

Capítulo I

TSUNAMIS METEOROLÓGICOS NO SUL DO BRASIL: PROCESSO DE FORMAÇÃO, ÁREAS DE OCORRÊNCIA E IMPACTOS ASSOCIADOS





TSUNAMIS METEOROLÓGICOS NO SUL DO BRASIL: PROCESSO DE FORMAÇÃO, ÁREAS DE OCORRÊNCIA E IMPACTOS ASSOCIADOS

Ulisses Rocha de Oliveira¹; Rodrigo Silva Simões²; Marco Antônio Rigola Romeu³;
Lauro Júlio Calliari⁴; Michelle Reboita⁵

¹Professor do Instituto de Ciências Humanas e da Informação da Universidade Federal de Rio Grande, Avenida Itália, km 8, Bairro Carreiros, CEP 96203-900, Rio Grande, Rio Grande do Sul. ulissesoliveira@furg.br (autor correspondente)

²Programa de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. rodrigossimoes@furg.br

³Professor da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande. mar7surf@hotmail.com

⁴Professor Aposentado do Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande. lcalliari@gmail.com

⁵Professora do Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá. reboita@unifei.edu.br

RESUMO

Nas últimas décadas, a costa sul do país tem registrado a ocorrência de tsunamis meteorológicos, isto é, ondas com alguma semelhança das causadas por tsunamis com origem em processos geológicos, mas com ocorrência ligada a fenômenos atmosféricos. O presente estudo visa relatar a ocorrência de tsunamis meteorológicos registrados na costa sul do Brasil entre 2009-2020 e apresenta informações gerais desde as condições de formação até os impactos que eles causaram na orla costeira. Para isto, foi realizada uma breve revisão bibliográfica sobre o tema, a compilação dos registros disponíveis acerca dos eventos, uma caracterização meteorológica das horas que antecederam cada evento além da caracterização da orientação da linha de costa e aspectos morfossedimentares das praias atingidas pelo fenômeno. Quanto à origem, todos eventos de tsunamis meteorológicos analisados, ocorreram num ambiente associado à passagem de frente fria, que contribui para o desenvolvimento de áreas de instabilidade na atmosfera com consequente influência na troca de energia entre o ar e a superfície marinha. Nos locais de registro de tsunamis meteorológicos, a linha de costa é orientada numa direção que a deixa exposta ao sentido do deslocamento dos sistemas de tempo e as praias possuem baixa declividade. Os tsunamis meteorológicos registrados em 2014 e 2020 atingiram o limite superior da praia enquanto que os registrados em 2009, 2016 e 2018 avançaram para além do limite superior da praia, atingindo dunas frontais, canais sangradouros e as áreas urbanas situadas próximas da praia. Os impactos são sobretudo materiais, nos veículos automotores estacionados na faixa de praia e nas edificações situadas junto a praia ou em cotas baixas próximas aos canais sangradouros e arruamentos, embora possam trazer algum risco a banhistas e moradores das áreas afetadas.

Palavras-chave: Tsunami meteorológico; fatores meteorológicos; praias arenosas oceânicas; riscos costeiros; sul do Brasil.

METEOTSUNAMIS IN SOUTHERN BRAZIL:

FORMATION, OCCURRENCE AND ASSOCIATED IMPACTS

ABSTRACT

The Brazilian southern coast has recently recorded the occurrence of meteorological tsunamis, that is, tsunami-like sea waves triggered by geological processes, but connected to atmospheric phenomena. This study aimed to report the occurrence of meteorological tsunamis on the southern coast in Brazil between 2009 and 2020 by providing general information on their formation conditions and their impact on the coastline. A brief bibliographical review on the subject was made, records of the events found on the Internet were compiled, a meteorological characterization of the time period before the events was carried out and a brief characterization of the orientation of the coastline and of morphosedimentary aspects of beaches affected by the phenomenon was outlined. Regarding the origin of all meteorological tsunami events, there was displacement of areas of atmospheric instability parallel to the coastline from southwest to northeast in the areas south of the coastal segment that was affected. Areas of instability generated strong winds and caused pulses of atmospheric pressure that moved over the ocean. In places where meteorological tsunamis were recorded, the coastline is oriented in a direction that exposes it to the direction of the displacement of instability lines and beaches have a low slope. Meteorological tsunamis recorded in 2014 and 2020 reached the upper limit of the beach, while those recorded in 2009, 2016 and 2018 advanced beyond the upper limit of the beach and reached frontal dunes, bleeding channels and urban areas located close to the beach. They cause several impacts, mainly material ones on motor vehicles parked on the beach strip and buildings located either next to the beach or at low elevation close to washout channels and streets, although they may also pose risks to human lives.

Keywords: Meteorological tsunami; meteorological factors; sandy beaches; coastal risk; southern Brazil.

INTRODUÇÃO

A palavra tsunami, que em japonês significa onda de porto, é associada a ondas volumosas ocasionais, que por vezes geram verdadeiras tragédias ao atingir áreas costeiras urbanizadas, ocasionando perdas materiais e de vidas humanas. Embora na costa brasileira a atividade tectônica e a influência dos tsunamis ocasionados por fatores geológicos sejam pequenas, MELO & ROCHA (2005), por exemplo, identificaram a ação do chamado “Tsunami Sumatra” na costa do Brasil.

A costa brasileira, em algumas ocasiões, é atingida por ondas com características similares às causadas por tsunamis com origem em processos geológicos, mas que são decorrentes da ação de fenômenos meteo-oceanográficos. Essas ondas recebem o nome de tsunamis meteorológicos ou meteo-tsunamis e possuem escalas temporais e espaciais comparáveis que as ondas comuns de tsunami (RABINOVICH & MONSERRAT 1996). Segundo PEREZ (2018), tsunamis meteorológicos, ou meteo-tsunamis, são ondas longas que podem chegar à costa e são causadas por distúrbios meteorológicos. Este termo foi introduzido na comunidade científica internacional por Defant, durante a reunião da "International Union of Geodesy and Geophysics", ocorrida no Havaí em 1961. São caracterizados por apresentarem periodicidades muito semelhantes às dos tsunamis mais comuns, mas a principal diferença é que sua forçante é atmosférica (RABINOVICH & MONSERRAT, 1996). Segundo PEREZ (2018), nas diferentes regiões costeiras do mundo onde foi relatado o fenômeno do tsunami meteorológico, a forçante de origem das ondas foi associada a fatores como, por exemplo, a passagem de frentes frias por determinados segmentos marinho costeiros, sendo caracterizada a propagação de ondas de gravidade sobre a áreas marítimas de influência.

Mesmo sem o mesmo poder erosivo de uma “ressaca do mar” (MELO et al., 2016), em que também ocorra maré meteorológica, quando as ondas podem ficar atuando na costa com o nível do mar elevado por horas ou até dias erodindo um determinado local, os tsunamis meteorológicos são eventos de atuação rápida na linha de costa

atingida. No entanto, tratam-se de eventos perigosos, ou ameaças naturais, que podem causar perda de meios de obtenção de sustento; impactos sociais, econômicos e ambientais; e ocasionar impactos à saúde humana como lesões e até morte.

MELO et al. (2004), descreveram, através de relatos históricos, um evento ocorrido em fevereiro de 1977 próximo aos molhes da barra na praia do Cassino, no município de Rio Grande (RS). A partir dos anos 2000, com a era digital, câmeras e celulares começaram a se multiplicar e a registrar e divulgar fenômenos em tempo real ao longo da costa sul do Brasil. Neste período, ocorreram registros pela internet de pelo menos cinco meteo-tsunamis na costa sul do Brasil, em trechos diferentes: em 19-11-2009 na praia do Pântano do Sul, localizada no sul da Ilha de Santa Catarina, Florianópolis (SC), descrito por MELO et al. (2010); em 9-2-2014, na praia do Cassino (RS), descrito por CANDELLA et al. (2018); em 17-10-2016 na costa sul do Estado de Santa Catarina, nas praias entre os Balneários Rincão e Arroio do Silva (SC) e novamente na praia do Cassino (RS), em 14-3-2020.

