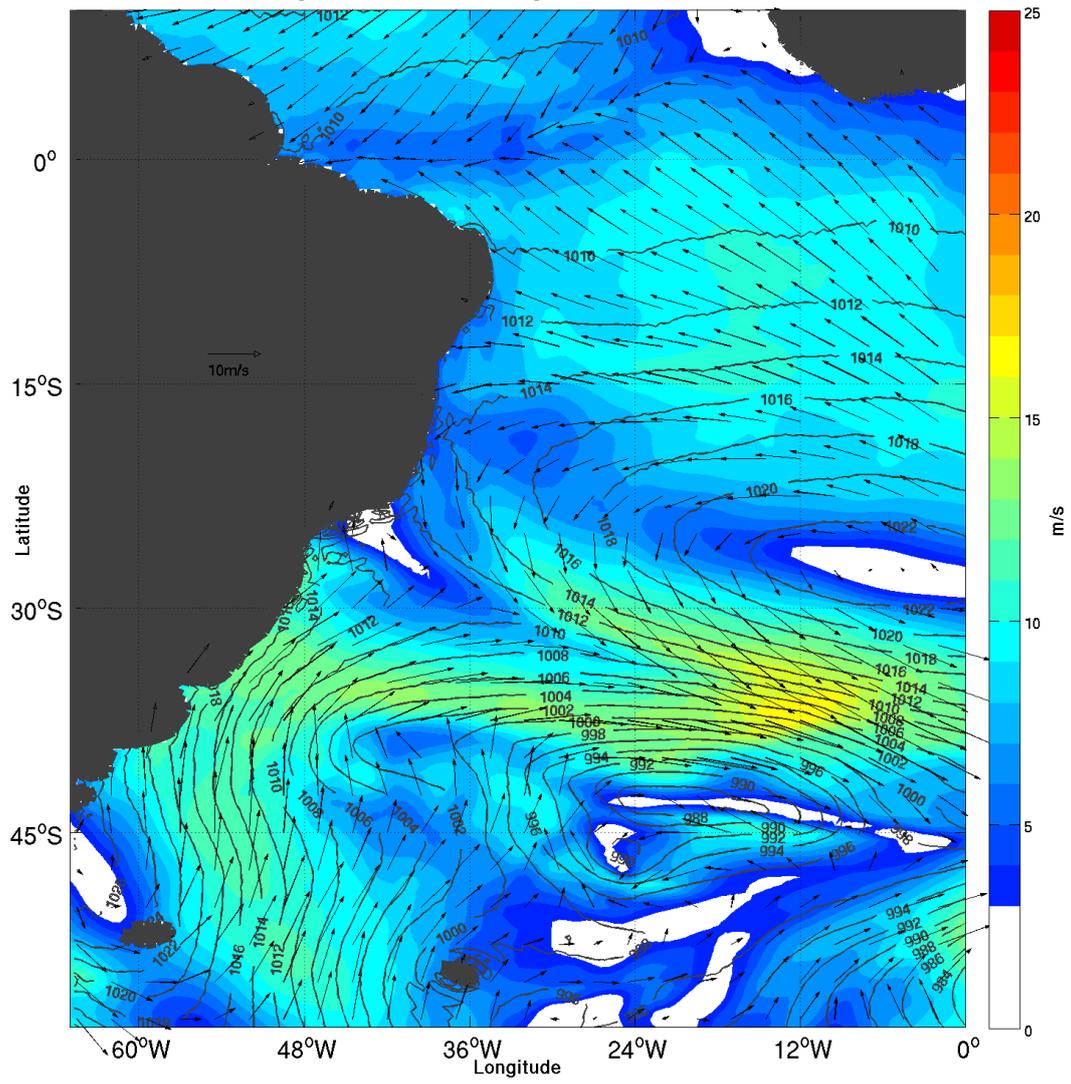
(d)

Campo de vento e pressão 7/5/2007



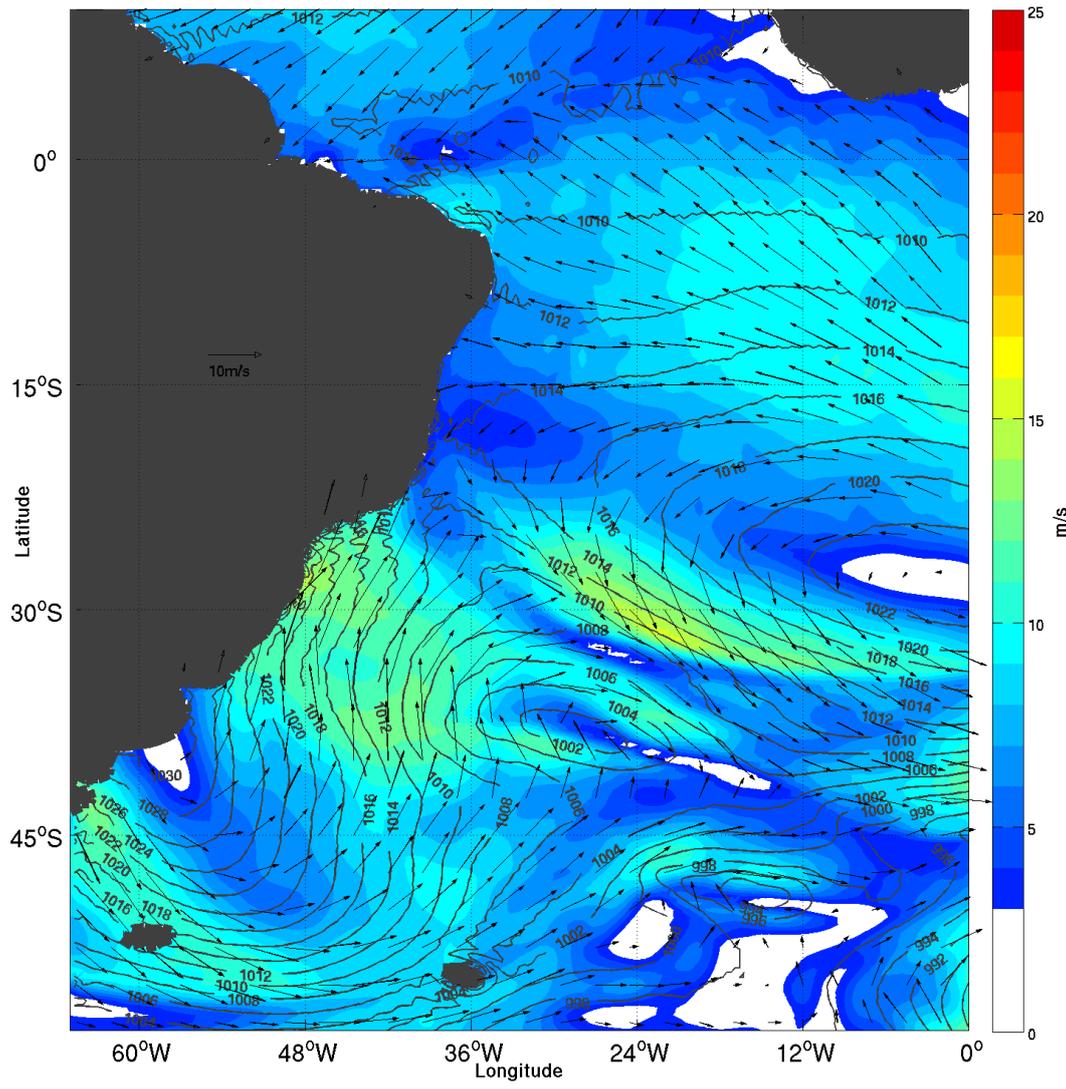
(e)

