

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

LUANA FERRAZ BUENO

**QUANTIFICAÇÃO DO CONTEÚDO DE CALOR PARA ANÁLISE DA
INTENSIFICAÇÃO DO FURACÃO CATARINA**

**VITÓRIA
2015**

LUANA FERRAZ BUENO



QUANTIFICAÇÃO DO CONTEÚDO DE CALOR PARA ANÁLISE DA INTENSIFICAÇÃO DO FURACÃO CATARINA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia, do Departamento de Oceanografia e Ecologia (DOC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Oceanografia.
Orientador: Prof. Dr. Renato David Ghisolfi.

VITÓRIA
2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força e coragem durante toda esta longa caminhada, só Ele sabe o quão difícil foi chegar até aqui.

À minha família pela confiança e incentivo em todos os momentos. Agradeço à minha mãe por todo o carinho e preocupação, e ao meu pai, “Seu Raimundo”, por não medir esforços em me dar uma vida maravilhosa. O desejo de te orgulhar foi o que me trouxe até aqui.

Ao meu orientador Renato Ghisolfi, por todos os ensinamentos, jamais me esquecerei dos seus conselhos. À minha coorientadora e amiga Meyre por todas as tardes de discussões e risadas no laboratório. A todos os meus amigos do Laboratório Poseidon que fizeram dos meus dias de estudo os mais divertidos possíveis. Ao Mama (Mahatma), o melhor amigo que uma garota poderia ter, obrigada pelo cuidado e carinho de sempre. Ao Angelo. Júlia, Fran, Tayná, Fernanda, Ricardo e Bruno por toda a generosidade em me ajudar sempre que precisei.

À Súrlian, minha melhor amiga, por estar sempre ao meu lado e suportar minhas crises amorosas, mas acredite, amiga, sem elas eu não teria me dedicado tanto a este trabalho (rsrs). A minha amiga Mayara, por ter se tornado meu porto seguro e por ter o coração mais bondoso que já conheci. Às minhas amigas Dalyla e Lara, por suportarem todas as minhas distrações em casa, queria dizer que nunca quis inundar ou queimar a nossa casa (rsrs).

Ao professor Dr. Lynn K. Shay e MSc Jodi K. Brewster e todos os pesquisadores do Upper Ocean Dynamics Laboratory por terem feito dos meus dias no RSMAS os mais enriquecedores possíveis. Em especial, agradeço pelo modelo de cálculo de conteúdo de calor e pelos dados de temperatura e altimetria previamente processados e ofertados a mim.

Por fim, agradeço o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCTI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Furacão Catarina.....	14
Figura 2. Área de estudo (25-33°S e 35-55°W) no Atlântico Sul com destaque para a batimetria oriunda do ETOPO1.	16
Figura 3. Determinação da Climatologia Diária a partir da média de 15 dias consecutivos.....	18
Figura 4. Esquema do cálculo do Conteúdo de Calor.	20
Figura 5. Fluxograma da Metodologia adaptada de Meyers <i>et al.</i> , 2010.....	19
Figura 6. Variação vertical da temperatura média mensal da área de estudo.....	23
Figura 7. Localização dos perfiladores ARGO na área de incidência do furacão Catarina.....	24
Figura 8. Média e desvio padrão do conteúdo de calor (OHC) estimado pelo modelo e calculado através de dados dos perfiladores ARGO.....	25
Figura 9. Valores médios de SST entre os dias 19 e 28 de março de 2004.....	27
Figura 10. Variação espaço-temporal da isoterma de 15°C à esquerda e do conteúdo de calor à direita ao longo da longitude de 46.5°W	28
Figura 11. Conteúdo de calor e o deslocamento espaço-temporal do furacão as 00h, 06h, 12h e 18h do dia 23 de março de 2004	29
Figura 12. Conteúdo de calor e o deslocamento espaço-temporal do furacão as 00h, 06h, 12h e 18h do dia 25 de março de 2004	31
Figura 13. Conteúdo de calor e o deslocamento espaço-temporal do furacão as 00h, 06h, 12h e 18h do dia 27 de março de 2004	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros da estrutura do oceano dentro e fora do anel de núcleo quente