Além destes divulgados na internet, pelo menos mais outros dois eventos ocorreram na costa sul do Brasil nos últimos anos. Em 23-9-2018 um tsunami meteorológico atingiu três localidades costeiras (São Simão, Mostardense e Praia do Farol) situadas nos municípios de Mostardas e Tavares, costa central do Rio Grande do Sul. Este fenômeno só foi identificado pois no momento do ocorrido estava sendo realizado um monitoramento praias no local (Simões, 2018; Simões & Oliveira, 2020), sendo que um dos pesquisadores foi avisado pelos próprios moradores locais. ARAÚJO et al. (2020) descreveram um outro evento ocorrido em 2019 na costa catarinense, sem grande divulgação nas redes sociais e noticiários, mas que foi registrado em marégrafos da EPAGRI-SC.

CANDELLA & ARAÚJO (2020), em um estudo de revisão, identificaram que de 1977 a março de 2020, pelo menos seis eventos do tipo tsunamis meteorológicos foram observados no sul do Brasil. O objetivo do presente trabalho é relatar a ocorrência de alguns desses eventos meteo-oceanográficos recentes, denominados de tsunamis

meteorológicos ou meteo-tsunamis, na costa sul do Brasil de 2009 até o presente, descrevendo algumas condições meteorológicas de formação, aspectos geométricos e morfossedimentares das praias que receberam essas ondas, além dos impactos que causaram nas referidas praias ou orlas costeiras, visando consolidar a informação e dar mais visibilidade a esse importante fenômeno costeiro.

MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente foram compilados registros de cinco tsunamis meteorológicos em determinados segmentos da costa sul do Brasil, como registros fotográficos e filmagens: Pântano do Sul (SC) em 2009; Cassino (RS) em 2014; Trecho Araranguá-Rincão (SC) em 2016; Mostardas (RS) em 2018 e novamente Cassino (RS) em 2020 (Figura 1). Destes cinco eventos, em quatro desses foram obtidos registros a partir de vídeos disponibilizados no site Youtube. No caso das praias de Mostardas e Tavares, onde ocorreu um evento noturno, só foi possível o registro pois moradores locais entraram em contato com um dos autores do trabalho e o mesmo deixou marcas de overwash nas dunas costeiras, nas redes de drenagem e edificações. Isto possibilitou identificar a data e o horário do acontecimento num dado local, visando identificar as características meteo-oceanográficas nas horas que antecederam cada evento.

Para cada uma das datas apresentadas na Figura 1 foi realizada uma caracterização meteorológica das 5 horas anteriores ao evento, utilizando (a) a carta sinótica mais próxima do evento obtida do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), (b) imagens do satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), obtidas nos acervos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do INPE, (c) dados de direção e velocidade do vento e pressão atmosférica obtidos em estações meteorológicas situadas próximas aos locais de ocorrência e (d) as componentes zonal e meridional do vento a 10 m de altura obtidas da reanálise ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) com resolução horizontal de 0,25°, com frequência temporal de 1 hora.

Também foi realizada uma breve

caracterização do impacto dos tsunamis meteorológicos na costa e das praias onde houve ocorrência. Aspectos morfossedimentares (declividade da praia e o diâmetro médio do grão) foram identificados usando revisão bibliográfica; imagens orbitais (de satélite) extraídas do software Google Earth PRO foram usadas para identificação da orientação da linha de costa das localidades onde foram registrados eventos; fotografias obtidas por um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), popularmente chamado de drone, das praias de Mostardas e Tavares foram usados para identificar o impacto do tsunami nos referidos locais; enquanto que um perfil topográfico da praia do Pântano do Sul serviu para mensurar o alcance do tsunami meteorológico no referido segmento impactado.



Figura 1. Mapa com locais de registro de tsunamis meteorológicos na faixa de praia no sul do Brasil.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Condições meteorológicas

Tsunami meteorológico de 2009 na praia do Pântano do Sul (SC)

Em 19-11-2009, um vídeo foi gravado na

praia do Pântano do Sul identificando uma onda que atinge embarcações, carros estacionados na praia e a urbanização defrontante ao mar. Este vídeo está hospedado no site YouTube no link¹. Neste site há também uma reportagem de uma rede de televisão local, que complementa algumas informações, sendo esta obtida no link². Cientificamente, este tsunami meteorológico foi descrito por MELO et al. (2010). Os registros indicam que o evento ocorreu no período da tarde, entre 16:00 e 17:00 horas.

Em relação as condições meteorológicas gerais, a carta sinótica mais próxima ao evento (16:00 horas, horário local de verão), mostra o ramo frio de uma onda frontal sobre o sul do Rio Grande do Sul (RS), enquanto a isóbara de 1004 hPa é mais alongada sobre Santa Catarina.

Trata-se de um aglomerado convectivo (advecção quente adiante de frente fria) (Figura 2a). Quanto a movimentação atmosférica nas horas anteriores ao evento, a Figura 2b mostra uma sequência de imagens NOAA GOES entre as 12 e as 16:45 horas (horário local de verão). Estas imagens GOES mostram um aglomerado de nuvens sobre o sul do Estado de Santa Catarina, que é associado com a ampla área de nebulosidade de uma frente fria. Por volta das 13 horas (horário local) as nuvens carregadas ainda estavam sobre o Rio Grande do Sul. A partir das 14 horas avançaram pelo litoral de Santa Catarina de sudoeste para nordeste sobre o oceano adjacente a referida praia no período anterior ao evento, atingindo a área onde foi registrado o tsunami a partir das 16 horas. Já a Figura 2c apresenta dados médios de direção e velocidade do vento entre as 14 e as 17 horas. Estes dados não conseguem identificar claramente nesse período de tempo uma mudança na direção do vento no segmento oceânico adjacente, ao sul da área atingida, embora identifiquem alguma variação. No entanto, identificam sobre a área continental a mudança no sentido do vento na área próxima ao local do registro do evento, passando de noroeste as 14 horas para sudoeste as 16 horas, com aumento na intensidade. Já dados obtidos pela estação meteorológica de São José, localizado cerca de 30 km da praia do Pântano do Sul

(área mais atingida pelo evento em SC), mostram a mudança na direção do vento com aumento da velocidade entre 15 e 16 horas. A estação meteorológica identificou fortes ventos do quadrante sul as 16 horas. Entre as 10 e as 15 horas foram registrados ventos de 10 a 12 m/s do quadrante norte. Já os dados das 16 horas apontam ventos de 26 m/s do quadrante sul, velocidade que decresceu posteriormente as 17 horas. Estes dados corroboram com os relatos das pessoas que presenciaram o evento no local, as quais apontaram uma mudança brusca no tempo, com a chegada repentina de nuvens densas acompanhadas de forte vendaval.

Tsunami meteorológico de 2014 na praia do Cassino (RS)

Em 9-2-2014, um novo tsunami meteorológico atingiu a praia do Cassino (RS), sendo o primeiro com divulgação na internet no referido local. Um vídeo encontra-se hospedado no site YouTube no link³ mostra o pós-praia inundado pela onda, que atinge diversos carros estacionados nesse segmento. Os registros indicam que o evento ocorreu um pouco antes do meio dia, por volta de 11:30 horas. Neste horário haviam muitas pessoas na faixa de praia. Assim como o primeiro evento descrito no local em 1977, por Melo et al., (2005), houveram maiores impactos próximo aos molhes da barra, extremo norte da praia. Cientificamente, foi descrito por CANDELLA et al. (2018).