Campo de vento e pressão 8/5/2007



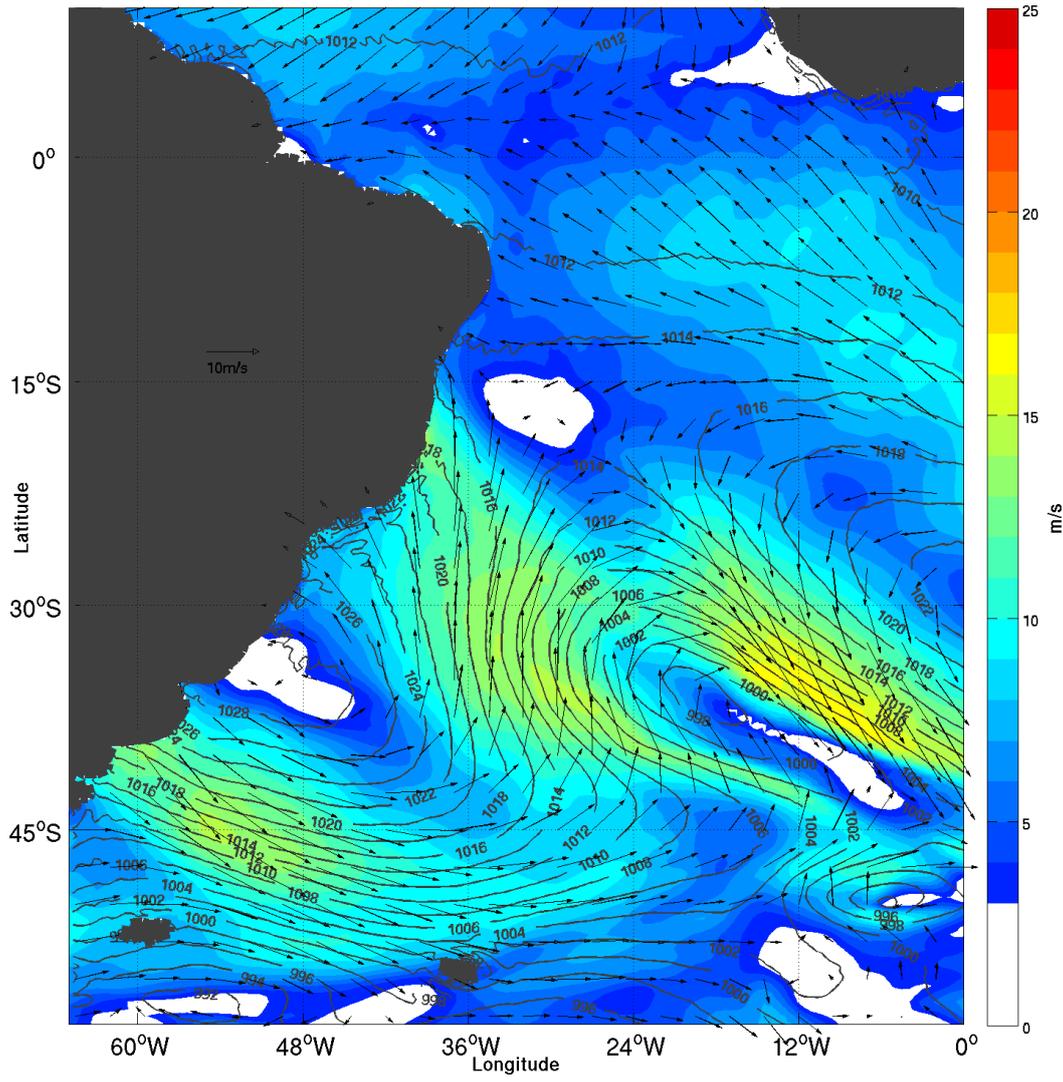
(f)

Campo de vento e pressão 9/5/2007



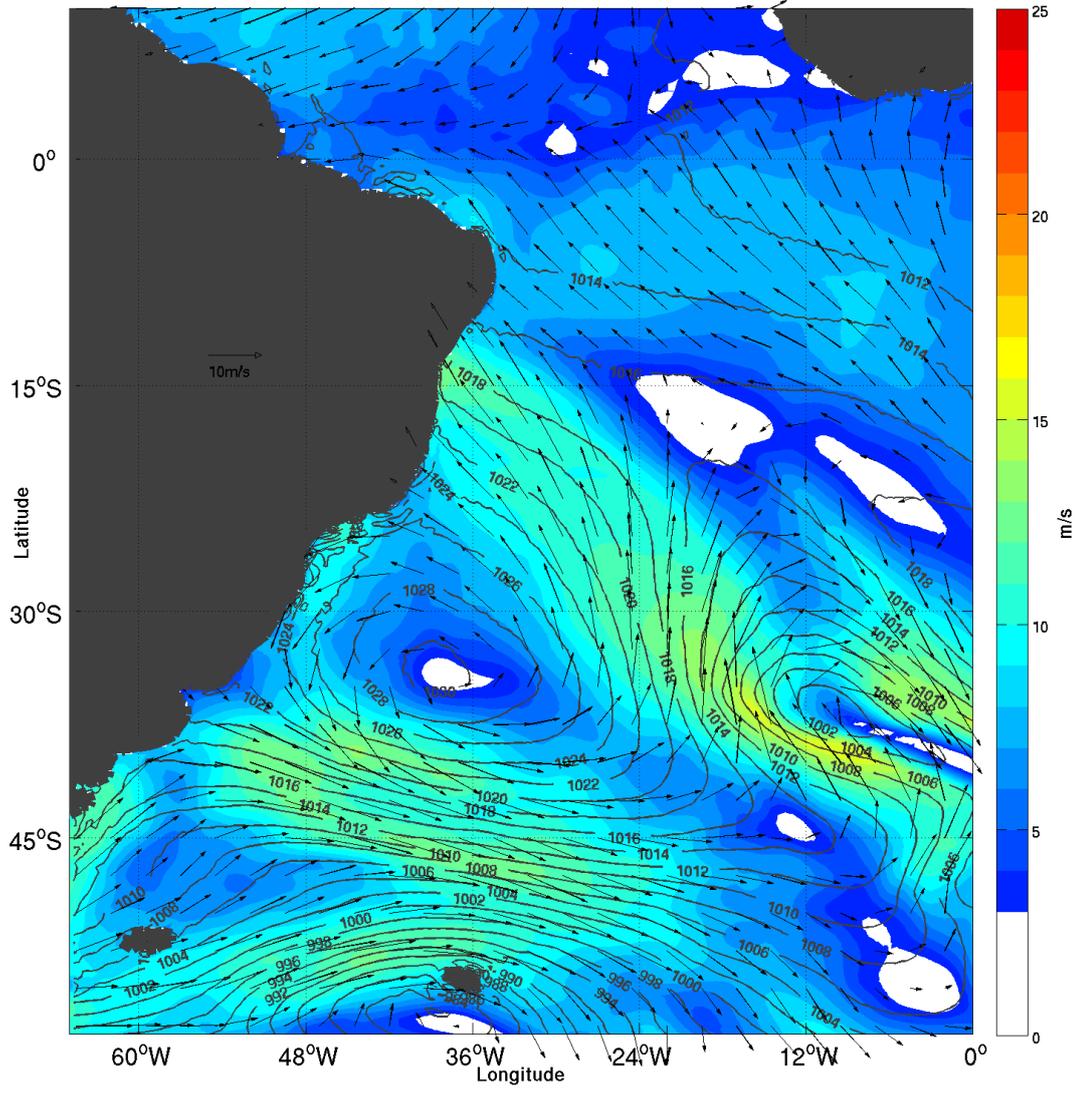
(g)

Campo de vento e pressão 10/5/2007



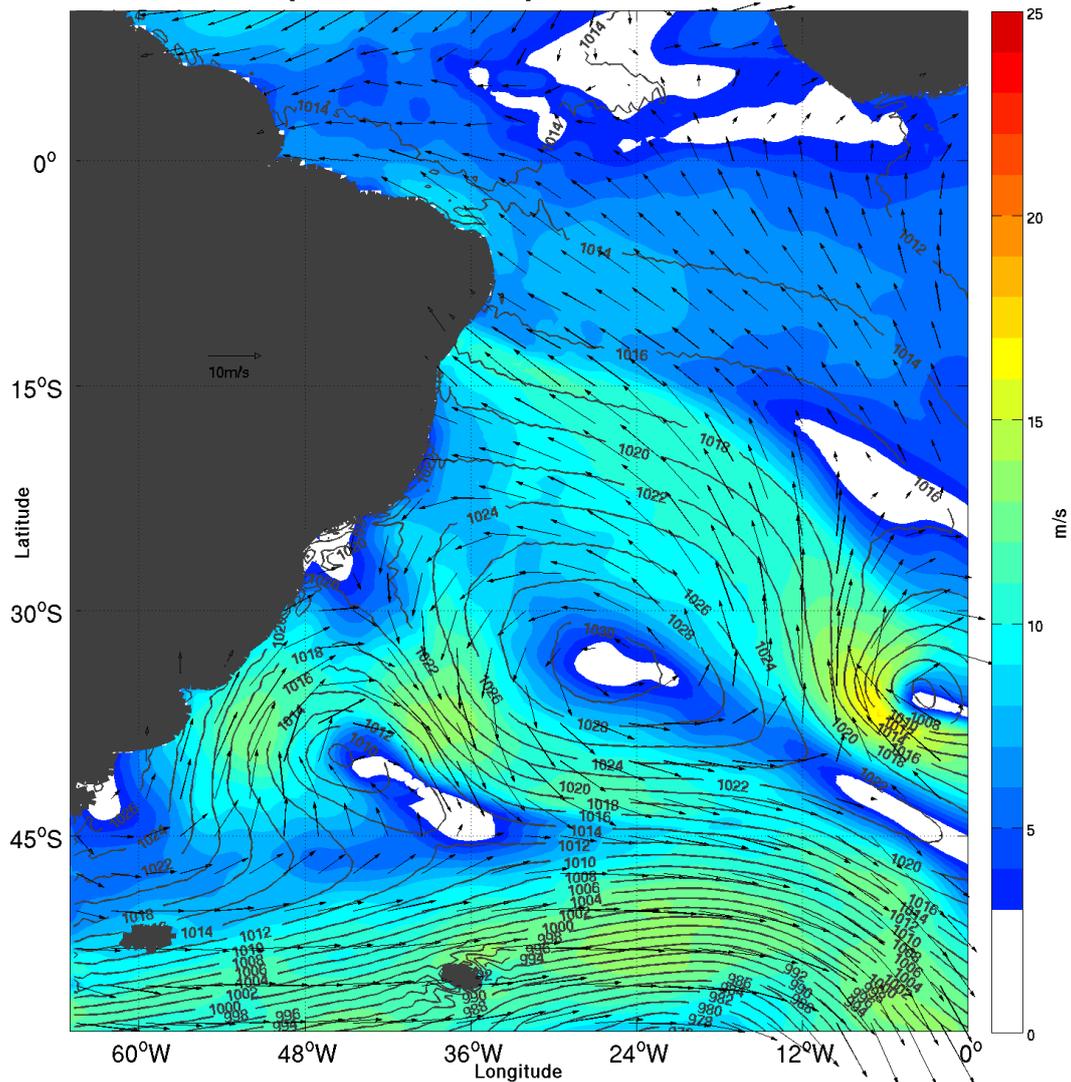
(h)