3.32

LISTA DE ABREVIATURAS

ANQs :	Anéis de Núcleo Quente
CB:	Corrente do Brasil
CMO:	Camada de Mistura Oceânica
CT:	Ciclone Tropical
D15:	Profundidade da isoterma de 15°C
D19:	Profundidade da isoterma de 19°C
D20:	Profundidade da isoterma de 20°C
D26:	Profundidade da isoterma de 26°C
DT :	Profundidade da termoclina
\overline{DT} :	Profundidade média da termoclina
DT':	Profundidade estimada da termoclina
DTL:	Profundidade da temperatura limítrofe
DTL':	Profundidade estimada da temperatura limítrofe
\overline{DTL}:	Profundidade média da temperatura limítrofe
OHC:	Conteúdo de calor
OHC':	Conteúdo de calor estimado
OHC_{obs}:	Conteúdo de calor observado
PCM:	Profundidade da camada de mistura
\overline{PCM}:	Profundidade média da camada de mistura
PCM':	Profundidade estimada da camada de mistura
PCS:	Plataforma Continental Sul
PCSE:	Plataforma Continental Sudeste
S:	Sul
SSHA:	Anomalia da altura da superfície do mar
TL:	Temperatura Limítrofe
TP:	Temperatura da termoclina
SST:	Temperatura da superfície do mar
TT:	Transição Tropical
W:	Oeste
<i>Sfc</i>:	Superfície do oceano

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS.....	10
2.1 OBJETIVO GERAL	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
4 MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1 ÁREA DE ESTUDO	16
4.2 METODOLOGIA	17
4.2.1 CONTEÚDO DE CALOR ESTIMADO (<i>OHC'</i>)	17
4.2.2 CONTEÚDO DE CALOR OBSERVADO (<i>OHC_{obs}</i>).....	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1 ADAPTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	22
5.2 RESULTADOS DO MODELO.....	26
6 CONCLUSÃO	34

1 INTRODUÇÃO

Ciclones Tropicais (CTs) ou furacões, como também são chamados no Oceano Atlântico, são sistemas de baixa pressão não-frontais cuja convecção está organizada na forma de espirais e que provocam fortes ventos e tempestades violentas (HOLLAND & LANDER, 1993). Os furacões possuem núcleo quente e simétrico, cuja formação está diretamente associada à transferência de calor latente na interface oceano-atmosfera. Seu enfraquecimento e dissipação ocorrem em regiões com águas mais frias ou ao atingir regiões continentais (CHARNEY & ELIASSEN, 1964). Os furacões, portanto, representam um mecanismo importante no balanço de energia e vapor de água entre o oceano e a atmosfera.

Antes de ser classificado como furacão, o sistema evolui de uma depressão para uma tempestade tropical com velocidade dos ventos entre 63 e 118 km.h⁻¹. À medida que a intensidade dos ventos atinge velocidades iguais ou superiores a 119 km.h⁻¹, o sistema atinge a categoria 1 de furacão, podendo evoluir ao ponto em que a velocidade dos ventos atinja 252 km.h⁻¹, caracterizando o furacão de maior intensidade com categoria 5 de acordo com a escala de Saffir-Simpson (PEZZA *et al.*, 2005; DUTRA, 2012).

A princípio, furacões eram somente descritos para o Atlântico Norte, Pacífico e Índico e não havia descrição para o Atlântico Sul. O primeiro e único furacão a ser documentado no oceano Atlântico Sul foi o furacão Catarina que atingiu a costa Catarinense no dia 28 de março de 2004, causando imensos danos com prejuízos em torno de 425 milhões de dólares americanos (MCTAGGART *et al.*, 2006).

Somado a esses danos, o furacão Catarina foi um episódio único pois se formou em uma região antes conhecida por ser livre de furacões devido ao alto cisalhamento vertical do vento horizontal (PEZZA & SIMMONDS, 2005; PEZZA *et al.*, 2009). Além disso, o furacão Catarina se desenvolveu sobre temperaturas superficiais do mar (SST – *Sea Surface Temperature*) homogêneas entre 24 e 25°C (PEZZA & SIMMONDS, 2005; MCTAGGART-COWAN *et al.*, 2006; VIANNA *et al.*, 2010), inferiores a SST de 26°C conhecida por ser a temperatura mínima necessária para a evolução e intensificação de um furacão (PALMÉN, 1948). Dessa forma, acredita-se que o

furacão Catarina poderia estar ligado às mudanças climáticas associadas a circulação no Hemisfério Sul e, portanto, haveria maior possibilidade de um furacão ocorrer no oceano Atlântico Sul diante de condições de aquecimento global (PEZZA & SIMMONDS, 2005).