A carta sinótica mais próxima ao evento (10:00 horas, horário local de verão) identifica uma onda frontal com o seu ramo frio no sul do Uruguai (Figura 3a). As imagens de satélite GOES identificam uma banda mais ampla de nebulosidade que caracteriza a frente. Quanto a movimentação atmosférica nas horas anteriores ao evento, uma sequência de imagens NOAA GOES entre as 7:30 e as 12:00 horas (horário local de verão) mostram o avanço de nuvens de sudoeste para nordeste sobre o oceano adjacente a referida praia no período anterior ao evento (Figura 3b). Por volta das 7:30 horas (horário local) as nuvens carregadas estavam na fronteira entre o Rio Grande do Sul e o Uruguai,

¹ https://www.youtube.com/watch?v=b_Dw1JB5DFs

² <https://www.youtube.com/watch?v=DtZpimOoLZI>

³ <https://www.youtube.com/watch?v=NxPMwZdxlhw>

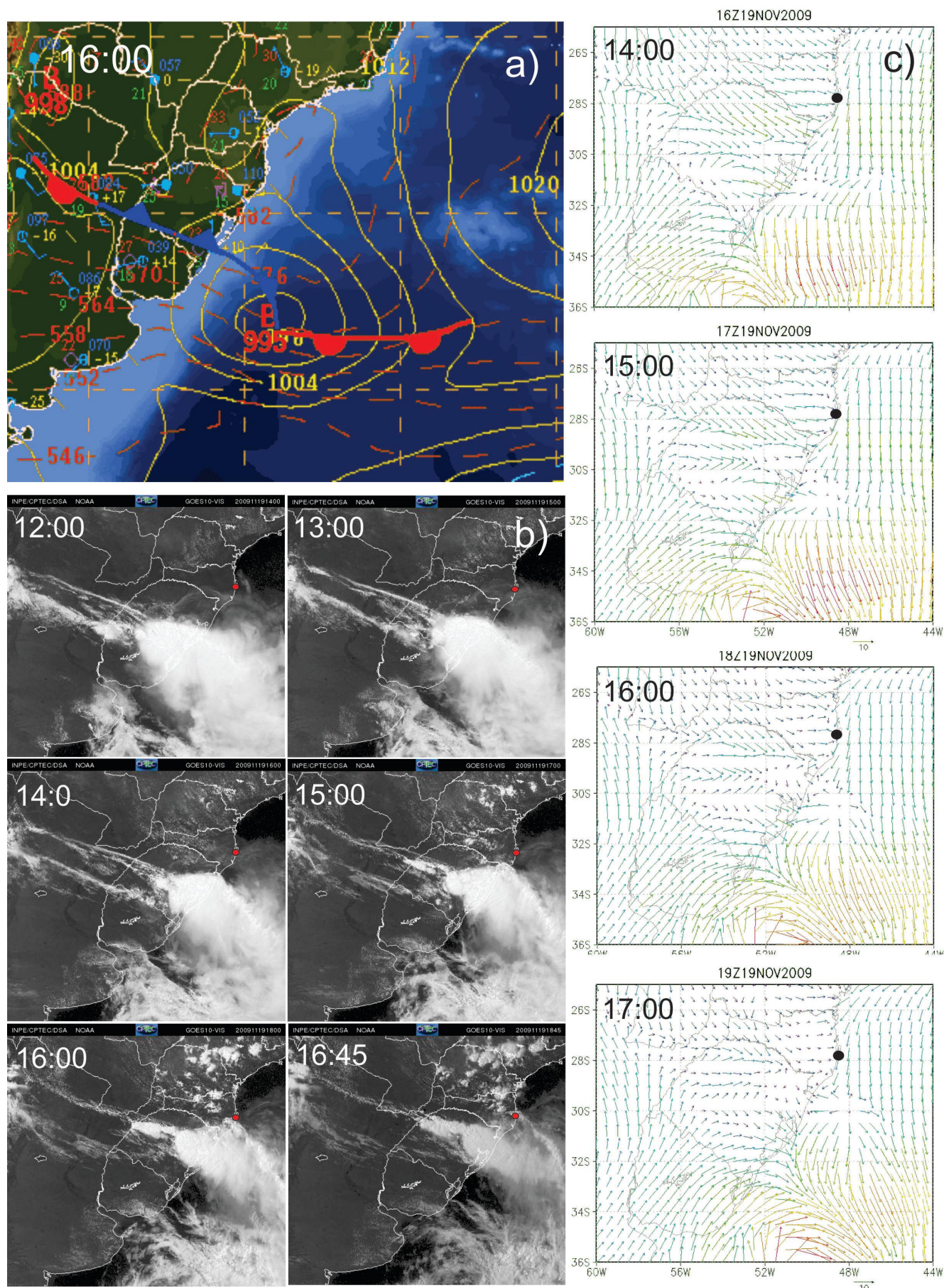


Figura 2. A) Carta sinótica das 16 horas (horário local) do dia 19-11-2009. Fonte: <http://tempo.cptec.inpe.br/cartas.php?tipo=Superficie>. B) Imagens NOAA GOES (mostrando o deslocamento de nuvens entre as 12:00 e as 16:45 horas (horário local)). Fonte: satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes. C) Dados de sentido do vento medidos de hora em hora entre as 14 e as 17 horas (horário local).

Ulisses Rocha de Oliveira, Rodrigo Silva Simões, Marco Antônio Rigola Romeu, Lauro Júlio Calliari e Michelle Reboita

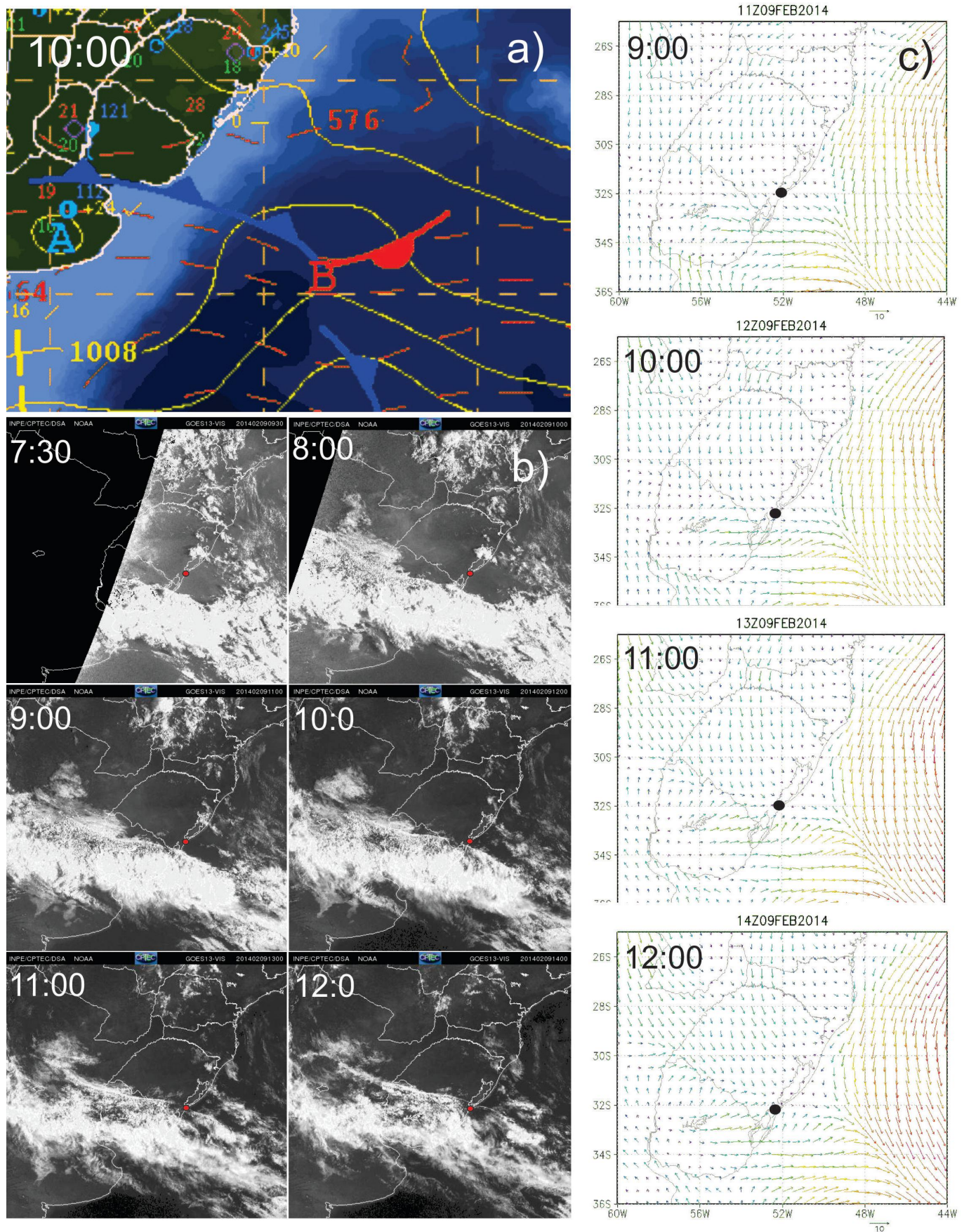


Figura 3. A) Carta sinótica das 10 horas (horário local) do dia 9-2-2014. Fonte: <http://tempo.cptec.inpe.br/cartas.php?tipo=Superfície> B) Imagens NOAA GOES mostrando o deslocamento de nuvens entre as 7:30 e as 12:00 horas (horário local). Fonte: satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes. C) Dados de sentido do vento medidos de hora em hora entre as 10 e as 12 horas (horário local).