Campo de vento e pressão 11/5/2007



(i)

Campo de vento e pressão 12/5/2007



(j)

Figura 12. Campo de vento e pressão dos dias (a) 03, (b) 04, (c) 05, (d) 06, (e) 07, (f) 08, (g) 09, (h) 10, (i) 11 e (j) 12 de maio de 2007. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento.

4.5 Evento Intensificação dos Alísios

As ondulações provenientes desse evento ocorreram de 24 a 30 de junho de 2009, com 6 dias de ocorrência de *swell*. A pista de vento gerada em dias anteriores e no dia em que chegou o primeiro trem de ondas no Litoral Norte da Bahia teve um tempo de resposta de 1 dia e 16 horas. O *swell* se propagou por cerca de 2507 km até atingir o Litoral Norte da Bahia. As direções de onda foram, em sua maioria, de leste-sudeste, seguida de sul-sudeste, sudeste e leste (Tabela 9). Os períodos variaram entre 9,13 a 14,50 segundos (Tabela 9). A chegada da frente fria no oceano ocorreu com 5 dias de antecedência a entrada dos primeiros trens de ondas. As ondas desse

evento são associadas à intensificação dos ventos alísios, devido a perturbações do ASAS pela entrada da frente fria pelo sudoeste, acompanhada de um giro ciclônico fraco, com ventos fracos, e dissipação no dia 24, deslocando-se para sudeste.

Os períodos de pico foram subdivididos em: 9,2 – 9,3 segundos, ondas de leste; 9,5 – 14,5 segundos, ondas de leste-sudeste; e 9,1 – 9,3 segundos, ondas de sudeste. Observando que o ASAS se encontrava numa posição mais ao sul devido a migração para sul da ZCIT (Carvalho et al., 2013), as direções de ondas coincidiram com a intensificação dos ventos de leste e sudeste.

As alturas significativas não saíram da normalidade estimada pela literatura (Pianca et al. 2010), tendo ocorrência de alguns trens de ondas com valores maiores que a média calculada para este trabalho (Figura 13).

Tabela 9. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda.

| Data | Período de pico (s) | Direção de pico de onda (°) | Altura significativa de onda (m) |
|-------------|----------------------------|------------------------------------|---|
| 24/6/2009 | 9,23 | 92,67 | 1,79 |
| 25/6/2009 | 9,59 | 120,07 | 1,96 |
| 26/6/2009 | 9,37 | 158,74 | 2,71 |
| 27/6/2009 | 9,13 | 170,72 | 2,36 |
| 28/6/2009 | 9,75 | 133,01 | 2,76 |
| 29/6/2009 | 14,50 | 130,70 | 2,72 |
| 30/6/2009 | 13,53 | 144,28 | 2,89 |

A pista de vento foi formada pela intensificação dos ventos alísios devido a perturbação do ASAS, com pressão a superfície do mar de 1034 hPa, centrada em 24°W e 35°S, pela entrada de um sistema frontal, com pressão mínima de 998 hPa, centrado em 52°S e 24°W, que se deslocou de sudoeste para sudeste, ocasionando ventos com velocidade média de 15m/s (Figura 14). A pista de vento foi extensa e com ventos moderados, atingindo um pico de 19 m/s no dia 23. O tamanho da pista foi 3, localizada em 19°W – 29°W e 11°S – 33,5°S.