A maior parte dos estudos interpretam a gênese e desenvolvimento do furacão Catarina a partir de processos atmosféricos em que diversos aspectos da sua evolução permanecem desconhecidos (PEZZA E SIMMONDS, 2005, 2008; MCTAGGART-COWAN *et al.*, 2006; VEIGA *et al.*, 2008; PEZZA *et al.*, 2009; PEREIRA FILHO *et al.*, 2010). Pereira Filho *et al.* (2010) e Vianna *et al.* (2010) analisaram as condições oceânicas da região sob a trajetória do furacão Catarina a partir da identificação de anéis de núcleo quente (ANQs), os quais auxiliaram na intensificação do mesmo por meio de troca de calor. No entanto, há lacunas em relação ao conteúdo de calor associado a essas feições já que Vianna e colaboradores (2010) não computaram de forma explícita esse valor, assumindo apenas a variação do mesmo a partir de mudanças na profundidade da isoterma de 17°C. Assim, estudos mais detalhados sobre essa quantidade de calor são de extrema importância.

Levando em conta a necessidade de analisar o conteúdo de calor da camada superficial do oceano e seu papel na intensificação do furacão Catarina, este trabalho parte da hipótese de que o conteúdo de calor associado aos ANQs é menor após a passagem do furacão Catarina sobre os mesmos, assumindo que haja absorção deste conteúdo pelo furacão. O estudo será desenvolvido adaptando-se a metodologia de Meyers *et al.* (2014) que calcula o conteúdo de calor a partir da determinação da estrutura térmica do oceano, a qual será melhor detalhada no item 4.2.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as mudanças no conteúdo de calor da camada superficial do oceano entre 25-33°S e 55-35°W durante o processo de desenvolvimento do furacão Catarina.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar as isotermas representativas da camada superficial para o uso da metodologia de Meyers *et al.* (2014);
- Identificar os anéis de núcleo quente na região de estudo através da quantificação do conteúdo de calor; e
- Avaliar a interação entre os anéis presentes na área de estudo com o furacão Catarina a partir das mudanças em seus conteúdos de calor e profundidades da termoclina anterior e posterior à passagem do furacão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os CTs se desenvolvem em regiões tropicais e subtropicais de fraco cisalhamento vertical do vento horizontal e são sistemas não frontais de baixa pressão, associados a nuvens convectivas próximas de seu centro, e derivam sua energia principalmente da evaporação da água do mar (ANTHES, 1982; HOLLAND & LANDER, 1993). Diferentes dos CTs, os ciclones extratropicais são sistemas que se formam em médias latitudes onde os gradientes horizontais de temperatura e o cisalhamento vertical do vento horizontal são mais intensos, possuem o núcleo frio e frentes associadas (BJERKNES & SOLBERG, 1922; CHARNEY, 1947; EADY, 1949). O processo de transição de um ciclone extratropical em um ciclone tropical é chamado de Transição Tropical (TT) e o processo inverso de Transição Extratropical (HART, 2003; DAVIS & BOSART, 2003; JONES *et al.*, 2003).

Em condições normais, sem a influência de fenômenos severos como os furacões, a interação oceano-atmosfera determina as trocas de massa, calor e momentum entre esses dois ambientes. A perda de massa (evaporação) aliada à perda de calor e consequente aumento da massa específica da porção superficial do oceano, induz movimentos convectivos de água que provocam mistura na camada de mistura oceânica (CMO). A transferência vertical de momentum horizontal da tensão do vento induz o cisalhamento das águas superficiais do oceano e gera turbulência na CMO que, dependendo da intensidade, pode atingir a região da termoclina através do cisalhamento da base da CMO e erosão do topo da termoclina (D'ASARO, 1985).

Por outro lado, em um ambiente sobre a influência de um furacão é observado uma intensificação da tensão horizontal do vento que promove a divergência horizontal das águas superficiais do oceano. Esta divergência induz movimento de subida de água da termoclina através do bombeamento de Ekman que modifica a estrutura térmica do oceano. A resposta do oceano a esta modificação é marcada tanto pelo aumento da espessura da camada de mistura quanto pela diminuição da SST em torno de 3 a 5°C (MEYERS *et al.*, 2014) em decorrência dessa ascensão de água mais fria (PRICE 1981; SANFORD *et al.* 1987; SHAY *et al.*, 1992; D'ASARO *et al.*, 2007). Se a espessura da camada de mistura for grande, a temperatura da água que ascender não será significativamente menor que a SST e o esfriamento da camada de mistura

será pequeno (VIANNA *et al.*, 2010). Por outro lado, se a camada de mistura for rasa, a água fria estará próxima à superfície e qualquer movimento de mistura reduzirá ainda mais a sua temperatura. De qualquer forma, uma camada de mistura mais fria poderá inibir o fluxo de calor latente e sensível entre a interface oceano-atmosfera e a camada limite do furacão.