Ulisses Rocha de Oliveira, Rodrigo Silva Simões, Marco Antônio Rigola Romeu, Lauro Júlio Calliari e Michelle Reboita

avançando pelo litoral até atingir a área onde foi registrado o Tsunami a partir das 11 horas. Neste caso o efeito meteorológico gerador foi uma tempestade de escala local, que avançou paralelamente a linha de costa. Dados médios de direção e velocidade do vento entre as 9 e as 12 horas identificam a mudança de direção e intensidade do vento na porção ao sul do segmento de praia atingido (Figura 3c). O gráfico das 10 horas mostra ventos de oeste-sudoeste no segmento oceânico ao sul da área atingida. Nesse trecho de oceano, a velocidade do vento aumentou bastante as 11 horas, passando a atuar de sul-sudoeste. As 12 horas o vento já passou a atuar mais de sul diminuindo a velocidade, mas já atuando na área atingida. Os dados da Estação Meteorológica de Rio Grande identificam a mudança na direção do vento entre as 11 e as 12 horas (horário local), identificando o aumento na velocidade do vento nesse intervalo de tempo. As 11 horas foram medidos ventos de 3,4 m/s do quadrante norte e as 12 horas ventos do quadrante sul de 5,3 (indicativos da penetração da massa de ar frio), passando a 5,6 m/s as 13 horas. As rajadas de vento do quadrante sul passaram de 10m/s as 13 horas.

Tsunami meteorológico de 2016 nas praias de Arroio do Silva e Rincão (SC)

Em 17-10-2016, um novo tsunami meteorológico atingiu o sul do Brasil, sendo pela primeira vez registrado na costa sul do Estado de Santa Catarina, nas praias entre os Balneários Rincão e Arroio do Silva (SC). No site YouTube encontra-se um vídeo que traz um apanhado de informações desta data, envolvendo a identificação de uma linha de instabilidade, fortes ventos e o tsunami meteorológico na praia, atingindo alguns carros estacionados no local e edificações defrontantes ao mar, podendo ser obtido no link <https://www.youtube.com/watch?v=asUUXceUD1U>. Os registros indicam que o evento ocorreu no período da tarde, entre 16:30 e 17:00 horas.

Em relação as condições meteorológicas gerais, a carta sinótica das 16:00 (horário local de verão) mostra uma frente fria no extremo sul do RS e um cavado invertido no campo da pressão atmosférica estendendo-se de SP para o oceano

(Figura 4a). Sobre Santa Catarina há as isóbaras do setor nordeste do ciclone localizado no oceano. Trata-se de um sistema convectivo de mesoescala (SCM). Uma sequência de imagens GOES entre as 12:00 e as 17:00 horas (horário local) não conseguem identificar claramente algum avanço de nuvens sobre o oceano adjacente a referida praia no período anterior ao evento, embora identifiquem o avanço de nuvens sobre o continente de sudoeste-oeste para nordeste-leste. Por volta das 14:00 horas (horário local) as nuvens mais carregadas avançam a fronteira entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina pelo litoral, até atingir a área onde foi registrado o Tsunami a partir das 15 horas (Figura 4b). Dados de direção e velocidade do vento para esse mesmo intervalo mostram que ventos variando entre oeste e sul já sopravam na região as 15 horas, antes da ocorrência do evento (Figura 4c). No entanto, as 16 horas estes se intensificam um pouco e variam um pouco de direção na porção oceânica no trecho onde foi registrado o tsunami meteorológico. Dados obtidos na estação meteorológica de Araranguá identificaram predomínio de ventos do quadrante oeste, com aumento nas rajadas por volta de 17 horas, mas as estações não apresentaram dados de uma clara inversão do vento, como ocorrido nos eventos de Pântano do Sul em 2009 e Cassino em 2014.

Tsunami meteorológico de 2018 nas praias de Mostardas e Tavares (RS)

Em 23-9-2018, houve ocorrência de mais um tsunami meteorológico, desta vez atingindo três localidades costeiras, São Simão, Mostardense e Praia do Farol, situadas nos municípios de Mostardas e Tavares. Segundo relato de moradores locais, que avisaram um dos autores do presente trabalho, o evento ocorreu entre as 3:00 e as 4:00 horas da madrugada.

Em relação às condições meteorológicas gerais, a carta sinótica das 3:00 horas (horário local) apresenta a aproximação de uma frente fria no extremo sul do RS (Figura 5a). Na imagem do satélite GOES entre a meia noite (00:00) e as 5:00 horas da manhã do dia 23-9-2018 (horário local), há a formação de um sistema convectivo de mesoescala associado com a advecção de ar