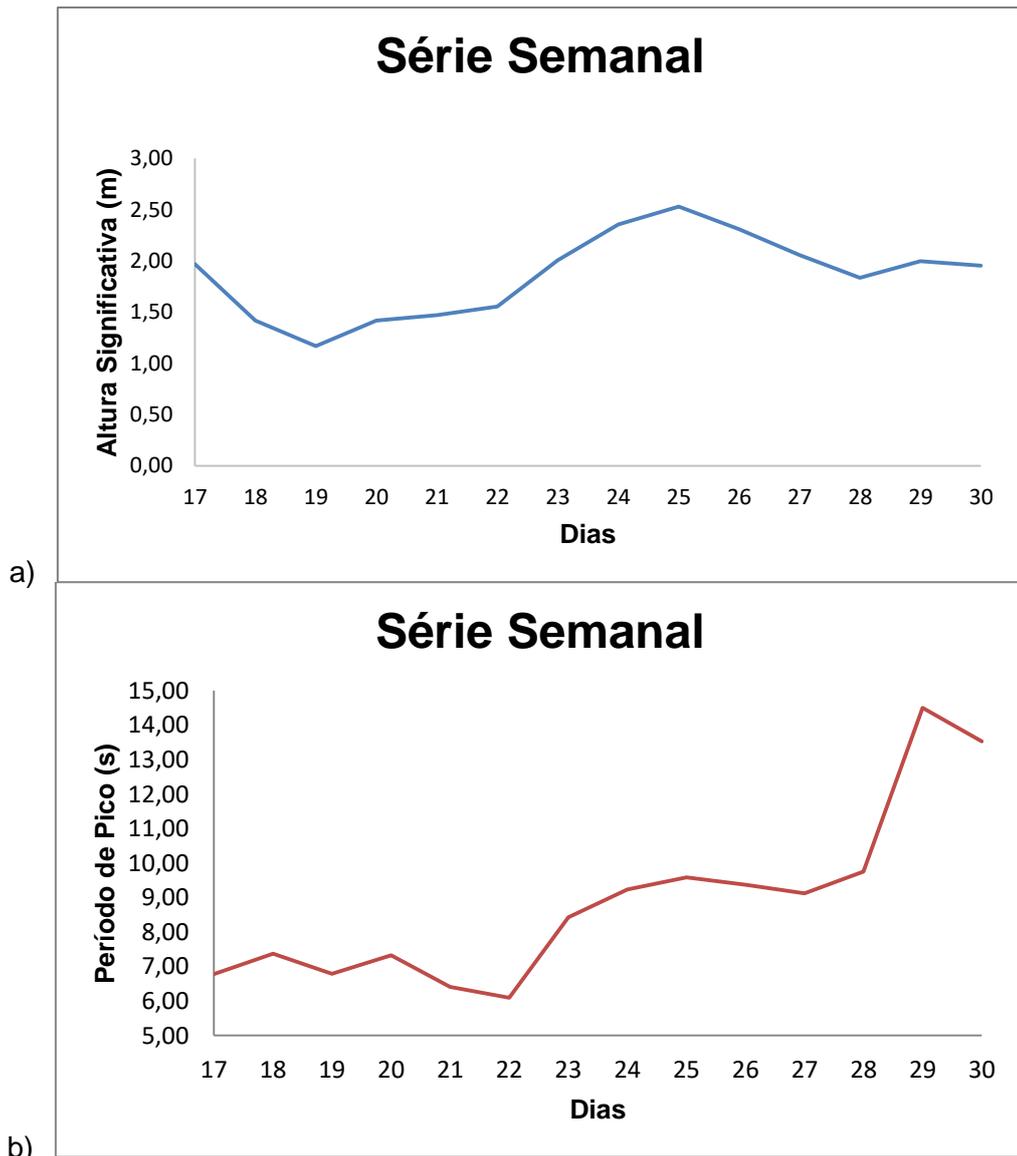
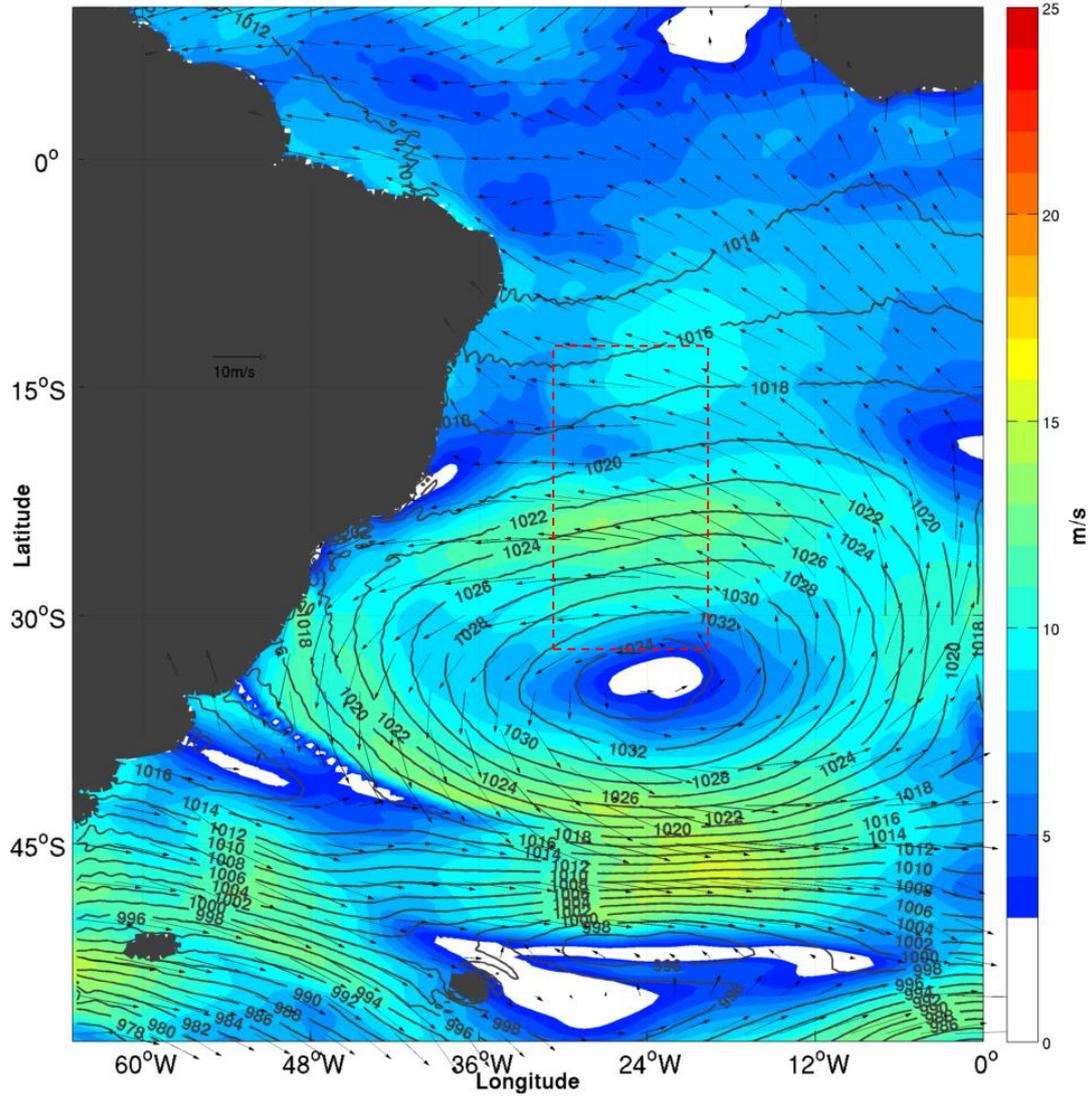


Figura 13. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do *swell* litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 24 de junho de 2009). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de junho de 2009.

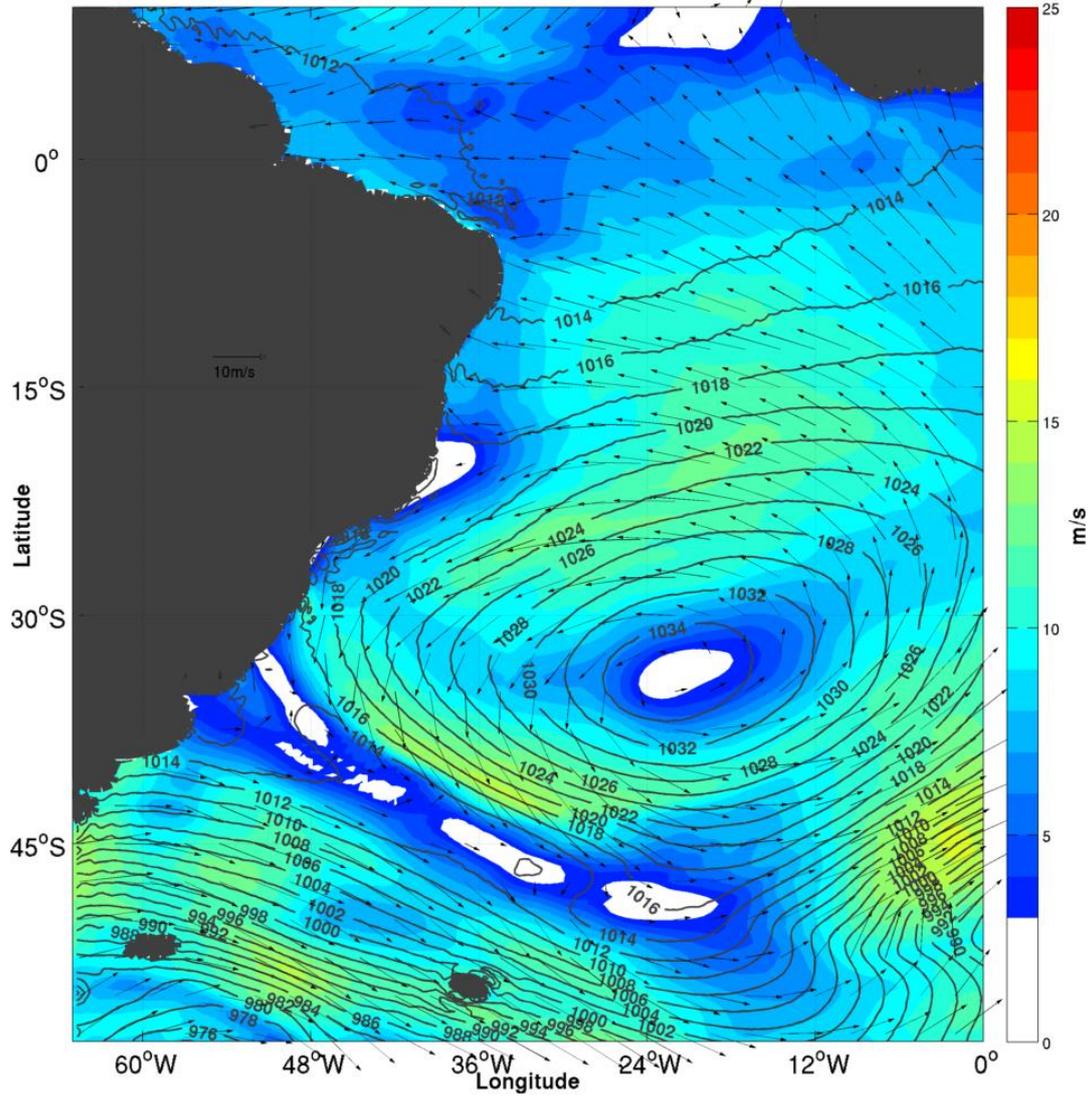
Em trabalhos como de Avila (1992), fala-se da ocorrência de eventos de leste a partir da costa africana, principalmente no período de maio a agosto, com duração de 3 a 5 dias, contribuindo para o clima de *swell* no nordeste brasileiro. Porém, no trabalho de Innocentini (2004), conclui-se que, apesar das contribuições desses eventos, os principais fenômenos sinóticos são os ventos alísios e os vórtices de sul, corroborando os principais resultados encontrados na investigação desse trabalho e, especificamente, desse caso com um exemplo de pista formada estritamente por ventos alísios.