A intensificação de furacões acontece em regiões de camada superficial profunda e de temperatura elevada, onde quantidades significativas de energia térmica são transferidas para o sistema. Segundo Shay *et al.* (2000), por exemplo, esses processos criam condições que intensificam e mudam a estrutura da tempestade sendo, portanto, importante o conhecimento do estado inicial do oceano a fim de prever com maior exatidão o desenvolvimento de furacões (HALLIWELL *et al.*, 2008; SHAY & UHLHORN, 2008).

Este estado inicial pode ser inferido através do conteúdo de calor (OHC – *Ocean Heat Content*) da camada superficial do oceano, conceituado primeiramente por Leipper e Volgenau (1972), segundo a expressão:

$$OHC = \int_{z_{26}}^{Sfc} c_p \rho (T - 26^{\circ}C) dz$$

onde, c_p é o calor específico da água do mar, ρ é a densidade da água e T é a temperatura da água.

Diversos estudos mostram a importância do OHC e da estrutura térmica do oceano na rápida intensificação de furacões. No Atlântico Norte a feição mais notável que pode intensificar um furacão são os anéis de núcleo quente (ANQs) que se desprendem da corrente do Golfo do México. Esses ANQs possuem camadas espessas de água quente com alto OHC e visíveis em campos de anomalia da altura da superfície do mar (valores positivos de SSHA – *Sea Surface High Anomaly*).

Como exemplo tem-se o Furacão Opal que no ano de 1995 se intensificou em um período de 14 horas ao passar da Categoria 1 para a Categoria 4 durante sua trajetória sobre um anel de núcleo quente na região do Golfo do México. Estudos acreditam que

esse anel tenha intensificado o furacão já que a velocidade do vento do sistema aumentou de 35 m.s^{-1} para 65 m.s^{-1} , enquanto que a profundidade da termoclina diminuiu em cerca de 50 metros (MARKS *et al.*, 1998; BOSART *et al.*, 2000; HONG *et al.*, 2000; SHAY *et al.*, 2000). Os furacões Katrina e Rita também interagiram com um ANQ durante sua passagem no Golfo do México em 2005. Segundo Shay (2009), para ambas as tempestades houve diminuição da pressão na superfície do oceano, ou seja, aumento da intensidade do sistema. Na maior parte da região que precedeu a passagem do Katrina, a distribuição da SST apresentava-se uniforme a 30°C e o seu esfriamento após a passagem dos furacões foi menor que 1°C (SCHARROO *et al.*, 2005 e 2006; SUN *et al.*, 2006; MAINELLI *et al.*, 2008; SHAY, 2009; SHAY *et al.*, 2011; JAIMES & SHAY, 2009, 2010; GONI *et al.*, 2009). O mesmo aconteceu com o super tufão Maemi, onde a SST local exibia uniformidade entre as temperaturas de $30\text{-}31^{\circ}\text{C}$ enquanto o mesmo viajava sobre três ANQs na porção oeste do Pacífico Norte e, após sua passagem, o esfriamento da SST foi quase que imperceptível (VIANNA *et al.*, 2010).

Este cenário de homogeneidade de temperatura em momentos que antecedem a passagem de um furacão e de pequenas variações de SST posteriores a essa passagem, dificultam a visualização de feições importantes na camada superficial do oceano, como os ANQs, que se encontram sob a trajetória do furacão (VIANNA *et al.*, 2010). Conclui-se, portanto, que o estudo apenas do campo de temperatura é insuficiente para a observação da estrutura superficial do oceano, sendo extremamente relevante a observação do campo de altimetria da região para a identificação dessas feições.

