

MARULHOS NO LITORAL NORTE DO BRASIL GERADOS POR FURACÕES: CASO 24 DE OUTUBRO DE 1999

Valdir Innocentini, Simone C. S. Cunha Prado, Cláudio S. Pereira, Fernando Oliveira Arantes e
Ingrid Neves Brandão

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Resumo

Nos dias 24, 25 e 26 de outubro de 1999 uma intensa agitação marítima atingiu a região norte do Brasil, destruindo parte das instalações que a Marinha do Brasil mantém nos Penedos de São Paulo e São Pedro, em apoio ao Projeto Arquipélago. Neste artigo os ventos da reanálise do NCEP são utilizados em um modelo numérico de ondas de terceira geração para estudar as condições que propiciaram a ocorrência destas ondas. O evento foi causado pelo furacão Irene que foi absorvido por um ciclone extratropical que dominou uma vasta área do Atlântico Norte provocando ondas e impondo ventos intensos. Os resultados numéricos mostram que as ondas que atingiram o norte do Brasil foram simuladas pelo modelo numérico, e portanto, eventos deste tipo podem ser previstos com antecedência.

1. Introdução

A agitação marítima que se propaga no litoral brasileiro é altamente variável quanto aos fenômenos meteorológicos responsáveis por sua formação. Grosseiramente, o litoral brasileiro pode ser classificado, quanto ao regime de ondas incidentes, em 4 regiões sucintamente descritas a seguir:

- Na região Norte, do Amapá até aproximadamente Natal no Rio Grande do Norte, as ondas incidentes são formadas pelos alísios e apresentam altura abaixo de 1-1,5 m em mar aberto. Eventualmente, chegam ondas com período de 15-20 s provenientes de tempestades formadas no extremo norte do Atlântico.
- A região Nordeste, de Natal até Vitória no Espírito Santo, é atingida por ondas que chegam geralmente de nordeste, formadas pelos ventos do flanco esquerdo do anticiclone subtropical do Atlântico Sul. As vezes recebem pistas enormes com ventos de sudeste formadas ao longo de frentes frias que se propagam ao largo do litoral.
- Na região Sudeste, de Vitória a Paranaguá no Paraná, há uma acentuada transição entre a propagação de nordeste e dos ciclones extratropicais que se formam no sul do país. Algumas vezes ciclones formados na região agitam a superfície do mar. Também ocorre desta região ficar exposta a enormes pistas, provenientes de ciclones que se intensificam no Atlântico, com ventos apresentando velocidades acima de 18 m/s capazes de gerar ondas com altura significativa de 5 a 6 m em mar aberto. O litoral do Rio de Janeiro, devido a sua característica geográfica, recebe ondas provenientes deste tipo de ciclone.
- A região Sul, de Paranaguá ao extremo Sul do País, também recebe ondas de nordeste, mas a influência dos ciclones é marcante durante todo ano. Nos meses de inverno, a região costeira vive em constante alerta. Devido a proximidade das pistas com o litoral, ocorre aumento do nível médio do mar provocado pelo empilhamento (storm surge) em algumas áreas desta região.

Neste artigo será apresentado um estudo da agitação marítima que atingiu a região Norte no período 24-26 de outubro de 1999, devido a um intenso ciclone extratropical que se formou no Atlântico Norte.

A temporada de ciclones tropicais de 1999 foi bastante ativa no Atlântico, e ocasionou muita destruição, prejuízos e acidentes fatais nas ilhas do Caribe e no litoral do Golfo do México. Um desses ciclones tropicais deslocou-se em direção nordeste ao longo do litoral da costa leste da América do Norte, e fortaleceu outro ciclone extratropical provocando uma agitação marítima muito intensa em latitudes acima de 40° N. As ondas propagaram-se por todo Atlântico Norte e atingiu o Brasil. A mídia reportou a ocorrência de ondas com período de 20 s e altura acima de 3 m no litoral norte, em particular em Fortaleza, nos dias 24, 25 e 26 de outubro. O Diário do Nordeste de Fortaleza, em sua edição de 27 de outubro, trouxe a manchete: “Ressaca continua seu rastro de destruição”. Sabe-se que os Penedos de São Pedro e São Paulo (próximos a 0.5° N e 30° W) foram inundados pelas ondas durante pelo menos 2 dias, danificando vários equipamentos oceanográficos que a Marinha do Brasil mantém no local (comunicação pessoal de Fábio Hazin, coordenador do Projeto Arquipélago). O farol foi o único ponto inatingível dos penedos.

Neste trabalho o evento será reconstituído por um modelo de ondas com dados de vento de superfície fornecidos pela reanálise do NCEP. O objetivo é testar a habilidade do modelo de ondas em reproduzir a propagação para o litoral norte, e verificar se o campo de vento contém informações suficientes para isto. As propriedades relevantes do campo dos ventos serão enaltecidas de forma que a experiência adquirida com o conhecimento detalhado do evento sirva para identificar e alertar em casos de semelhantes futuras ocorrências.

As discussões ficarão apenas no plano especulativo e qualitativo, pois não há disponibilidade de dados de ondógrafos no norte para comparar e avaliar os resultados dos modelos.

2. Ciclones Tropicais no Atlântico Norte em 1999

Ciclones tropicais originam-se sobre o oceano ao longo da região dos ventos alísios, quando a temperatura da superfície sofre um aumento. São chamados de furacões no Atlântico, tufões no Pacífico e ciclones no Índico. No Atlântico, originam-se geralmente como tempestades tropicais nos cavados das ondas atmosféricas de leste, e adquirem a forma de intensos vórtices no setor oeste do oceano acompanhados dos mais intensos ventos que a natureza consegue sustentar por vários dias. A pressão em seu centro chega a exibir valores de 880 hPa com ventos de 100 m/s.

Em baixos níveis ocorre um fluxo de ar quente e úmido em forma ciclônica e espiralada para seu interior, onde se formam convecções com grande desenvolvimento vertical. Em altos níveis e próximos à tropopausa, os fluxos são para fora em forma de espiral e anticiclônica. Apresenta um movimento descendente em seu centro, denominado olho do furacão, caracterizado como uma região sem nuvens e com ventos bastante fracos. O fato do ciclone se manter vertical, sem inclinação, é importante para manter a pressão baixa em níveis inferiores e os fluxos continuarem transportando ar quente e úmido, mantendo o ciclone ativo. Com o aumento do cisalhamento vertical do vento horizontal, o ciclone tende a enfraquecer.