Campo de vento e pressão 21/6/2009



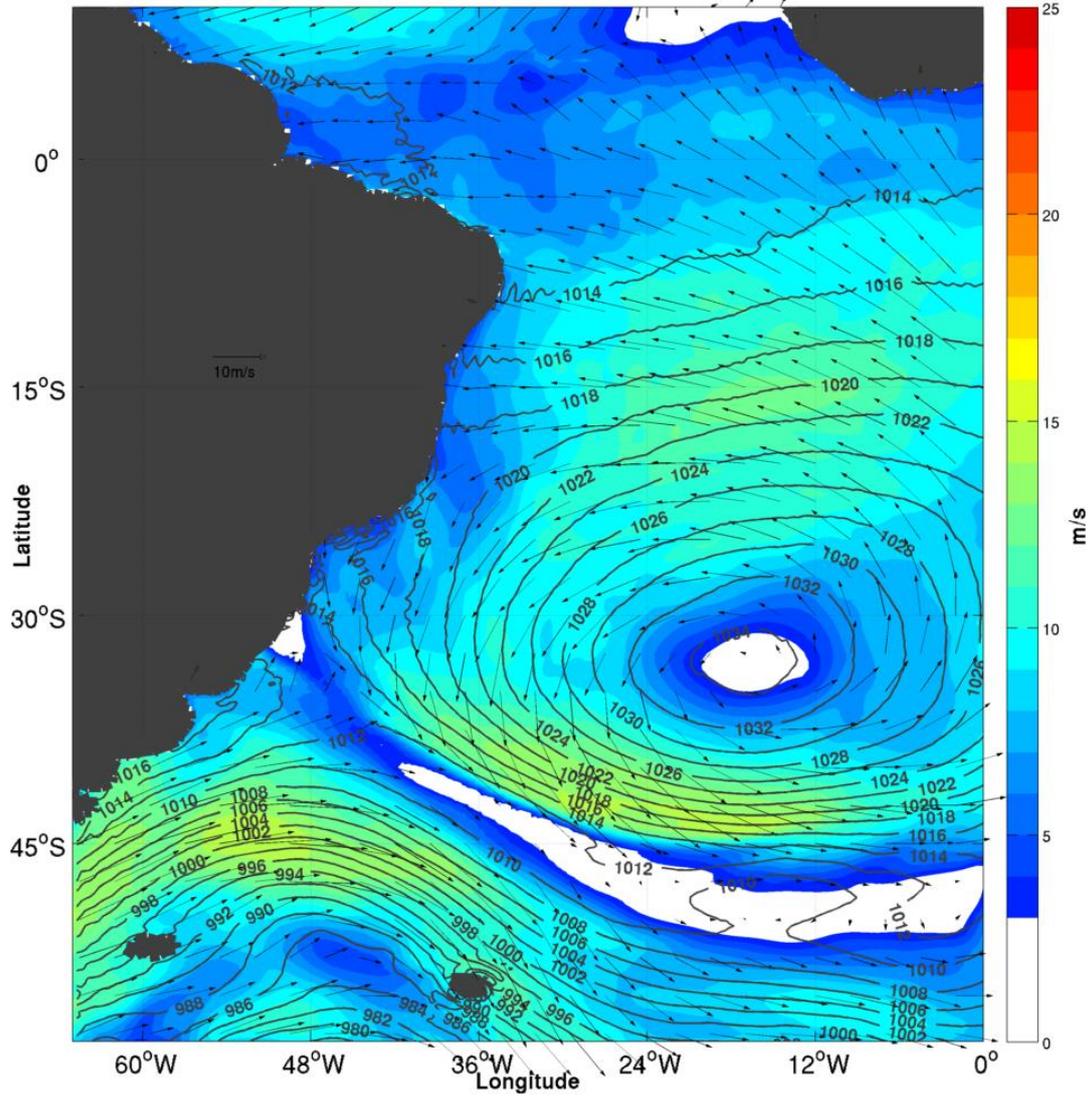
(a)

Campo de vento e pressão 22/6/2009

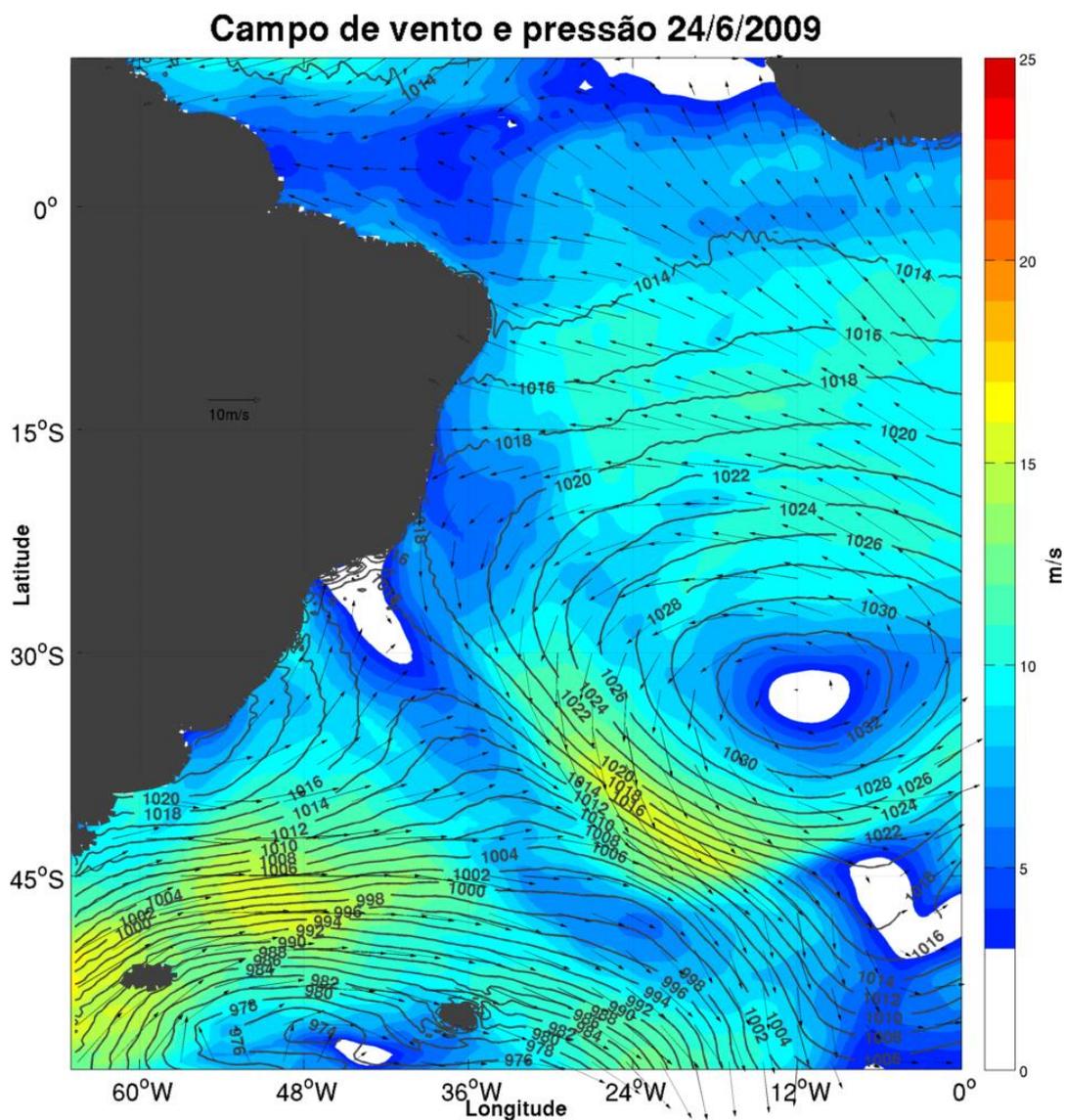


(b)

Campo de vento e pressão 23/6/2009



(c)



(d)

Figura 14. Campo de vento e pressão dos dias (a) 21, (b) 22, (c) 23 e (d) 24 de junho de 2009. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento.

4.6 Evento Ventos Anticiclônicos

As ondulações simuladas pelo WW3, nos dias 03 e 04 de maio de 2008, contabilizaram dois dias de ocorrência de *swell*. A pista de vento se formou em dias anteriores a chegada do primeiro trem de onda, que adentrou a costa da Bahia depois de 1 dia e 2 horas. O *swell* percorreu cerca de 1853 km até a costa. O período de pico de onda variou entre 9,74 a 12,75 segundos (Tabela 13), com direção de onda de leste-sudeste.

O *swell* foi associado a uma pista de vento causada por um anticiclone pós-frontal. Os períodos foram associados a direção de onda de leste-sudeste. Assim, a direção de onda corrobora a pista de vento.

A altura significativa não ultrapassou a média da literatura, mas foi maior que a média calculada. Já o período de pico de onda, no dia 04, foi superior as médias regional e calculada (Figura 15).