No Atlântico Sul, o furacão Catarina se desenvolveu entre os dias 19 e 28 de março de 2004 na costa brasileira ($25\text{-}29^{\circ}\text{S}$) e se tornou o primeiro furacão a ser documentado neste oceano (Figura 1) (SILVA DIAS *et al.*, 2004; PEZZA & SIMONDS, 2005; MCTAGGART-COWAN *et al.*, 2006; BONATTI *et al.*, 2006; PEREIRA FILHO *et al.*, 2010). A chegada desse furacão na costa de Santa Catarina surpreendeu meteorologistas e pesquisadores, uma vez que essa região era conhecida por ser livre de ciclones tropicais devido ao forte cisalhamento vertical do vento horizontal (GRAY, 1968).

O Catarina foi um ciclone com propriedades híbridas tropicais e extratropicais que alcançou a maturidade ao atingir a categoria 1 e 2 de furacão após o processo de transição tropical que antecedeu a chegada do furacão à costa catarinense (MCTAGGART-COWAN *et al.*, 2006; PEZZA *et al.*, 2009; PEREIRA FILHO *et al.*, 2010). O seu desenvolvimento ocorreu em área de temperatura superficial homogênea (24-25°C) inferior ao limite de SST mínima de 26°C sugerido por Palmén (1948) como condição necessária para o desenvolvimento de furacões no Atlântico Norte. Esse pré-requisito também não foi observado no desenvolvimento dos furacões Ivan, Karl e Epsilon, cuja transição para a categoria de furacão se deu sob águas de temperaturas inferiores a 26°C no oceano Atlântico Norte (LAWRENCE & PELISSIER, 1981; BEVEN *et al.*, 2008).

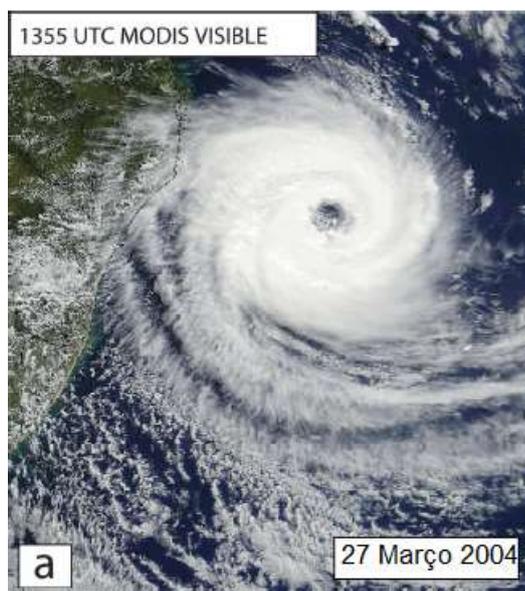


Figura 1. Furacão Catarina - Imagem de alta resolução (1 km) do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) instalado no satélite Terra da NASA no dia 27 de março de 2004. Fonte: McTaggart-Cowan *et al.* (2006, p.3030).

Grande parte dos estudos sobre o furacão Catarina, com exceção de Pereira Filho *et al.* (2010) e Vianna *et al.* (2010), interpretaram sua evolução somente a partir de processos atmosféricos sem explicar o mecanismo de sua intensificação (SILVA DIAS *et al.*, 2004, PEZZA E SIMONDS, 2005, 2008; MCTAGGART-COWAN *et al.*, 2006; VEIGA *et al.*, 2008; PEZZA *et al.*, 2009; PEREIRA FILHO *et al.*, 2010). Pezza & Simmonds (2005) e Pezza *et al.* (2009) mostraram que o furacão Catarina não teria sofrido TT sem interações dinâmicas atmosféricas chave que criaram um canal com

baixo cisalhamento vertical do vento horizontal através de um bloqueio dipolo em altas latitudes. Contudo, a grande maioria desses estudos subestimaram a intensidade do furacão Catarina provavelmente por não incorporarem o papel do oceano em sua intensificação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo engloba a região de evolução do furacão Catarina e abrange as latitudes de 25°S a 35°S e longitudes de 35°W a 55°W, estendendo-se ao longo da Margem Continental Sudeste-Sul da América do Sul (Figura 2). Inseridas nesse contexto estão as plataformas continentais do sudeste e sul do Brasil que possuem os maiores e mais importantes portos e bacias petrolíferas do país, e, portanto, grande fluxo naval.