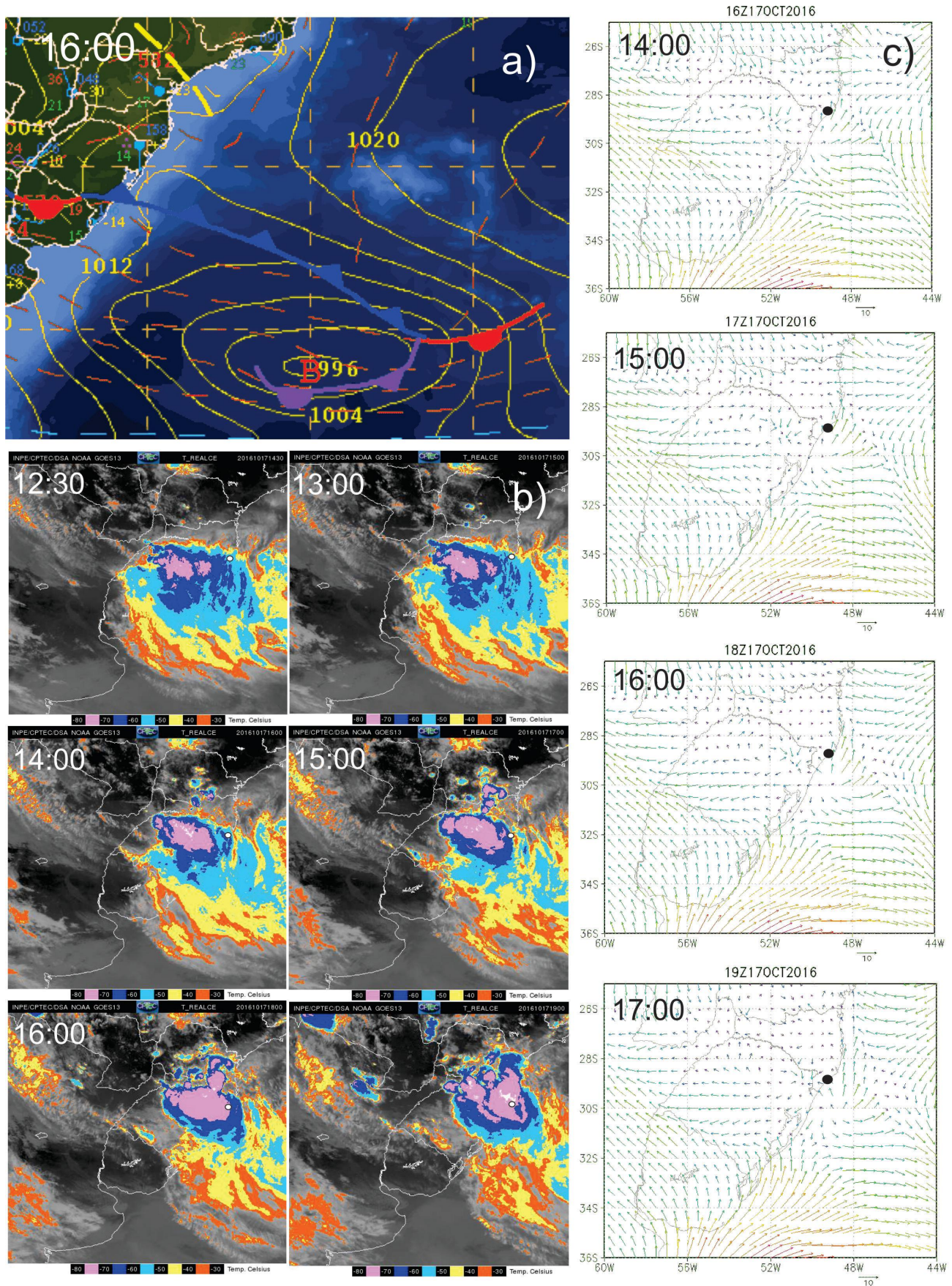


Figura 4. A) Carta sinótica das 16 horas (horário local) do dia 17-10-2016. Fonte: <http://tempo.cptec.inpe.br/cartas.php?tipo=Superfície>. B) Imagens NOAA GOES mostrando o deslocamento de nuvens entre as 12:30 e as 17:00 horas (horário local). Fonte: satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes. C) Dados de sentido do vento medidos de hora em hora entre as 15 e as 17 horas (horário local).

Ulisses Rocha de Oliveira, Rodrigo Silva Simões, Marco Antônio Rigola Romeu, Lauro Júlio Calliari e Michelle Reboita

quente pelos ventos de quadrante norte em direção à frente fria, que é uma região de baixa pressão. Esse sistema convectivo mostra nuvens muito espessas o que é indicado pelas temperaturas de cerca de -80°C na Figura 5. Dados médios de direção e velocidade do vento para esse mesmo intervalo de horas demonstram ventos do quadrante sul avançando rapidamente pelo Estado do Rio Grande do Sul, não identificando de forma clara essa movimentação pelo oceano na porção adjacente a área atingida, embora haja mudança na orientação do vento (Figura 5c). Os dados da estação meteorológica de Mostardas demonstram ventos soprando do quadrante norte-nordeste em velocidade decrescente até a 2:00 horas da madrugada (horário local), com pressão atmosférica baixando até 1003,4 nesse horário. Os dados das 3:00 horas mostram completa alteração do cenário, com ventos de 20,3 m/s do quadrante sul, com pressão subindo para 1009,4. Posteriormente houve significativa diminuição da velocidade do vento, com pressão atmosférica em elevação.

Tsunami meteorológico de 2018 nas praias de Mostardas e Tavares (RS)

Em 23-9-2018, houve ocorrência de mais um tsunami meteorológico, desta vez atingindo três localidades costeiras, São Simão, Mostardense e Praia do Farol, situadas nos municípios de Mostardas e Tavares. Segundo relato de moradores locais, que avisaram um dos autores do presente trabalho, o evento ocorreu entre as 3:00 e as 4:00 horas da madrugada.

Em relação às condições meteorológicas gerais, a carta sinótica das 3:00 horas (horário local) apresenta a aproximação de uma frente fria no extremo sul do RS (Figura 5a). Na imagem do satélite GOES entre a meia noite (00:00) e as 5:00 horas da manhã do dia 23-9-2018 (horário local), há a formação de um sistema convectivo de mesoescala associado com a advecção de ar quente pelos ventos de quadrante norte em direção à frente fria, que é uma região de baixa pressão. Esse sistema convectivo mostra nuvens muito espessas o que é indicado pelas temperaturas de cerca de -80°C na Figura 5. Dados médios de direção e velocidade do vento para esse mesmo

intervalo de horas demonstram ventos do quadrante sul avançando rapidamente pelo Estado do Rio Grande do Sul, não identificando de forma clara essa movimentação pelo oceano na porção adjacente a área atingida, embora haja mudança na orientação do vento (Figura 5c). Os dados da estação meteorológica de Mostardas demonstram ventos soprando do quadrante norte-nordeste em velocidade decrescente até a 2:00 horas da madrugada (horário local), com pressão atmosférica baixando até 1003,4 nesse horário. Os dados das 3:00 horas mostram completa alteração do cenário, com ventos de 20,3 m/s do quadrante sul, com pressão subindo para 1009,4. Posteriormente houve significativa diminuição da velocidade do vento, com pressão atmosférica em elevação.

Tsunami meteorológico de 2020 na praia do Cassino (RS)

O mais recente tsunami meteorológico registrado e divulgado na internet ocorreu na praia do Cassino (RS) em 14-3-2020, novamente numa tarde de calor e praia cheia de pessoas e carros estacionados na faixa de praia. Os registros indicam que o evento ocorreu no período da tarde, por volta de 16:00 horas. Há um vídeo hospedado no site YouTube que identifica a chegada de uma onda que atinge rapidamente a praia, pegando de surpresa muitos usuários da praia. Este vídeo pode ser visualizado no link <https://www.youtube.com/watch?v=7UDRtoMAMgg>. Ressalta-se que todos os três eventos registrados na praia do Cassino, o primeiro apenas por relatos históricos e os demais por fotos e vídeos divulgados na internet e redes sociais, foram registrados próximo aos molhes da barra.

A carta sinótica das 15:00 horas (horário local) demonstra a presença de um cavado invertido em superfície (Figura 6a). Nesta mesma carta é possível se identificar que ao sul desse cavado havia uma frente fria. Como o cavado e a frente são áreas de baixa pressão, favoreceram o desenvolvimento de nebulosidade. Uma sequência de imagens GOES entre as 12:00 e as 17:00 horas (horário local) identificam um algum avanço de nuvens de sudoeste para nordeste sobre o oceano adjacente a referida praia no período anterior ao evento (Figura 6b). Por volta das 12:00 horas