Tabela 10. Valores de período de pico, celeridade orbital, direção de pico e altura significativa de onda.

| Data | Período de pico (s) | Direção de pico de onda (°) | Altura significativa de onda (m) |
|-------------|----------------------------|------------------------------------|---|
| 3/5/2008 | 9,74 | 112,13 | 2,68 |
| 4/5/2008 | 12,75 | 123,28 | 2,55 |

A pista de vento foi gerada após a passagem da frente fria pelo anticiclone pós-frontal, com pressão máxima de 1028 hPa, e centrado ainda no continente no dia 01 e situando sobre o oceano no dia 02, com o centro da alta pressão em 48°W e 39°S. Durante o evento sinótico a velocidade média dos ventos anticiclônicos foi de 15 m/s, atingindo um pico de 18 m/s no dia 02. A pista foi média, porém com ventos moderados. A pista foi de tamanho 2, situada em 25°W – 32,5°W e 20°S – 40°S.

Os ciclones extratropicais geralmente são acompanhados por um centro de alta pressão posterior ao centro de baixa pressão.

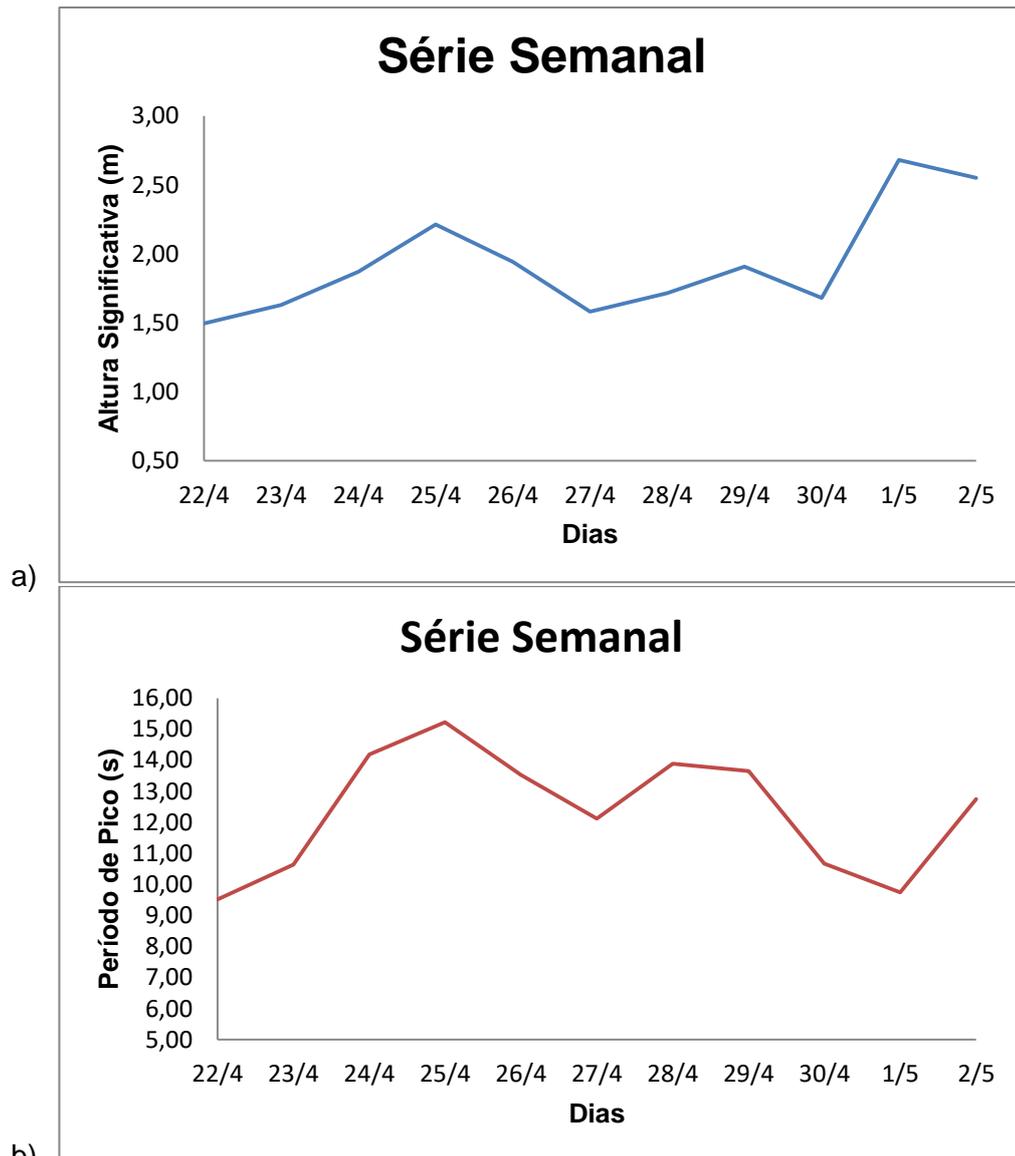
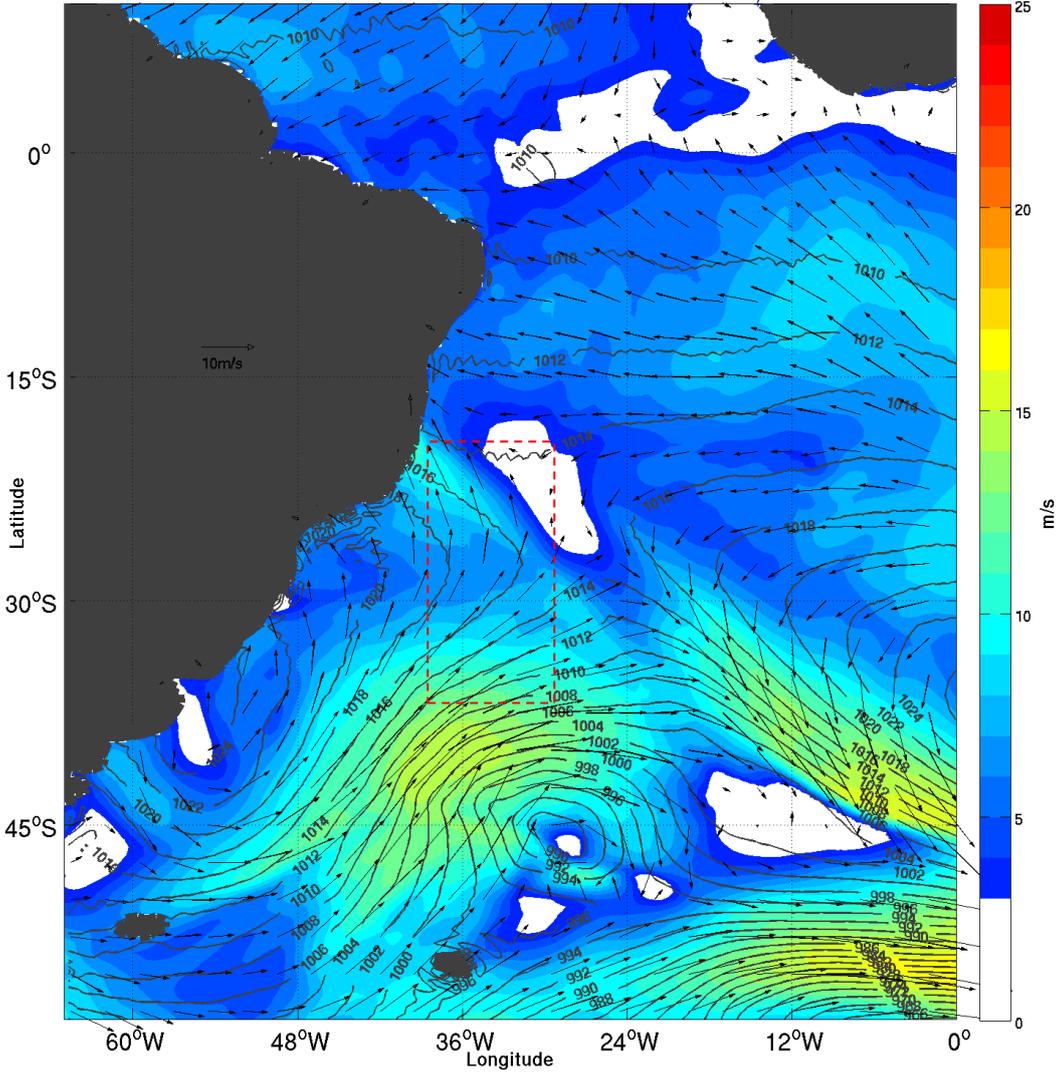
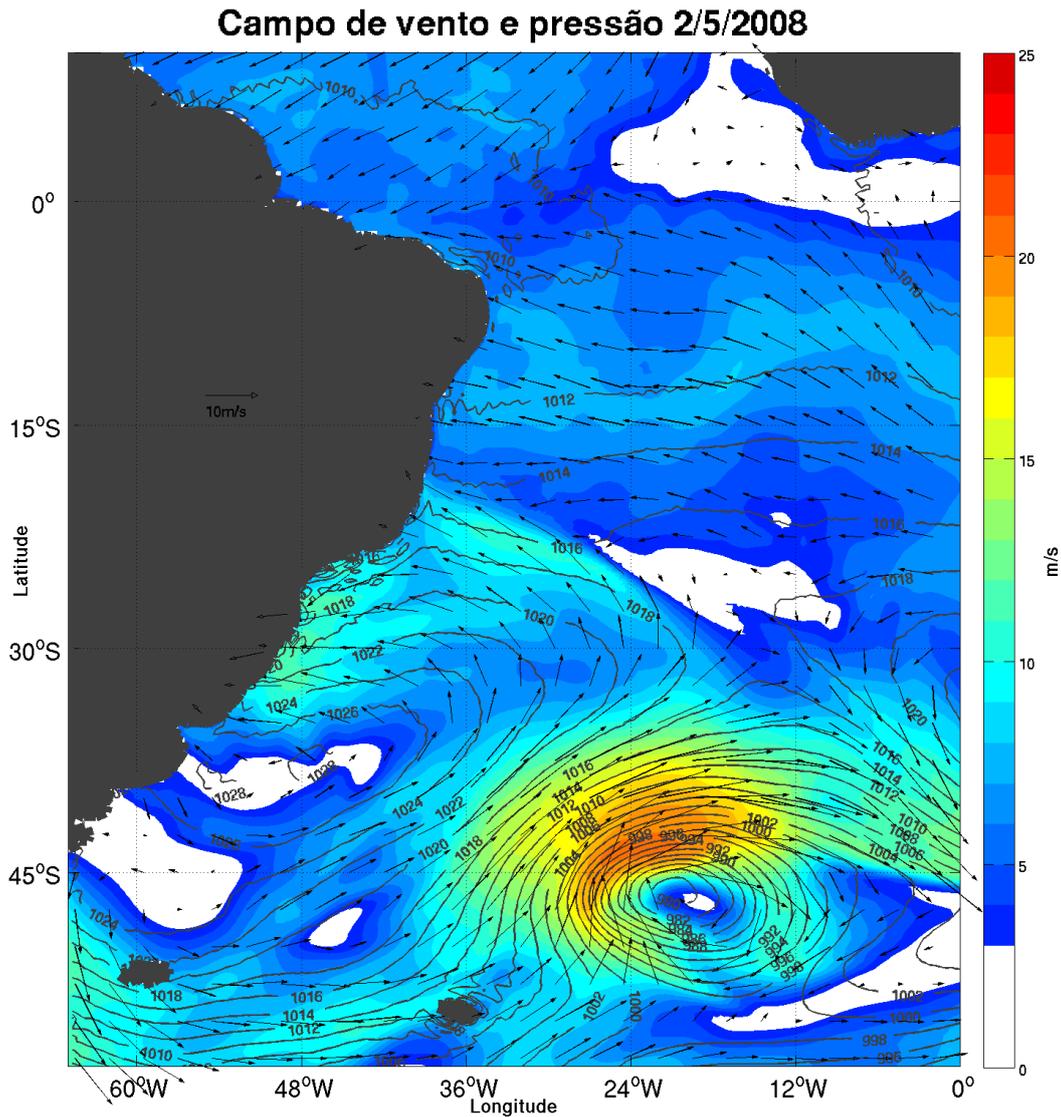