A freqüência de ocorrência dos ciclones no Atlântico é bastante variável de ano para ano, mas a maioria ocorre entre agosto e outubro, com pico em setembro.

Uma descrição da ocorrência e principais características dos furacões no Atlântico Norte de 1996 e 1997 podem ser encontrados em Pasch e Avila (1999) e Rappaport (1999), respectivamente. Ambos artigos foram produzidos baseando-se no acompanhamento realizado pelo National Hurricane Center, nos Estados Unidos da América, que concentra todas informações relativas a este tipo de fenômeno. Nos 2 anos, pode-se observar que muitos ciclones adquirem um movimento em direção ao pólo, e depois para leste em latitudes acima de 30 – 40 graus, quando passam a apresentar características de ciclones extratropicais (ventos mais fracos, área maior e inclinação para oeste com a altura). Em 1996, o furacão Lili (de 14 – 27 de outubro) evoluiu para um ciclone extratropical que chegou a atingir a Irlanda; segundo Pasch e Avila (1999) este evento como ciclone extratropical gerou ventos com velocidades acima de 40 m/s. Em 1997 o furacão Erika (de 03 - 19 de setembro) evoluiu para um ciclone extratropical, chegando seu centro a apenas 400 km a sudoeste da Irlanda.

	NOME	CLASSE	DATAS	VENTO (nós)	PRESSÃO (mb)	DANOS U.S. (\$milhões)	MORTES
1	ARLENE	T	11 – 18 /06	50	1006	- # -	- # -
2	BRET	H	18 – 25 /08	120	944	60	- # -
3	CINDY	H	19 – 31 /08	120	944	- # -	- # -
4	DENNIS	H	24/08 – 07/09	90	962	157	4
5	EMILY	T	24 – 28 /08	45	1004	- # -	- # -
6	FLOYD	H	07 – 17 /09	135	921	3000-9000	57
7	GERT	H	11 – 23 /09	130	930	- # -	2
8	HARVEY	T	19 – 22 /09	50	994	15	- # -
9	IRENE	H	13 – 19 /10	95	958	800	- # -
10	JOSE	H	18 – 25 /10	85	979	- # -	2
11	KATRINA	T	28/10 – 01/11	35	999	- # -	- # -
12	LENNY	H	13 – 23 /11	135	933	330	17

Tabela 1: sumário dos ciclones tropicais de 1999 . T e H referem-se a tempestade tropical (vento de 34 – 63 nós) e furacão(vento > 64 nós). (fonte: <http://www.nhc.noaa.gov/1999summary.html>)

Um sumário tomado do NOAA mostra que 8 ciclones se desenvolveram no Atlântico durante 1999. A Tabela 1 apresenta este sumário, onde o furacão Floyd revela-se o mais intenso e devastador. Entretanto, sabe-se que o furacão Irene foi absorvido por um ciclone extratropical e gerou vastíssimas pistas com ventos intensos causando a maior

agitação marítima da temporada no Atlântico Norte. Atingiu as Ilhas Britânicas, a Península Ibérica, o norte da África, as Ilhas Canárias, e Cabo Verde. As ondas produzidas foram de tal intensidade que marulhos chegaram aos Penedos de São Pedro e São Paulo com efeito devastador, conforme resultados das simulações numéricas. O litoral norte do Brasil teve em algumas cidades uma intensa ressaca com ondas de período de 20 segundos. A Figura 1a apresenta a trajetória aproximada do ciclone Irene até a data em que foi absorvido pelo ciclone extratropical.

3. Descrição do Evento no Arquipélago de São Pedro e São Paulo

3.1 - Características Físicas-Geográficas do Arquipélago

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo é uma formação rochosa composta basicamente por cinco pequenas ilhas e cinco rochas na posição $00^{\circ} 55' N$ e $29^{\circ} 20' W$, a uma distância aproximada de 610 km de Fernando de Noronha e 950 km da costa do Rio Grande do Norte, conforme Figura 1b. A área total desta formação é de aproximadamente 17000 m², sendo que a maior das ilhas (Ilha de Belmonte ou Sudoeste) possui cerca de 7500 m², sendo aproximadamente 60 m por 120 m, e altura máxima de 17 m. O ponto mais alto está na Ilha Nordeste a uma altitude de 23 m. As ilhotas estão dispostas em semicírculo formando uma enseada voltada para noroeste com cerca de 100 m de comprimento e 50 m de largura, e uma profundidade média variando de 3 m a 18 m. A maré semidiurna apresenta uma amplitude de 2,5 m. Na maré baixa as três principais ilhas ficam interligadas por acesso terrestre (indicado por linhas pontilhadas na Figura 1b).

As únicas construções civis são um farol e uma estação científica (49 m²) instalados na ilha principal (Ilha Sudoeste), esta última inaugurada em 25/06/98 (Alvarez e Melo, 1999) para dar suporte à realização de projetos de pesquisas do Programa Arquipélago coordenado pela Secretaria Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM).