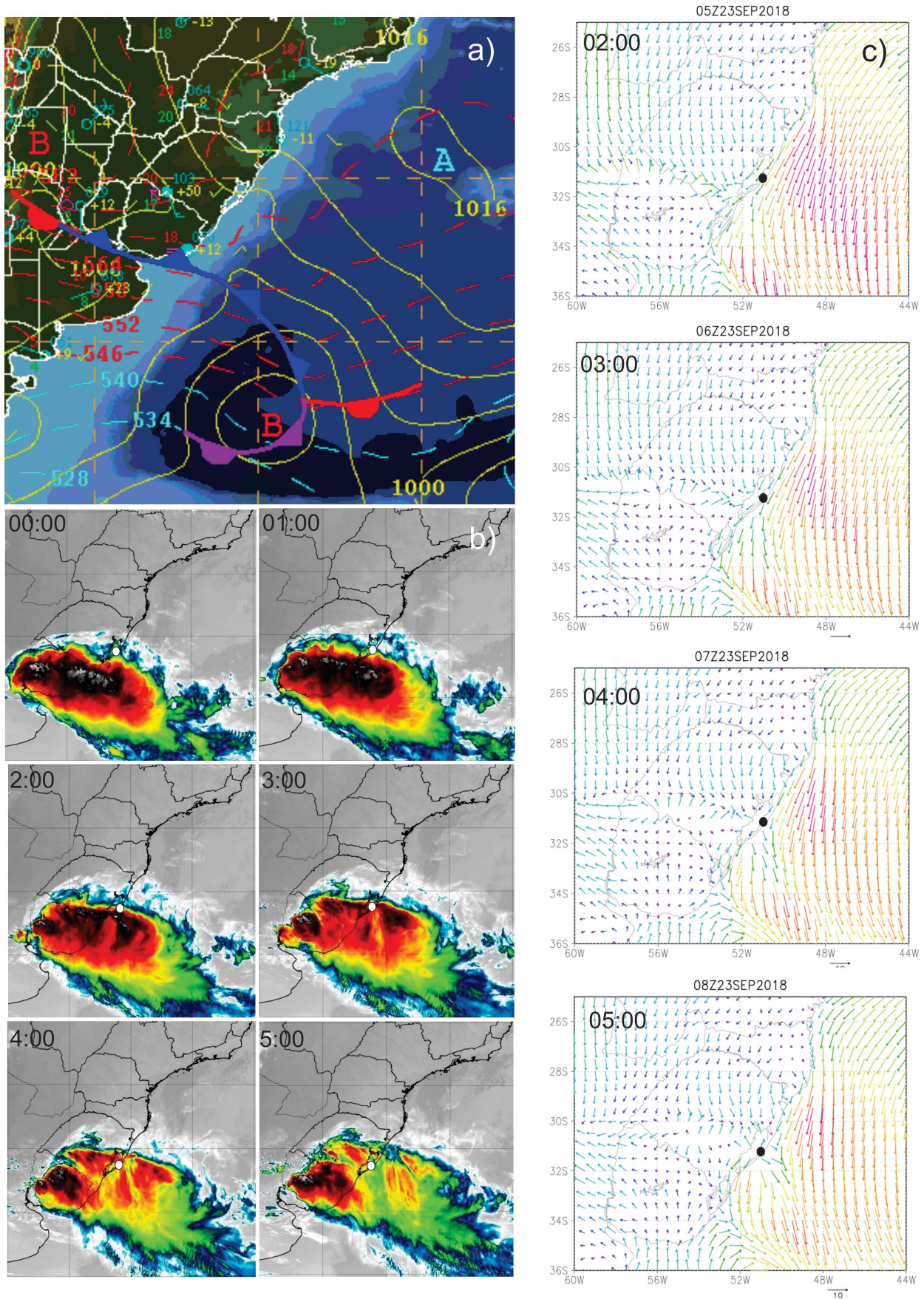


Figura 5. A) Carta sinótica das 3 horas (horário local) do dia 23-9-2018. Fonte: <http://tempo.cptec.inpe.br/cartas.php?tipo=Superfície>. B) Imagens NOAA GOES mostrando o deslocamento de nuvens entre a meia noite (00:00) e as 5:00 da manhã do dia 23-9-2018 (horário local). Fonte: satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes. C) Dados de sentido do vento medidos de hora em hora entre 2:00 e 5:00 horas, madrugada do dia 23-9-2018 (horário local).

Ulisses Rocha de Oliveira, Rodrigo Silva Simões, Marco Antônio Rigola Romeu, Lauro Júlio Calliari e Michelle Reboita

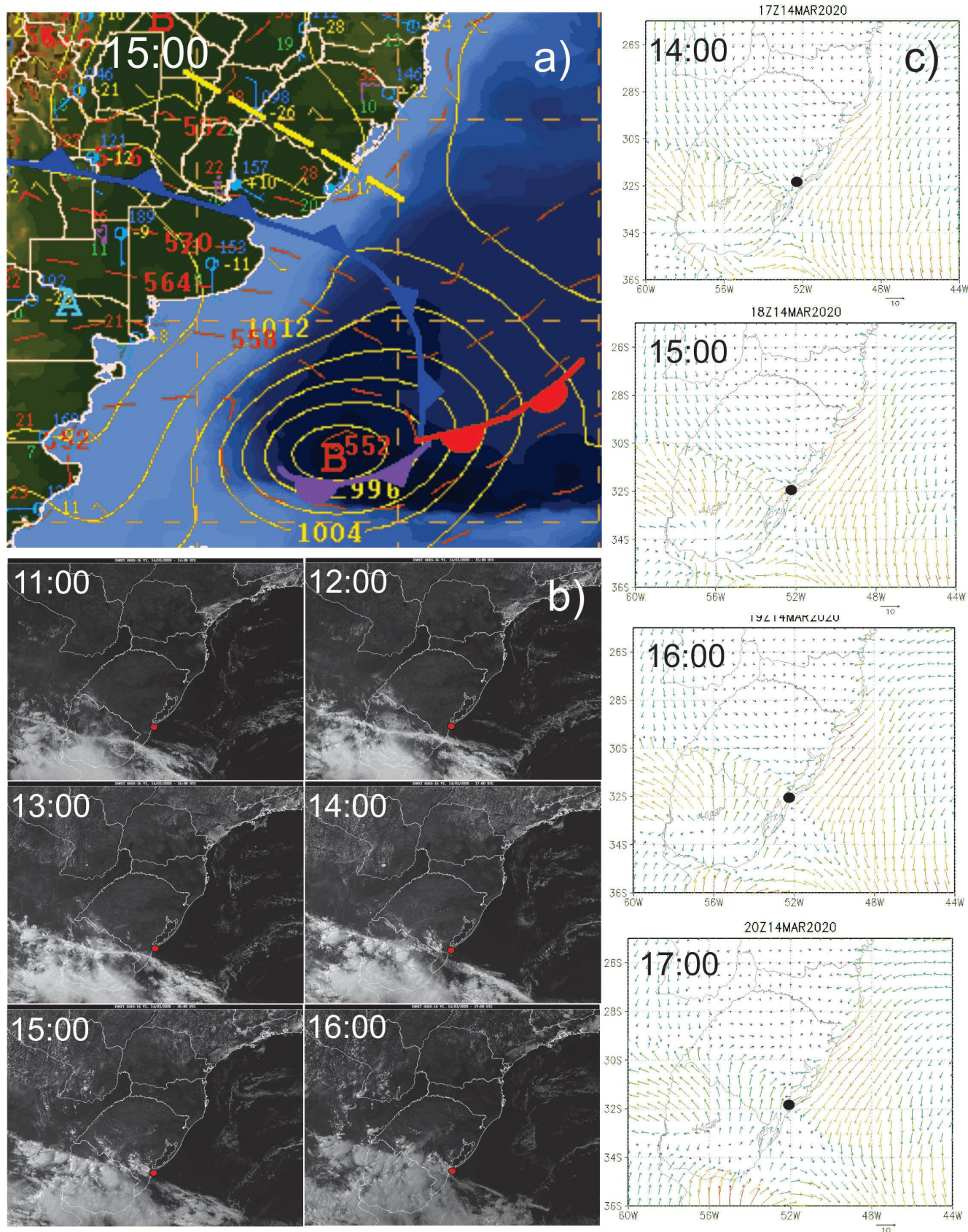


Figura 6. A) Carta sinótica das 15 horas (horário local) do dia 14-3-2020. Fonte: <http://tempo.cptec.inpe.br/cartas.php?tipo=Superfície>. B) Imagens NOAA GOES mostrando o deslocamento de nuvens entre as 11:00 e as 16:00 horas (horário local). Fonte: satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes. C) Dados de sentido do vento medidos de hora em hora entre as 11 e as 16 horas (horário local).

(horário local) as nuvens carregadas estavam na fronteira entre o Rio Grande do Sul e o Uruguai, avançando pelo litoral até atingir a área onde foi registrado o Tsunami a partir das 16 horas. Os dados médios de direção e velocidade do vento para o intervalo entre 14:00 e 17:00 horas mostram o avanço de ventos do quadrante sul no período anterior ao evento (Figura 6c). Dados da estação meteorológica de Rio Grande, localizada próxima de onde foi registrado o evento, identificam que a direção do vento foi de norte-nordeste entre as 10 e as 16 horas, com ventos de 3 a 8 m/s. As 17 horas a referida estação mediu ventos do quadrante sul com rajadas de cerca de 8 m/s.