Figura 15. Série semanal da altura significativa e período de pico iniciada uma semana antes da chegada do *swell* litoral norte da Bahia (nesse evento, dia 03 de maio de 2008). O eixo das ordenadas representa (a) a altura significativa (m) em azul, e (b) período de pico (s), em vermelho, e o eixo da abcissa, os dias no mês de maio de 2008.

Campo de vento e pressão 1/5/2008



(a)



(b)

Figura 16 Campo de vento e pressão dos dias (a) 01 e (b) 02 de maio de 2008. As cores representam a intensidade de vento, as isolinhas representam a pressão e os vetores são a direção do vento.

4.7 Comparação dos dados *in situ* com as simulações do WW3

Considerando a série temporal de dados observados do ADCP localizado na Praia do Forte, pode-se verificar que houve boa correlação entre a altura significativa simulada pelo WW3 e os dados (Tabela 11).

Em trabalhos como o de Pianca et al. (2010), Dimitrova et al. (2013) e Pereira et al. (2015), houve a validação do WW3 que, de modo geral, teve superestimativa para altura de onda significativa (Pereira et al., 2015) e período de pico menor que 10 segundos. Enquanto que, para períodos de pico maiores, há uma subestimação pelo

modelo. Já para este trabalho, o gráfico de dispersão mostrou superestimação para altura de onda acima de 2,5m (Figura 17).

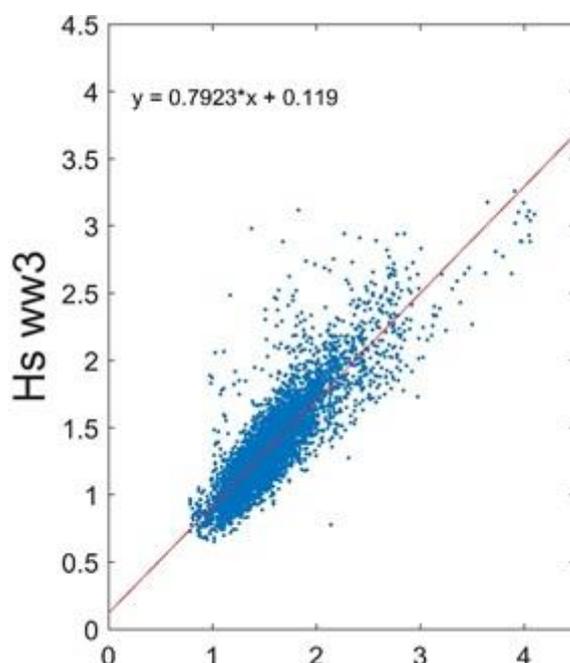


Figura 17. Gráfico de dispersão da altura de onda significativa para o Litoral Norte da Bahia (12,5°S e 37,5°S). O eixo das abscissas (y) representa o dado modelado (WW3) e o eixo das ordenadas (x) representa dados do ADCP.

O período analisado foi de novembro de 2014 a dezembro de 2016. A correlação para altura de onda foi de 0,87 (Tabela 11). Para o coeficiente de regressão linear, percebe-se que há uma dependência entre a altura de onda significativa modelada e a observada, com o valor de 0,76. Analisando comparativamente, percebeu-se que os dados de altura da onda tiveram boa correlação, mostrando que o modelo funcionou bem para a região da Bahia.

No entanto, em todos os trabalhos, o uso do modelo foi satisfatório, atendendo e respondendo as hipóteses dos trabalhos. Já para as velocidades de ventos com as reanálises do CFSR, Vledder (2015) relata que as reanálises do CFSR obtiveram o melhor desempenho para o modelo de onda espectral SWAN, comparando com as previsões de outros produtos de campo de vento, assim como produziu o melhor campo de vento também para eventos extremos.

Isso demonstra uma boa qualidade do WW3 na simulação de ondas de *swell* na região de interesse.

Tabela 11. Dados de correlação linear ou de Pearson ® e coeficiente de regressão linear para altura de onda significativa.

| Parâmetro da onda | Correlação (r) | Regressão (r²) |
|--------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Hs | 0,87 | 0,76 |

5 CONCLUSÃO

- A partir dos resultados, foi possível observar que os ventos anticiclônicos e de leste também geram *swell*, além dos ventos provenientes dos giros ciclônicos acompanhado das frentes frias. As pistas foram predominantemente provocadas pelas frentes frias no período de outono e inverno, de acordo com o relatado na literatura para outras regiões do litoral do Brasil.
- Os principais eventos sinóticos com potencial formação de *swell* foram as frentes frias, os ciclones e anticiclones e a intensificação dos alísios. As pistas provocadas por ciclones foram localizadas, principalmente, à oeste dos centros de baixa pressão, situados predominantemente entre 45°S e 15°S e 36°W e 5°W. As pistas ocasionadas pela convergência de ventos foram localizadas, em sua maioria, à leste do centro de alta pressão e à oeste do centro de baixa pressão, situado a 15°S - 45°S e 35°W - 20°W. As pistas geradas por ventos alísios situaram-se entre 11°S e 41°S e 3°W e 34°W. Já as alturas significativas de ondas para o *swell* foram de 2,0 a 3,5 metros, corroborando a literatura.
- Os períodos de pico de onda se encontraram na faixa entre 10 e 15 segundos, de modo geral, com pouquíssimos casos com períodos de onda maiores, como foi citado no caso do evento ocasionado por ciclone subtropical (seção 4.1). As alturas significativas foram condizentes, em sua maioria, com a literatura e houve alguns eventos de altura de onda extrema, principalmente nos meses de inverno, como mostrado nos casos da convergência dos ventos e intensificação dos ventos alísios (seção 4.4).
- A altura de onda do modelo apresentou um resultado satisfatório quando comparado com os dados do ADCP, corroborando os resultados já apresentados em outras literaturas como em Dimitrova (2013).
- A identificação de padrões no sistema atmosfera – oceano pode oferecer informações para a previsibilidade de curto-prazo da chegada de *swell* no norte do litoral da Bahia. Na maioria dos casos estudados, houve uma defasagem de 1 a 3 dias entre a formação da pista e a chegada do *swell* no litoral norte da Bahia. Portanto, esse trabalho é um projeto piloto do que pode ser desenvolvido com essa temática, além de ser um trabalho inovador em alguns aspectos, já que, nas regiões nordestinas, há pouca literatura para a climatologia de ondas e as pistas de geração de *swell*.