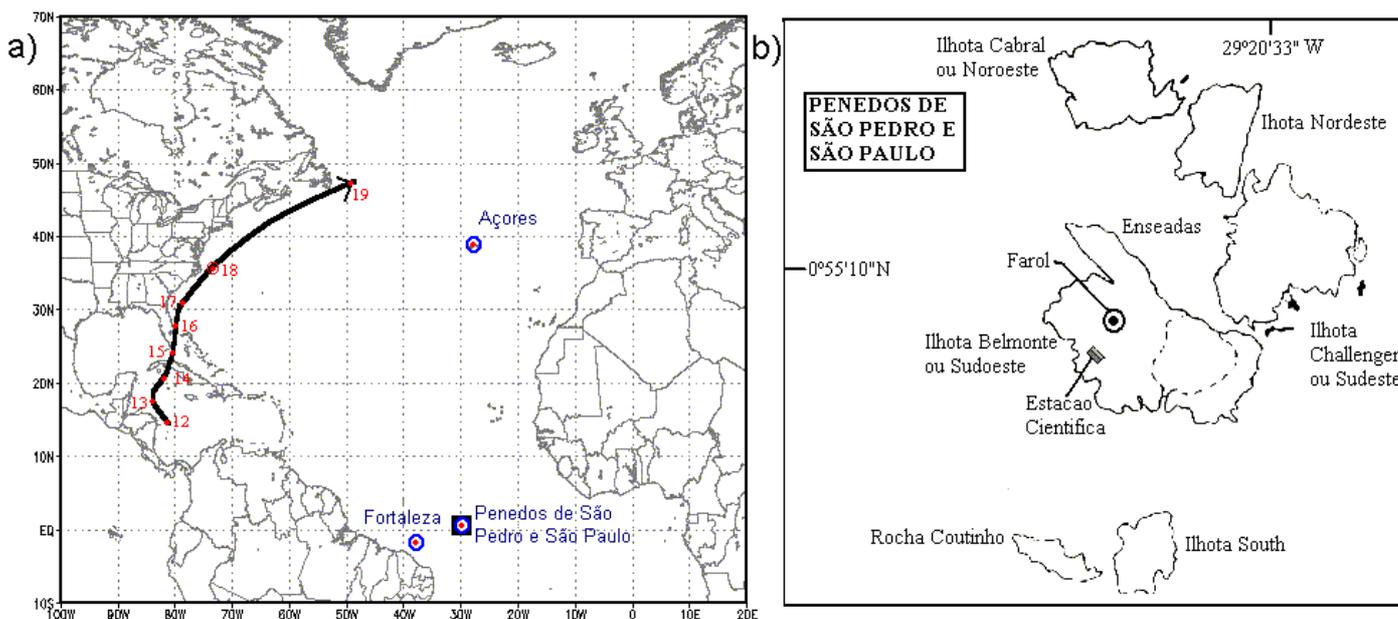


Figura 1: (a) Trajetória do ciclone tropical Irene de 12 – 19 de outubro de 1999 e (b) Penedos de São Pedro e São Paulo. Os pontos assinalados em (b) indicam localizações cujo espectro de ondas é apresentado nas Figuras 5, 6 e 7.

3.2 - Características Climatológicas da Região

A confluência dos ventos de nordeste e sudeste originados dos anticiclones subtropicais do Atlântico Norte e do Atlântico Sul, caracteriza uma região de baixa pressão atmosférica, de convecção profunda e alta nebulosidade, associada com altos índices pluviométricos. Esta estreita banda com convergência de ventos alísios superficiais e de fluxo de umidade, espalha-se pela bacia oceânica inteira, com uma orientação SW para NE na sua maior parte, definindo a Zona de Confluência Intertropical (ZCIT) (Hastenrath, 1985). Esta ZCIT apresenta uma migração meridional sazonal a partir de uma posição aproximadamente equatorial em fevereiro/março para até $8^{\circ} N$ em agosto/setembro no setor oeste do Atlântico, e de $14^{\circ} N$ no setor leste (Hastenrath e Lamb, 1977). Este deslocamento meridional da ZCIT no Atlântico é o principal responsável pelo estabelecimento do regime de chuvas no arquipélago,

ainda que este regime possa apresentar alguma influência de outros sistemas atmosféricos, como as ondas de leste, mas sem grande participação na variação média sazonal.

Desta forma, refletindo a migração e intensidade da ZCIT a estação chuvosa no arquipélago está centrada em fevereiro/março coincidindo com seu posicionamento mais ao sul próximo ao equador, e com o enfraquecimento dos ventos alísios de SE e NE (de 3 a 4 m/s, conforme Servain e Lukas, 1990). O início da migração para o norte da ZCIT em abril/maio, está associada à intensificação dos ventos alísios de SE atingindo seu auge em agosto/setembro (de 5 a 7 m/s, conforme Servain e Lukas, 1990), período característico da estação seca no arquipélago.

Sob a direta influência do sistema de ventos superficiais, a direção da corrente marítima e das ondas predominantes no arquipélago é de SE a NE.

Os campos médios de temperaturas tanto do ar próximo à superfície (Tar), como da superfície do mar (TSM) permanecem numa faixa estreita de variação, com valores de Tar mínimo de 25° C máximo de 34° C, e de TSM igual a 27,5° C no período de fevereiro/março e de 26° C no período agosto/setembro (Servain e Lukas, 1990).

Ainda que os padrões de variabilidade temporal da TSM, da localização da ZCIT e conseqüentemente da precipitação, possam apresentar escalas interanuais ou decadais de flutuações, o sinal sazonal é uma característica muito forte e preponderante do Oceano Atlântico Tropical (Blanke e Delecluse, 1993). É por essa razão que somente são citados os valores entre as duas estações extremas do ano (fevereiro/março e agosto/setembro) para caracterizar a faixa de variação dos campos de ventos, da localização da ZCIT, e da TSM.

3.3 - O Evento de Outubro de 1999

O evento oceanográfico ocorrido no arquipélago que neste trabalho é objeto de análise, iniciou-se na madrugada de 24/10/99 e teve uma duração aproximada de 30h, até a noite do dia 25/10/99, conforme os resultados irão mostrar. Marulhos propagando-se de NNW provocaram fortíssimas arrebentações contra os rochedos, e uma elevação do nível do mar bem acima da variação normal do ciclo da maré que é de 2,5 m de amplitude.

Para proteger a estação científica da incidência de ondas, cuja direção de propagação predominante é SE, foi construída uma estrutura de cimento no lado oeste da Ilha Sudoeste. Entretanto, incidindo de NNW as ondas adentraram a península contrariando as expectativas do lado frontal da Ilha Sudoeste que receberia maior impacto das perturbações marítimas. Isto provocou a destruição de parte da infra-estrutura da estação científica, e de instrumentações instaladas na ilha, forçando os quatro pesquisadores que estavam no local a procurarem abrigo no ponto mais alto da ilha onde está colocado o farol (comunicação pessoal de Fábio Hazin).

As condições meteorológicas durante o evento eram absolutamente normais, com ventos leves, sem nebulosidade, e sem nenhuma indicação de algum sistema atmosférico próximo que pudesse provocar tão intensa ressaca. Estes marulhos atingiram também o Atol das Rocas que chegou a ficar totalmente submerso.

4. Modelo de Previsão de Agitação Marítima Utilizado

Para diagnosticar o estado da superfície do mar neste trabalho, poderiam ser utilizados o modelo de segunda geração (Innocentini e Caetano Neto, 1996) ou o modelo de terceira geração WAM-4 (Komen et al., 1994). Ambos tem sido empregados em vários estudos de casos (e. g., Porfírio da Rocha et al., 1998), e estão operacionalmente implementados nas previsões diárias do estado do mar conduzidas no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) em São José dos Campos (veja <http://www.atlasul.inpe.br>). Um estudo recente confrontando os resultados destes modelos com observações (Innocentini e Caetano Neto, 1999) mostrou que as diferenças entre eles eram insignificantes, sendo que em certas ocasiões ambos divergiam das observações. A conclusão foi de que a deficiência maior era nos valores no campo dos ventos. Entretanto, estes experimentos foram realizados para o Mediterrâneo, oceano fechado e de dimensões muito menores que o Atlântico, e provavelmente os marulhos não desempenharam papel muito relevante na formação do espectro nos pontos onde as observações foram conduzidas. Sabendo-se que a maior deficiência do modelo de segunda geração em relação ao de terceira é no tratamento dos marulhos (The Swamp Group, 1985), e no caso apresentado estamos interessados em reproduzir a propagação de marulhos no norte do Brasil, a utilização do modelo de terceira geração é recomendável. No momento, este trabalho poderia utilizar o modelo de terceira geração WAM-4 ou WWATCH. Uma série de experimentos comparando os resultados destes modelos está sendo realizado (Innocentini et al., 2000). No presente trabalho utilizaremos o WWATCH com o objetivo de testar sua habilidade em reproduzir o fenômeno.