Impactos dos tsunamis meteorológicos na costa

Os tsunamis meteorológicos descritos no presente trabalho avançaram sobre as faixas de praia, dunas frontais, desembocaduras e

urbanização costeira. A Figura 7a, obtida em março de 2020 na praia do Cassino, mostra um dos poucos registros da onda atingindo a praia, identificando a chamada “segunda onda”, relatada em outros locais. Na maioria dos casos demonstrados, a inundação repentina faz objetos boiarem e serem transferidos de local, como identifica uma fotografia capturada na praia do Cassino em 2014 (Figura 7b). Em geral, geram sobretudo sustos/espantos aos que estão na praia no momento e danos materiais a carros que estão na faixa de praia e a edificações situadas próximas ao mar em cotas altimétricas baixas. No caso da presença de veículos na praia estes sofrem avarias, trazendo prejuízos materiais. Nos casos ocorridos na praia do Cassino-RS, o impacto foi basicamente sobre a faixa de praia subaérea, sobretudo danificando carros que estacionavam na praia em dias de tempo bom e calor. Na chegada da onda em si, do tsunami meteorológico, é preciso ficar atento aos mais



Figura 7. A) Chegada da onda em 14-3-2020 na praia do Cassino, junto aos molhes da barra. Fonte: Autor desconhecido, divulgação redes sociais. B) Inundação da praia causada pelo tsunami meteorológico em 9-2-2014. do dia 23-9-2018 (horário local). Fonte: satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes. C) Dados de sentido do vento medidos de hora em hora entre 2:00 e 5:00 horas, madrugada do dia 23-9-2018 (horário local).

vulneráveis, como crianças, sobretudo bebês, idosos ou pessoas com alguma deficiência física, que podem cair ou serem levados pela água. Nesses casos, as pessoas devem ficar atentas aos mais vulneráveis durante a chegada das ondas.

No caso dos balneários da praia do Pântano do Sul e Rincão, em Santa Catarina, e nos balneários São Simão, Mostardense e Praia do Farol, em Mostardas, Estado do Rio Grande do Sul, além de inundar a faixa de praia, os tsunamis meteorológicos também atingiram áreas de dunas, com vegetação, redes de drenagem e a área urbana. Quanto as edificações atingidas, estas se encontram mais expostas a ação marinha. No Pântano do Sul, grande parte da ocupação junto a faixa de praia ocorre na zona de sombra da praia de enseada, praticamente sem nenhuma proteção de duna frontal (OLIVEIRA, 2009). Neste local, o vídeo que registrou o evento mostra que o impacto ocorreu na praia, arrastando pequenas embarcações que ficam nesse segmento de praia e carros estacionados, atingindo posteriormente a urbanização que fica junto a faixa de praia. Já nos

balneários São Simão, Mostardense e Praia do Farol, situados nos municípios de Mostardas e Tavares, há presença de dunas frontais, as quais geram proteção destas edificações à ação marinha. Nessas dunas frontais, que vêm sofrendo processos erosivos nos últimos anos, há segmentos fragmentados, tanto por redes de drenagem como pela abertura de arruamentos (SIMÕES, 2018; SIMÕES & OLIVEIRA, 2020).

A figura 8 demonstra fotografias aéreas obtidas por drone nos balneários São Simão e Mostardense, município de Mostardas, antes e depois desse evento, onde se identificam marcas deixadas pelo tsunami meteorológico. Na figura 8c identifica-se que o mesmo atingiu edificações na retaguarda causando destruição de patrimônio edificado. O avanço da onda ocorreu de forma mais acentuada próximo aos canais sangradouros e em locais que há cortes nas dunas para que arruamentos cheguem na praia. Na figura 8d, as marcas deixadas pelo evento ocorreram a cerca de 175m para o interior da planície costeira, a partir do limite superior da praia, avançando através de uma



Figura 8. Fotografias aéreas de drone dos balneários São Simão e Mostardense, antes (a, c - 29-8-2018) e depois (b, d - 26-9-2018) do tsunami meteorológico ocorrido em 23-9-2018. Fotos: Rodrigo Silva Simões e Ulisses Rocha de Oliveira.

Caracterização das praias onde houve ocorrência

Os segmentos de praia do Pântano do Sul (Figura 9a) e da praia do Cassino junto aos molhes (Figura 9b), onde foram registrados tsunamis meteorológicos em 2009, 2014 e 2020, além do anteriormente registrado em 1977, são voltados para o quadrante sul (Azimutes 190 e 180 graus N respectivamente) e são segmentos de costa oceânica mais fechados devido a presença de obstáculos no extremo norte, um promontório que avança mar adentro no Pântano do Sul e molhes que avançam cerca de 4 km no Cassino. Estes dois segmentos de praia, estão situados na extremidade norte das referidas praias, sendo consideradas zonas de sombra da alta energia de onda. Possivelmente, o

fenômeno pode ser amplificado nestas áreas mais voltadas ao sentido do avanço das áreas de instabilidade (sentido de propagação das instabilidades atmosféricas que ocasionaram as ondas).

Nos cerca de 30km de costa entre Balneário Rincão e Arroio do Silva (SC) (Figura 9c) e nos cerca de 40km de costa entre os balneários São Simão e Praia do Farol (RS) (Figura 9d), demais locais que apresentaram registros de tsunamis meteorológicos, a orientação da linha de costa também é voltada para o quadrante sul (azimute oscilando entre 135 e 155 Graus N). O segmento sul de Santa Catarina, embora apresente algum embaçamento pode ser considerado uma costa bem mais aberta. Já o segmento de Mostardas é ainda mais aberto, chegando a formar projeções costeiras



Figura 9. Imagens orbitais (de satélite) obtidas no software Google Earth PRO das praias onde foram registrados tsunamis meteorológicos no sul do Brasil. A) Pântano do Sul (SC). B) Cassino (RS). C) trecho entre os balneários Rincão e Arroio do Silva (SC). d) trecho entre os balneários São Simão e Praia do Farol de Mostardas (RS).

(costa convexa). Além disso, pequenos recortes da linha de costa, como desembocaduras fluviais e pequenas drenagens, chamadas de canais sangradouros, possibilitaram que o tsunami adentrasse para além do limite superior da praia, como identificado nas praias de Mostardas.

Em relação aos aspectos morfossedimentares, em geral, as praias do sul do Brasil possuem areias finas e baixa declividade, o que favorece o espreadimento das ondas até o limite superior da praia, embora apresentem variações desses parâmetros ao longo da costa (PEREIRA, 2005). A figura 10, extraída de MELO et al. (2010), mostra um perfil topográfico da praia do Pântano do Sul. O extremo norte desse arco praial apresenta areias mais finas e menor declividade que outros setores dessa praia (OLIVEIRA et al., 2009), com diâmetro médio do grão com média de 2,73 phi e 2 graus de declividade na face praial onde foi registrado o tsunami meteorológico.

A praia do Cassino, segundo PEREIRA (2005) também apresenta areias finas a muito finas, com diâmetro médio do grão de 2,5 a 2,88 phi, diâmetro médio ainda mais fino que no Pântano do Sul, tendo declividade relativamente semelhante, entre 1,5 e 2 graus de inclinação na face da praia. Já as praias de Mostardas e balneário Rincão, já possuem maior inclinação e diâmetro do grão um pouco maior, mas mantendo-se na categoria de baixa inclinação e areias finas. OLIVEIRA et al. (2007), através da coleta de diversas amostras de sedimento em cerca de 20 km de costa alguns km ao sul do balneário Rincão identificaram que o diâmetro do grão oscilou de 2,38 a 2,66 phi, tendo

baixa declividade da face da praia, decorrente desse diâmetro do grão encontrado. Já nas praias de Mostardas, segundo PEREIRA (2005), o diâmetro do grão oscila entre 2,15 e 2,25 phi, enquanto a declividade da praia de 2 a 2,3 graus de inclinação na face da praia. Todos os locais analisados neste trabalho se enquadram na categoria de praias com areias finas e baixa declividade, características comumente observadas neste segmento costeiro. No entanto, não foram analisadas praias com areias grossas e alta declividade para realizar tal comparação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os tsunamis meteorológicos, ou meteo-tsunamis, analisados no presente estudo mostram que, em geral, as mudanças nas variáveis atmosféricas associadas com a aproximação e/ou passagem de uma frente fria são dominantes para a formação desses sistemas. As imagens de satélite identificaram em todos os eventos o avanço da nebulosidade de SW para NE, indicando o predomínio de condições de atmosfera instável. Além disso, os ventos e a pressão atmosférica contribuem na troca de energia entre o ar e a superfície marinha e na consequente formação dos meteo-tsunamis.