6 REFERÊNCIAS

- Alomar, M. *et al.* Wave Growth and Forecasting in Variable, *Semi-enclosed Domains. Continental Search Research*. **87**, 28-40 (2014).
- Alves, M. G. H. J. *et al.* Reconstituição do Clima de Ondas no Sul-Sudeste Brasileiro entre 1997 e 2005. *Brazilian Journal of Geophysics*. **27**, 427-445 (2009).
- Avila, I., Pasch J. R. Atlantic Tropical Systems of 1991. *Mon. Wea. Rev.* **120**, 2688-2696 (1992).
- Berry, G. *et al.* A Global Climatology of Atmospheric Fronts. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*. **38**, (2011).
- Caetano, E. An improved second generation of model. *Rev. Bras. Oceanogr.* **51**, 1-21 (2003).
- Caixeta, J. M., Da Silva Milhomem, P., Witzke, R. E., Siqueira Dupuy, I. S. & Gontijo, G. A. Bacia de Camamu. *Boletim de Geociencias da Petrobras* **15**, 455-461 (2007).
- Campos, R. M. Análise Dos Extremos de Onda No Rio De Janeiro Associados A Ciclones Extratropicais No Atlântico Sul. Dissertação. 82-90 (2009). doi:616.89-008.47:616-
- Carvalho, V. A. M., Oyama, D. M. ATLANTIC INTERTROPICAL CONVERGENCE ZONE WIDTH AND INTENSITY VARIABILITY: OBSERVATIONAL ASPECTS. *Revista Brasileira de Meteorologia*. **28**, 305-316 (2013).
- Casas-Prat, M., Wang, X. L. & Sierra, J. P. A physical-based statistical method for modeling ocean wave heights. *Ocean Model.* **73**, 59-75 (2014).
- Christina, I. & Nogueira, M. CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS NA BACIA DO ESPÍRITO SANTO ATRAVÉS DE MODELAGEM NUMÉRICA. *UFRJ/COPPE* 128 (2014).
- Dimitrova, M., Galabov, V. K. A. Validation of the Operacional Wave Model WaveWatch III against Altimetry Data from JASON-2 Satellite. *Bul. J. Meteo & Hydro.* **18**, 4-17 (2013).
- Dominguez J. M. L., Bittencourt, A. B. C. S. P., Geologia da Bahia : pesquisa e atualização. Salvador : CBPM. 2 v (Série publicações especiais ; 13), 395-496 (2012).
- Escobar, G. *et al.* Synoptic Classification of Cold Fronts Associated with Extremes Rainfall over the East of Santa Catarina State. *Revista Brasileira de Meteorologia*. **31**, 649-661 (2016).
- Garrison, T. Fundamentos da Oceanografia 4ª ed. Português. (2010).

- Innocentini, V. *et al.* The incident ocean waves in the northeastern Brazilian coast associated with eastern African atmospheric disturbances. *Revista Brasileira de Meteorologia*. **20**, 367-374 (2005).
- Kalnay, E. *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **77**, 437–471 (1996).
- Laing, A. K. *et al.* *Guide to Wave Analysis*. WMO-No. **702**, (1998).
- Lewis, S. B. *et al.* The Impact of The Resolution of Wind Fields on Predictive Wave Models. *Bull. Geod. Sci.* **23**, 539-555 (2017). doi:10.1590/S1982-21702017000400036
- Lira, S. A. Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações. *Setores Ciências Exatas e 209* (2004).
- Melo, G. H. J. *et al.* Measurement and Modeling of Wind Waves at the Northern Coast of Santa Catarina. *Brazil. Brazilian J. Oceanogr.* **49**, 13-28 (2001).
- Mendes, D. *et al.* CASE STUDY OF EXTRATROPICAL CYCLONE OVER THE SOUTH AMERICA: SENSIBILITY OF ANALYSIS. *Revista Brasileira de Meteorologia*. **24**, 399-406 (2009).
- Montazeri, N., Nielsen, U. D. & Juncher Jensen, J. Estimation of wind sea and swell using shipboard measurements - A refined parametric modelling approach. *Appl. Ocean Res.* **54**, 73–86 (2016).
- Oliveira, A. S. Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecções na Amazônia. *INPE*. **4008**, (1986).
- Paskyabi, B. M. *et al.* Wave-induced characteristics of atmospheric turbulence flux measurements. *Science Direct*. **35**, 102-112 (2013).
- Pedroso, D. *et al.* CLIMATOLOGIA DA FUNÇÃO FRONTOGENÉTICA SOBRE A AMÉRICA DO SUL EM UM CENÁRIO DE CLIMA PRESENTE E FUTURO. *Revista Ciência e Natura*. 169-171 (2013). doi: 10.5902/2179-460X11591
- Pereira, S. E. N., Oliveira, K. A. L. Analysis of the Influence of ENSO Phenomena on Wave Climate on the Central Coast Zone of Rio de Janeiro (Brazil). *Journal of Integrated Coastal Zone Management*. **15**, 353-370 (2015). doi: 10.5894/rgci570
- Pianca, C., Mazzini, P. L. F. & Siegle, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian J. Oceanogr.* **58**, 53–70 (2010).
- Pickard, G. L. & Emery, W. J. *Descriptive Physical Oceanography -an introduction*. *Fifth enlarged edition*. (Elsevier, 2011).
- Pires, B. L. ESTUDO DAS CORRENTES PARA OS PERÍODOS SECO E CHUVOSO DO LITORAL NORTE DA BAHIA. *UFBA*. 1-58 (2017).
- Pond, S. & Pickard, G. L. Introductory dynamical oceanography. *The Open Univesity* **217**, 329 (2005).

- Reboita, S. M. *et al.* Surface Cyclones over Austral Latitudes: Part I - Bibliographic Review. *Revista Brasileira de Meteorologia*. **32**, 171-186 (2017). doi: 10.1590/0102-77863220010
- Rocha, P. F. *et al.* Cyclones and Atmospheric Circulation Patterns Study in the South Atlantic Ocean Near the Coast of South and a Southeast of Brazil Using Reanalysis Era-Interim Data. *Revista Brasileira de Meteorologia*. **31**, 141-156 (2016). doi: 10.1590/0102778631220140151
- Rodrigues, G. L. M. Climatologia de Frente Fria no Litoral de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geofísica*. **22**, 135-151 (2004).
- Saldanha, B. C. *et al.* Case Study of a Secondary Cold Front over Southern Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*. **25**, 32-45 (2010).
- Semedo, A. *et al.* Projection of global wave climate change toward the end of the twenty-first century. *J. Clim.* **26**, 8269–8288 (2013).
- Silva, C. A. *et al.* CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS “SEA” AND “SWELL” OBSERVADAS NO LITORAL DO CEARÁ-BRASIL: VARIABILIDADE ANUAL E INTER-ANUAL. *Tropical Oceanography Online*. (2011).
- Silva, P. V. DISTÚRBIOS ONDULATÓRIOS DE LESTE: ESTUDO DE CASOS QUE AFETARAM A COSTA LESTE DO NEB. Dissertação. *Unicamp*. (2011).
- Thomson, J. & Rogers, W. E. Swell and sea in the emerging Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.* **41**, 3136–3140 (2014).
- Tolman, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 3.14. *Tech. note 220* (2009). doi:10.3390/ijerph2006030011
- Vledder, V. P. G. *et al.* Wave Model Predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields. *Applied Ocean Research*. 161-178 (2015).
- Young, I. R. & Vinoth, J. An ‘extended fetch’ model for the spatial distribution of tropical cyclone wind-waves as observed by altimeter. *Ocean Eng.* **70**, 14–24 (2013).