O WWATCH é um modelo de terceira geração utilizado operacionalmente no NCEP. Atualmente esta sendo testado no FNMOC e no The corps of Engineers através de comparações com o WAM-4 e observações. Basicamente, toda física do WWATCH segue o WAM-4, com algumas modificações na propagação, o que parece fornecer melhores resultados em simulações de marulhos (Tolman, comunicação pessoal).

O modelo de ondas WWATCH está sendo desenvolvido no Ocean Modeling Branch do NCEP (Tolman, 1999). É um modelo espectral de terceira geração. A equação básica utilizada é a equação de conservação de energia, escrita na forma

$$\frac{dE}{dt} = S_{in} + S_{nl} + S_{bot} + S_{ds}$$

onde:

- S_{in} : fonte de energia fornecida pelo vento
- S_{nl} : interações não-lineares entre os membros que compõe o espectro
- S_{ds} : dissipação tipo whitecapping
- S_{bot} : dissipação devido ao fundo do oceano.

Modelos de segunda e terceira geração são idênticos, exceto pela forma com que as interações não lineares são computadas. Neste trabalho utilizamos a formulação apresentada em Tolman e Chalikov (1996) para os termos do lado direito da equação.

O domínio do modelo é constituído por uma grade regular com espaçamento de 1 grau, sobre o Atlântico de 70° S a 70 ° N. A batimetria foi obtida da área pública do site do NOAA (ngdc.noaa.gov/ngg/global/seldobo.html), cuja resolução é de 1/12°. A profundidade em cada ponto foi obtida computando-se a média da profundidade dos pontos que compõe um quadrado com 13 X 13 pontos, tendo como centro o ponto em questão. O ângulo de separação entre 2 direções é de 15°, o que fornece 24 direções. As frequências são dadas por:

$$(0,04) \times (1,3)^{i-1}; i = 1, 2, \dots, 13.$$

Nos resultados das simulações serão apresentados a altura significativa

$$H_s = 4\sqrt{E^*}$$

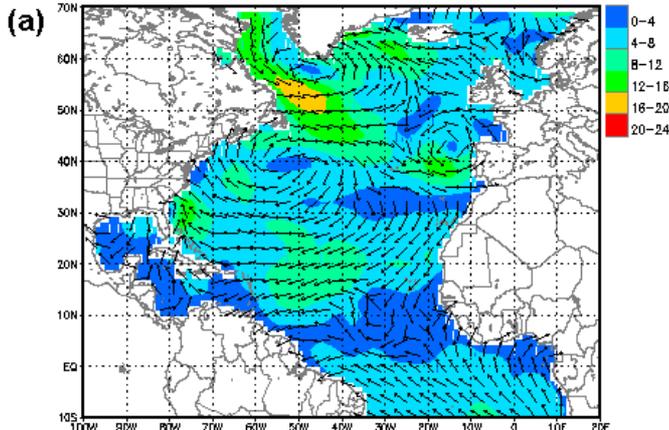
onde E^* é o espectro integrado em todas direções e frequências, e o espectro em alguns pontos selecionados, a fim de se obter uma avaliação da distribuição da energia.

5. Simulação do Caso 24-26 de Outubro de 1999

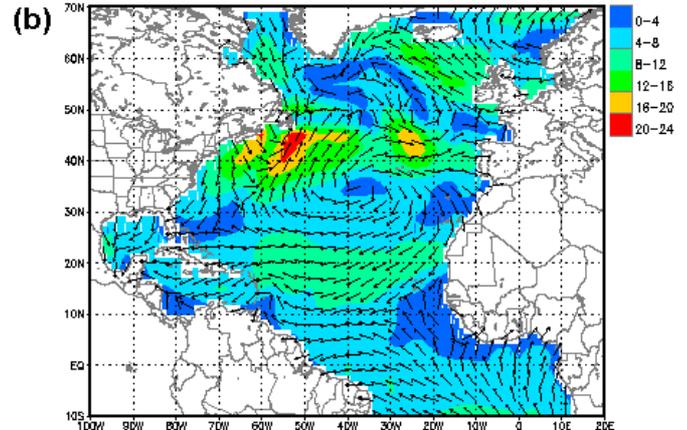
A trajetória do furacão Irene, de 12 a 19 de outubro, pode ser acompanhada na Figura 1. No dia 15 de outubro o furacão está próximo a Cuba, em 20° N 80° W. No dia 16, desloca-se e alcança a latitude de 30° N ao norte da Flórida. O ciclone continua se deslocando para nordeste nos dias 17, 18 e 19.

A Figura 2a representa os ventos de superfície (10-m acima da superfície) de 17 de outubro 00 UTC, onde o furacão esta posicionado ao largo da costa leste dos EUA, ao norte de Cuba. Nota-se um anticiclone a nordeste do furacão, e no litoral norte do Canadá um ciclone com ventos acima de 16 m/s. Ambos desempenharam um papel importante no desenvolvimento da intensa agitação marítima. No dia 18 (figura omitida) o furacão avança para nordeste ao longo do litoral, e o flanco superior do anticiclone se fortalece, apresentado velocidades acima de 12 m/s, enquanto o ciclone extratropical se mantém na mesma posição. No dia 19 o furacão é absorvido pelo flanco oeste do anticiclone e é empurrado em direção norte, conforme Figura 2b. Note que o ciclone extratropical continua ao norte do Canadá, sem mostrar sinais de intensificação.