Os impactos dos meteo-tsunamis relatados foram geralmente sobre a faixa de praia, atingindo pessoas, embarcações e veículos automotores. Em alguns casos atingiram as dunas, a área urbana e as redes de drenagens. Nestes casos, os impactos materiais ocorreram em edificações que se

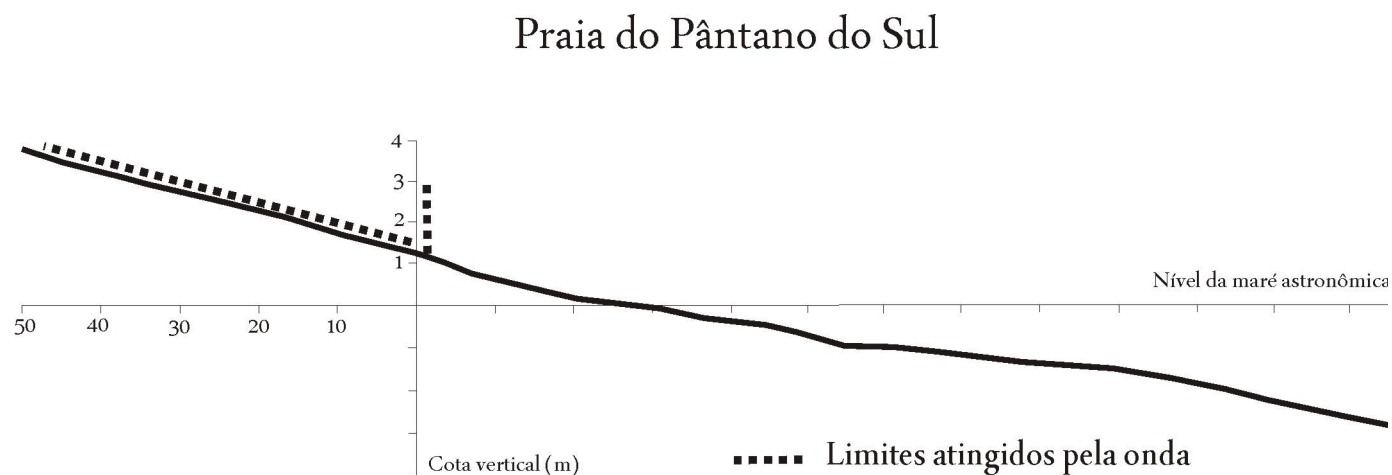


Figura 10. Perfil da Praia do Pântano do Sul referido ao nível (maré astronômica) previsto para o Porto de Florianópolis para a tarde do dia 19/11/2009. Linha pontilhada indica o nível atingido pela água. Fonte: MELO et al. (2010).

encontram mais expostas as subidas repentinas do nível marinho e das ondas de alta energia. Dentre os locais impactados, descritos no presente trabalho, todas são praias de areia fina, baixa declividade e voltadas para o quadrante sul. Os segmentos das praias do Cassino e do Pântano do Sul onde houve registro de meteo-tsunami, são mais embaixados e abrigados da agitação dominante, enquanto os segmentos sul de Santa Catarina e de Mostardas, também impactados, são sistemas praias mais abertos e expostos. Isto demonstra que quanto a geometria e exposição da costa, o espectro é variado.

Em relação a trabalhos futuros, destaca-se a importância de analisar mais profundamente a questão da influência da pressão atmosférica no contexto dos tsunamis meteorológicos no sul do Brasil. Quanto aos aspectos morfossedimentares, a análise do impacto destes eventos em praias de areia com maior diâmetro médio do grão do que as analisadas pode ser tema de futuras pesquisas. Quanto ao fato dos registros terem aumentado a partir de 2009, isso pode ser relacionado a era de divulgação de imagens em tempo real, dada a proliferação da internet e dos telefones celulares com câmera. No entanto, a questão da influência das mudanças climáticas num possível aumento desses eventos no sul do Brasil pode também ser tema de futuras pesquisas.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO C.E.S.; BOLL, M.G.; GARBOSSA, L.H.P.; VANZ A. & CANDELLA, R.N., 2020. Atmospherically induced large amplitude sea-level oscillations at Santa Catarina—Brazil on October 2019. *Nat Hazards*. Dordrecht, p. 1-21
- CANDELLA, R.N.; FEDOROVA, N.; RABINOVICH, A.B. & ŠEPIĆ, J. 2018. The meteotsunami of 9 February 2014 at Cassino Beach, Brazil. *In: 2018 Ocean Sciences Meeting*, Portland, Oregon.
- CANDELLA, R.N. & ARAÚJO C.E.S. 2020. Meteotsunamis in Brazil: an overview of known occurrences from 1977 to 2020. *Natural Hazards*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04331-y>
- MELO FILHO, E, CALLIARI, L.J.; FRANCO, D. & STRAUCH, J.C.S. 2004. Índícios da Ocorrência de um Tsunami Meteorológico na Praia do Cassino, RS. *In: 1º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*, FURG, Rio Grande-RS (publicado em CD).
- MELO FILHO, E. & ROCHA, C. 2005. Sumatra tsunami detected in southern Brazil. Reported on January, 14th, Maritime Hydraulics Laboratory, Federal University of Santa Catarina, Brazil. <www.lahimar.ufsc.br>
- MELO FILHO, E; OLIVEIRA, U.R., ROMEU M.A.R., SCHMIDT, A.D. & PEREIRA, N. 2010. Sobre a ocorrência de um tsunami meteorológico na Ilha de Santa Catarina. *In: 4º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*, FURG, Rio Grande-RS.
- MELO FILHO, E.; MACHADO, D.M; LISBOA, R.C. & ROMEU, M.A.R. 2016. Overview of tide, wind and wave conditions along the Brazilian coast for coastal engineering practice. *In: IX PIANC-COPEDEC*, Rio de Janeiro-RJ, 18p.
- MONSERRAT, S., VILIBIĆ, I., & RABINOVICH, A. B. 2006. Meteotsunamis: Atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6:1035–1051.
- OLIVEIRA, U.R.; MELO, A.T.; RIBEIRO, D.; SOUZA, D.R.; NEVES, J.; PIETRO FILHO, J.E.; MUDAT, J.E.; KITAHARA, M.V. & HORN FILHO, N.O. 2007. Aspectos granulométricos dos sedimentos siliciclásticos do sistema praia - duna frontal da folha Sombrio, sul do Estado de Santa Catarina, Brasil. *Geosul*, 22(43):123-146.
- OLIVEIRA, U.R. 2009. *Relações entre a morfodinâmica e a utilização em trechos da costa oceânica da Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil*. Tese de doutoramento (Programa de Pós-graduação em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 222p.
- OLIVEIRA, U.R.; BARLETTA, R.C.; PEIXOTO, J.R.V. & HORN FILHO, N.O. 2009. Características morfodinâmicas da praia do Pântano do Sul, Ilha de Santa Catarina, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 36(3): 237-250.
- PEREIRA, P.S. 2005. *Variabilidade da orla oceânica do Rio Grande do Sul e suas implicações*

na elaboração de planos de contingência: aspectos morfológicos, sedimentológicos e geomorfológicos. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica). Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, RS. 161p.

PEREZ, I. 2018. *Génesis, propagación e impacto de los tsunamis meteorológicos en la costa bonaerense, Argentina.* Tese de doutoramento. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 138p.

RABINOVICH, A. B., & MONSERRAT, S. 1996. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: Descriptive and statistical analysis. *Natural Hazards*, **13**:55–90.

SIMÕES, R.S. 2018. *Mobilidade do limite praia duna no balneário Mostardense – RS: monitoramento por drone.* Dissertação (Programa de Pós-graduação em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, RS. 128p.

SIMÕES, R.S. & OLIVEIRA, U.R. 2020. Monitoramento mensal da linha de costa no Balneário Mostardense - RS entre 2016/2017 utilizando dados de VANT. *Quaternary and Environmental Geosciences*, **11**(1):1-18.