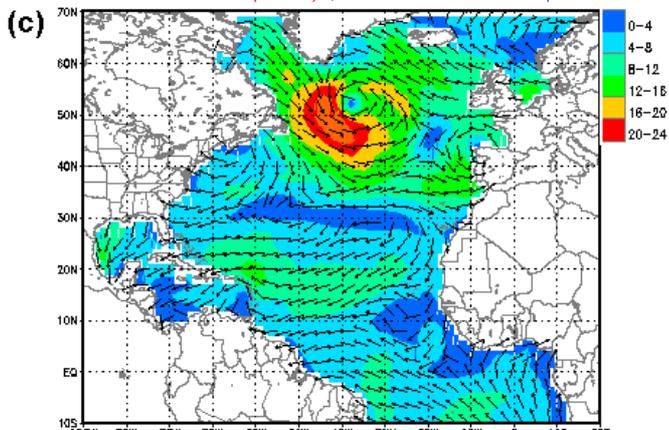
VALIDO PARA : 17 OUT 1999 00Z (DOMINGO) previsão 48 h vento de superfície



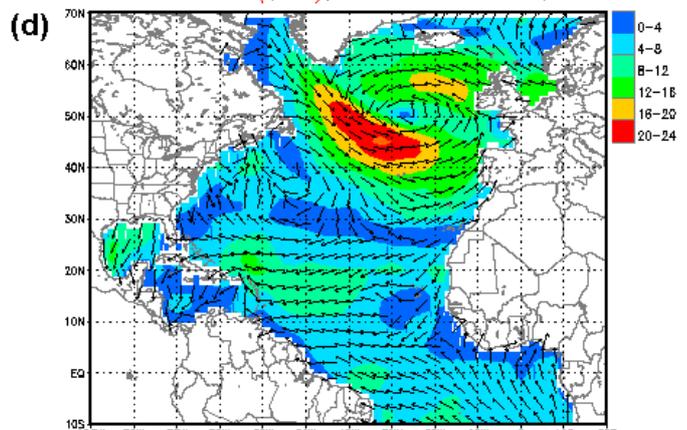
VALIDO PARA : 19 OUT 1999 00Z (TERÇA) previsão 96 h vento de superfície



VALIDO PARA : 20 OUT 1999 00Z (QUARTA) previsão 120 h vento de superfície



VALIDO PARA : 21 OUT 1999 00Z (QUINTA) previsão 144 h vento de superfície



VALIDO PARA : 23 OUT 1999 00Z (SABADO) previsão 192 h vento de superfície

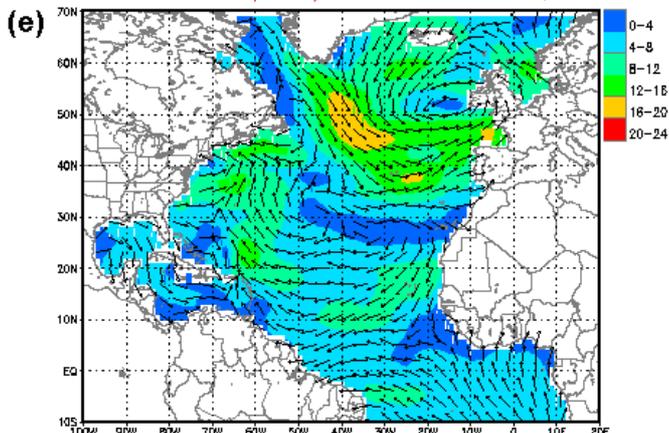


Figura 2: Ventos de superfície (10 – m acima da superfície) em m/s fornecido pela reanálise do NCEP.

A partir do dia 20, o furacão deixa de existir pois está totalmente absorvido pelo ciclone extratropical. Os ventos de superfície, estão acima de 24 m/s em uma região muito vasta, formando ótimas condições para geração de ondas e propagação para sudeste, conforme mostra a Figura 2c. No dia 21 a região com ventos acima de 20 m/s dirigidos para sudeste abrange uma área gigantesca, conforme Figura 2d. No dia 22 (figura omitida) os ventos continuam soprando para SE em uma vasta área que atinge a Península Ibérica e o norte da África. A partir do dia 23, os ventos ainda são intensos, mas a área com ventos acima de 16 m/s se distancia da costa e os ventos mais intensos sopram de NNE, conforme mostra a Figura 2e. Nesta figura nota-se que ao longo da trajetória unindo o ciclone e o norte do Brasil não há ventos fortes em sentido contrário a uma possível propagação de ondas para o sul. O anticiclone no centro do Atlântico Norte forma uma passarela pronta para conduzir agitações marítimas em direção sul. Nas próximas 24 e 48 horas, o ciclone se desintensifica, enquanto a pista se torna parte do flanco este do anticiclone subtropical e ainda

permanece ativa e com ventos soprando de norte, continuando a conduzir toda energia gerada em superfície em direção ao equador.

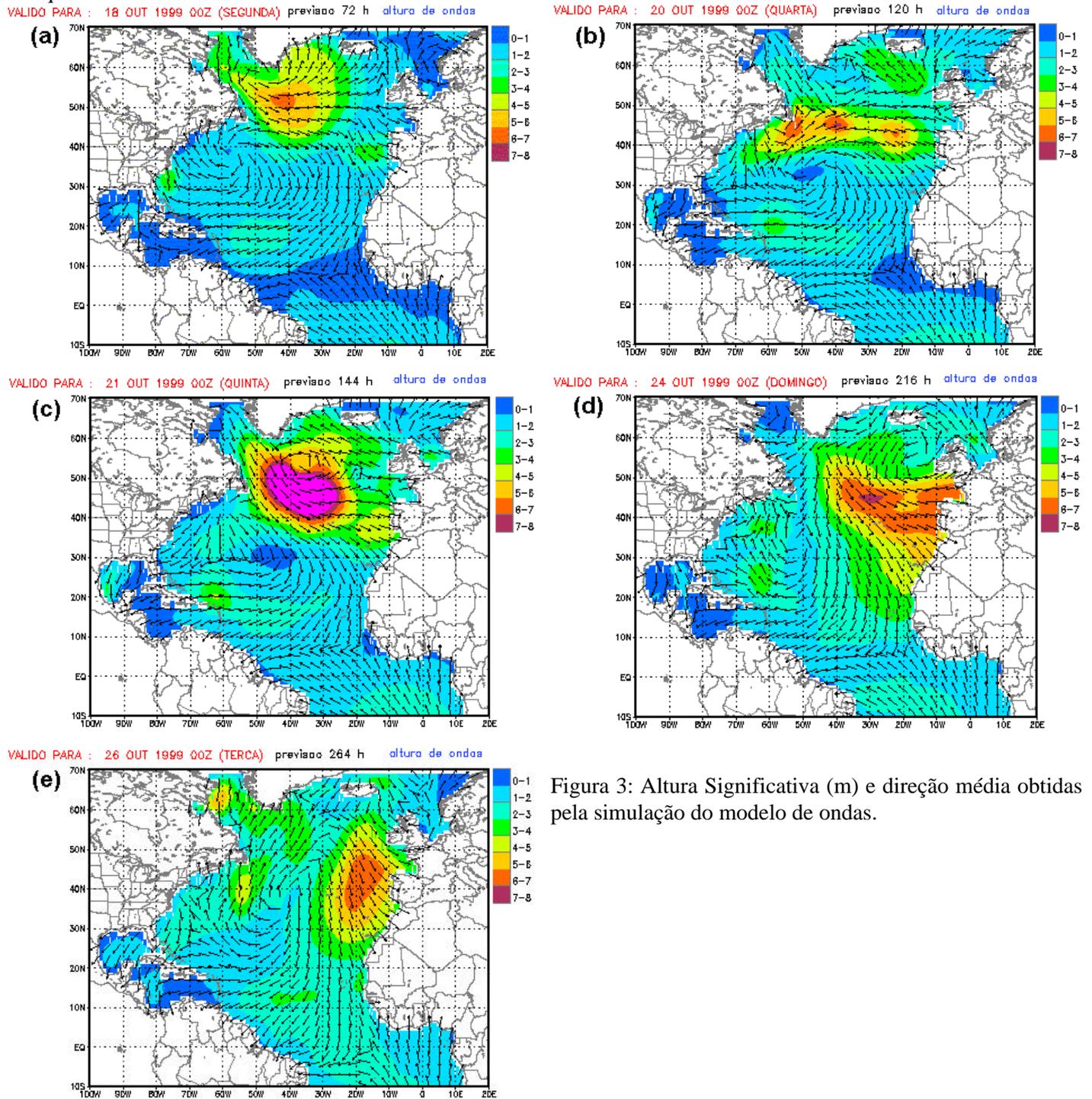


Figura 3: Altura Significativa (m) e direção média obtidas pela simulação do modelo de ondas.

A Figura 3a apresenta a altura significativa e direção média para o dia 18 de outubro de 1999 obtidas pela simulação do modelo de ondas WWATCH. Nota-se que há uma região próxima à Flórida nos EUA com agitação marítima procedente do furacão Irene. A influência do anticiclone e do ciclone extratropical, evidentes na Figura 2, se faz notar na agitação marítima do dia 18. No dia 20 na região de confluência entre o anticiclone e o ciclone, desenvolve-se uma intensa agitação marítima com núcleos de ondas acima de 5 metros propagando-se para E ou NE, conforme Figura 3b. No dia 21, conforme Figura 3c, uma extensa região com ondas acima de 11 metros é visível no centro do Atlântico Norte. Nos dias 22 e 23 a área com ondas acima de 11 m se expande e uma região com ondas

acima de 7 metros se aproxima da Península Ibérica (figura omitida). No dia 24 ocorre uma diminuição da altura das ondas, mas a energia se espalha pelo Atlântico Norte, conforme Figura 3d. Nota-se que ondas com altura acima de 2 m se aproximam da região Norte do Brasil. No dia 26 a região com ondas acima de 2 m propagando-se de sul é bastante abrangente e atravessa o equador, segundo a Figura 3e.

Na simulação deste evento vários pontos sobre o oceano foram selecionados para monitorar a evolução do espectro de ondas. Neste artigo vamos apresentar o espectro obtido em Açores, Penedos de São Pedro e São Paulo, e Fortaleza, com localizações indicadas na Figura 1.

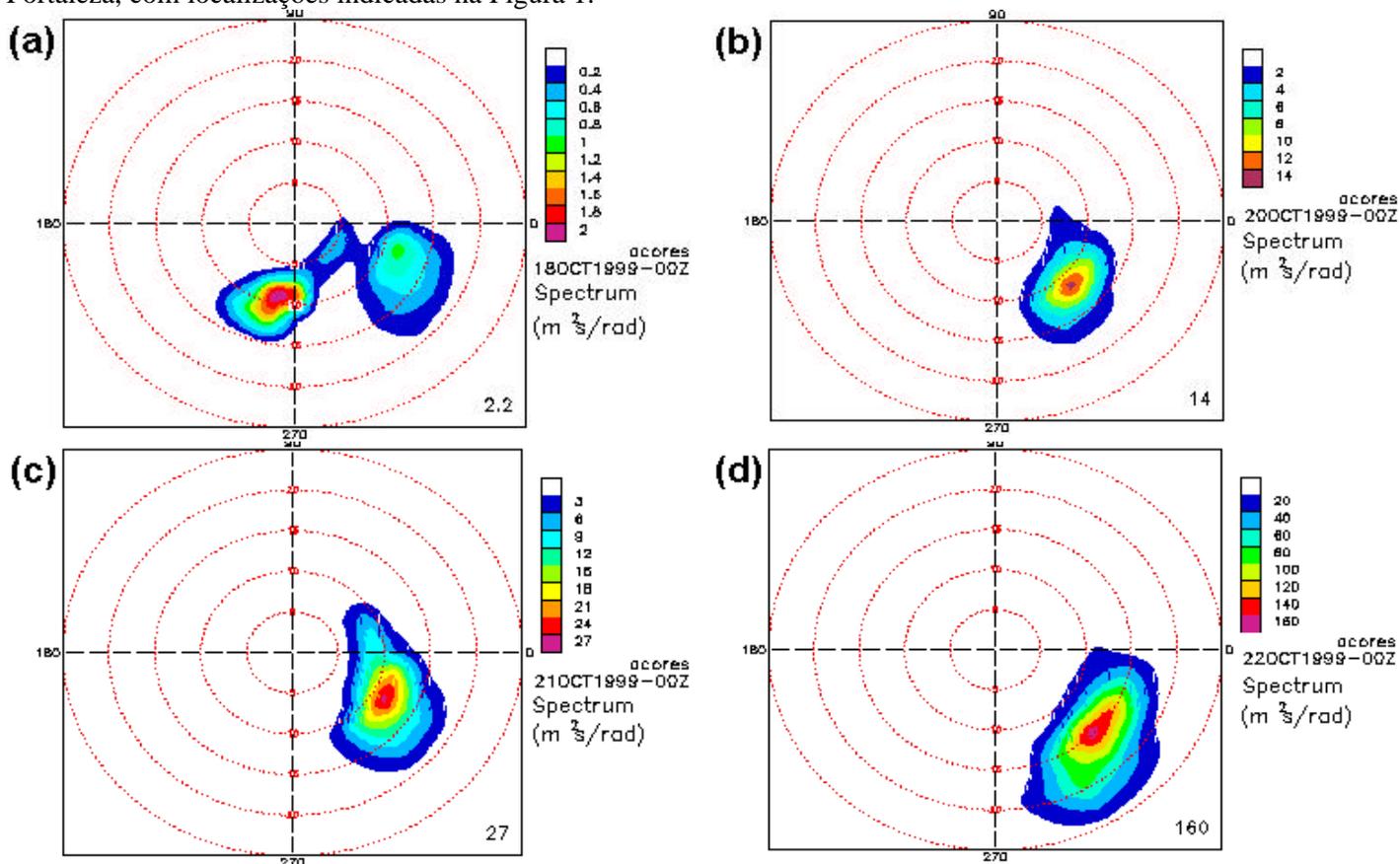


Figura 4: Espectro de ondas em Açores.

A Figura 4 representa o espectro de ondas para Açores em 18, 20, 21 e 22 de outubro de 1999 00 UTC. Os espectros anteriores ao dia 18 (figuras omitidas) apresentam energia propagando-se de N ou NNW com período de pico evoluindo de 7 s para quase 10s. No dia 18, conforme Figura 4a, uma propagação de WNW de pouca intensidade, e período de pico em 12 s atinge a região. Nos próximos dias (Figuras 4b - d) o espectro evolui apresentando máxima energia no dia 22 com período de 15 s. Esta localidade representa um ponto onde o espectro se formou, enquanto que os outros dois pontos, descritos a seguir, receberam energia propagando-se de outras regiões.

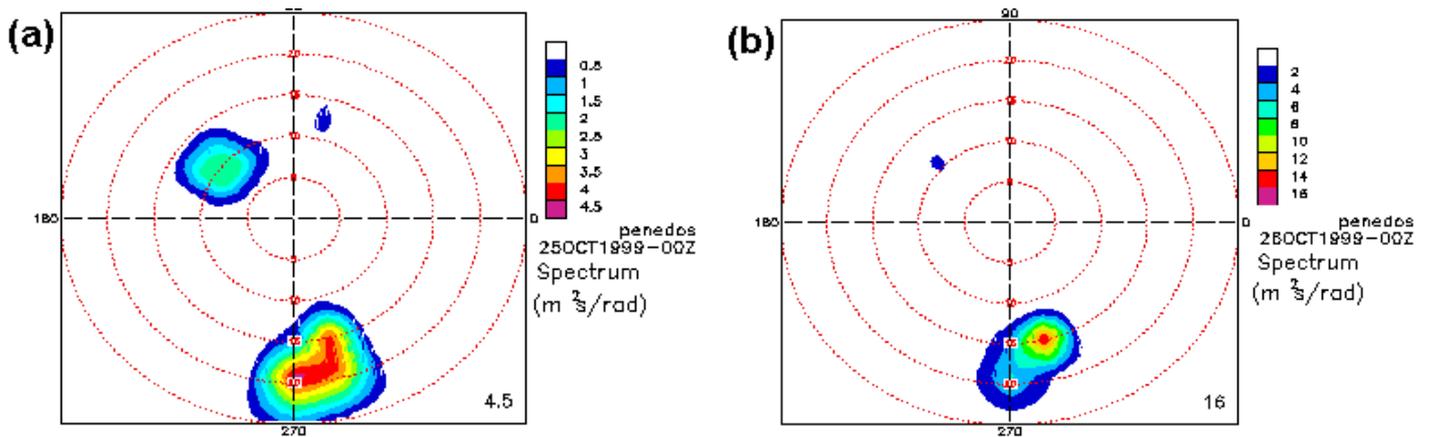


Figura 5: Espectro de ondas em Penedos de São Pedro e São Paulo.

Em Penedos de São Pedro e São Paulo antes do dia 22, o espectro de ondas mostra propagação de SE com período de pico em 10 s (figuras omitidas). A partir de 23 de outubro, alguma propagação de N ou NNW é recebida nesta localidade. A propagação se intensifica nos próximos dias. No dia 25, a Figura 5a mostra propagação de N em 20 s e outra de NNW em 15s, ambas bastante intensas. No dia 26, a intensidade da propagação é máxima, o que ocorre em período de 15s (Figura 5b). Note que a energia em 20 s continua praticamente a mesma do dia anterior.

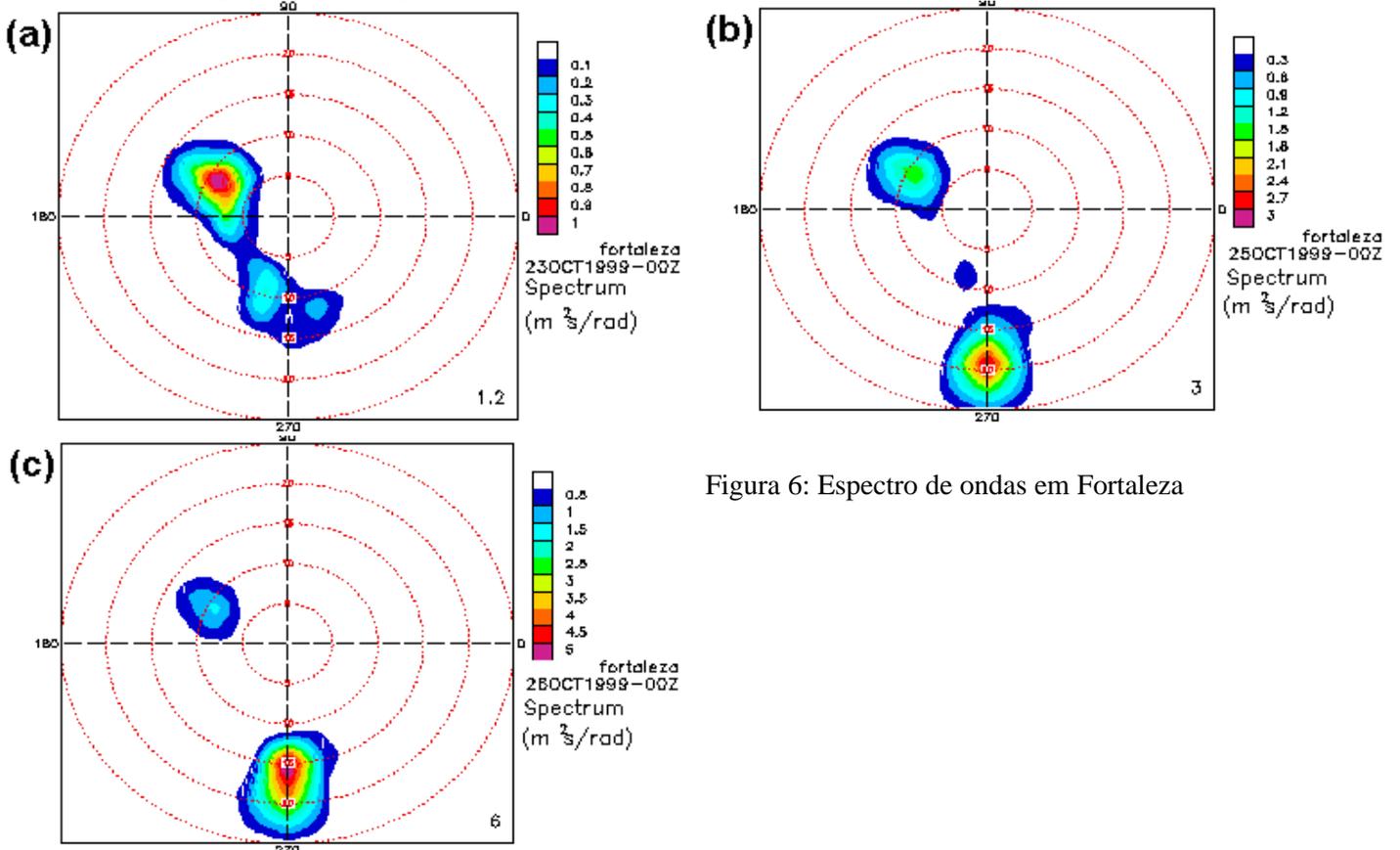


Figura 6: Espectro de ondas em Fortaleza

Em Fortaleza, similar ao que ocorreu nos penedos, o espectro de ondas mostra energia se propagando de ESE com período abaixo de 10 s antes do dia 23. No dia 23 alguma energia de NNE atinge a região com pico em 10 s, conforme Figura 6a. A propagação atinge este ponto no dia 25, propagando-se de N com pico em 20 s (Figura 6b). A propagação máxima ocorre no dia 26, com energia em torno de 15 s, conforme Figura 6c.

6. Conclusão

As condições que propiciaram a propagação de ondas com período de pico em torno de 20 s na região Norte do Brasil foram geradas por um ciclone extratropical responsável por uma enorme e intensa pista com ventos acima de 24 m/s. As ondas no Atlântico Norte atingiram alturas superiores a 14 m.

O ciclone extratropical evoluiu graças a uma combinação entre o ciclone tropical Irene, o anticiclone subtropical do Atlântico Norte, e um ciclone extratropical no norte do Canadá. O anticiclone conduziu o ciclone tropical Irene ao ciclone extratropical, que gerou uma imensa região com ventos acima de 24 m/s.

Durante e após a geração de ondas gigantescas no Atlântico Norte, os ventos entre a zona de geração e o litoral norte do Brasil não mostravam direção e intensidade que possibilitasse o desvio ou dissipação da energia que se propagava. O flanco oeste do anticiclone subtropical do Atlântico se estruturou de forma a facilitar a propagação para a região Norte do Brasil.

O espectro de ondas mostra que a energia gerada é máxima no período de 15 s. Na região Norte do Brasil, a chegada da energia em 15 s foi precedida pela energia em 20 s, mostrando uma situação típica de propagação de ondas geradas em regiões muito distantes devido ao desacoplamento das componentes do espectro que tem velocidades de grupo distintas.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi realizada graças ao apoio concedido pela FAPESP, auxílios 95/4573-5, 99/10012-7, e 99/10013-7, e pelo CNPq, auxílios 30.382/86.0.

Referências:

- Alvarez, C. E. e J. E. Melo, 1999: A estação científica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. V ENCAC – Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Fortaleza, 22 - 26 de Novembro de 1999.
- Blanke, B. e P. Delecluse, 1993: Variability of the tropical Atlantic ocean simulated by a general circulation model with two different mixed-layer physics. *J. Phys. Ocean.* 23 (7): 1363-1388.
- Chan, S. C., 1990: Analysis of the easterly wave disturbances over South Atlantic Ocean. MSc dissertation, INPE, SJC, SP, Brasil, 104 pp.
- Hastenrath, S., 1985: Climate and circulation of the tropics. D. Reidel, Dordrecht, Holland, 1985, 45 pp.
- Hastenrath, S. e P. J. Lamb, 1977: "Climatic atlas of the tropical Atlantic and Eastern Pacific Ocean". University of Wisconsin Press, Madison, 15 pp.
- Innocentini, V. e E. S. Caetano Neto, 1996: A case study of the 9 August 1988 South Atlantic Storm: Numerical simulations of the wave activity, *Wea. Forecasting*, 11, 78-88.
- Innocentini, V., E. S. Caetano Neto, e L. Cavaleri, 1999: A comparative study of the WAM and a second generation Wave Model in the Mediterranean sea. Proc. Of the International Conference on Wind and Wave Climate of Mediterranean and Black Sea. March 30 – April 99. Antalya, Turkey.
- Innocentini, V., E. S. Caetano Neto, e R. Porfírio da Rocha, 2000: A Comparative Study of the WAW and WWATCH. Em preparação
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, e P. A. E. M. Janssen, 1994: Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press, 532 pp.
- Pasch, R. J. e L. A. Avila, 1999: Atlantic Hurricane Season of 1996. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 581-610.
- Rappaport, E. N., 1999: Atlantic Hurricane Season of 1997. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2012-2026.
- Porfírio da Rocha, R., E. S. Caetano Neto, e V. Innocentini, 1998: Estudo do evento de 09 a 13 de junho de 1989 no Atlântico Sul: Simulações numéricas da Atmosfera e da Agitação Marítima. Pesquisa Naval, Suplemento Especial da Revista Marítima Brasileira, 11, 279-297.
- Servain, J.; Lukas, S., 1990 " Climatic Atlas of the Tropical Atlantic wind stress and sea surface temperature, 1985-1989 ". IFREMER, France, 133 pp.
- The SWAMP Group, 1985: An intercomparison study of wind wave prediction models, Part 1: Principal results and conclusions. *Ocean Wave Modelling*, Plenum Press, 256 pp.
- Tolman, H. L. e D. V. Chalikov, 1996: Source terms in a third generation wind wave model. *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 2497-2518.
- Tolman, H. L. , 1999/; User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. OMB Contribution 166, NOAA/NCEP