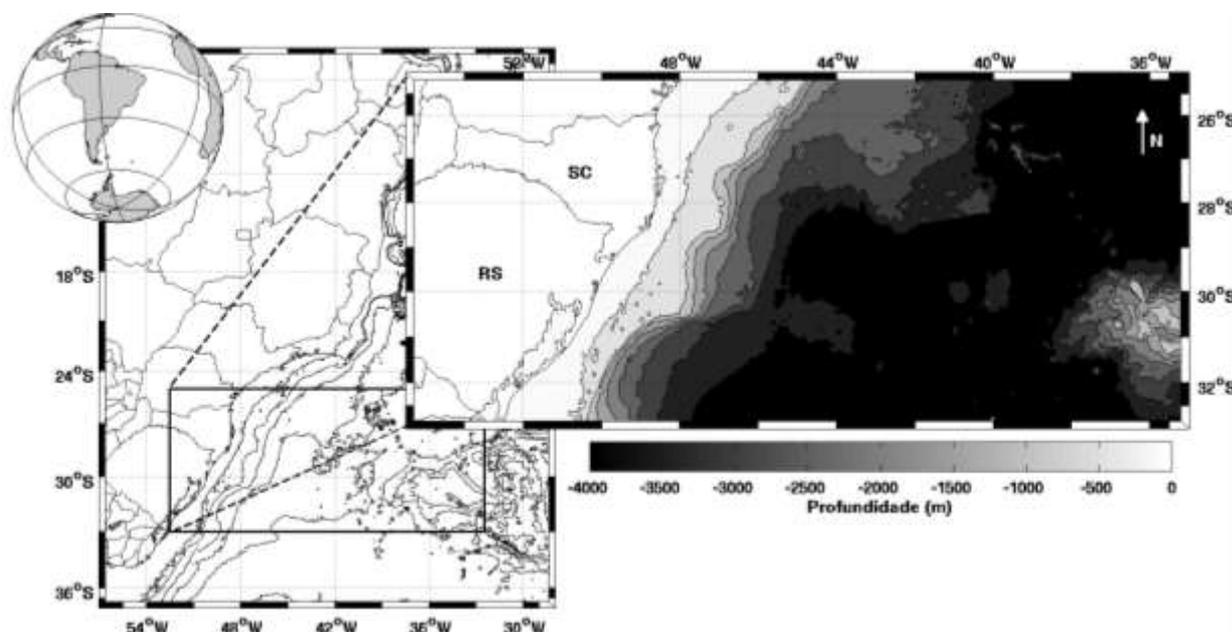


Figura 2. Área de estudo (25-33°S e 35-55°W) no Atlântico Sul com destaque para a batimetria oriunda do ETOPO1.

A corrente de contorno oeste presente na área de estudo é a Corrente do Brasil (CB) que está associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul e comanda a maior parte da dinâmica da região através de seu transporte meridional intensificado de *momentum*, calor e outras propriedades físicas e químicas (STOMMEL, 1948; OLSON *et al.*, 1988; CAMPOS E OLSON, 1991; MATANO, 1991, 1993). A CB tem origem tropical e flui para sul pela parte externa da plataforma até encontrar a Corrente das Malvinas de origem subantártica e sentido de fluxo contrário em torno da latitude 38° (OLSON *et al.*, 1988).

A atuação do campo de vento na região de estudo é regida pela parte oeste do giro anticiclônico em médias latitudes, conhecido como a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), e segundo Fedorova (2001) esse giro tem localização média em torno de 30°S. Durante a maior parte do ano os ventos nessa região são provenientes do quadrante norte, principalmente de nordeste (CASTRO, 1996). Esta região está ainda sujeita a formação de sistemas frontais que são originados pelo encontro entre a massa de ar frio do Anticiclone Móvel Polar com a massa de ar quente do ASAS (RODRIGUES *et al.*, 2004). Segundo esse autor, o sistema frontal quando intenso pode resultar em um ciclone extratropical que configura o principal processo meteorológico de meso-escala para a região sul-sudeste do Brasil.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Conteúdo de calor estimado (OHC')

Para a estimativa do conteúdo de calor na camada superficial do oceano foi utilizado o modelo desenvolvido por Meyers *et al.* (2014) que determina a estrutura térmica do oceano a partir da qual o conteúdo de calor foi calculado. No modelo empírico original o oceano possui duas camadas (ρ_1 e ρ_2) onde a interface divisora é representada pela região da termoclina, originalmente a isoterma de 20°C (D20 – profundidade da isoterma de 20°C). A temperatura de 26°C (D26 – profundidade da isoterma de 26°C) representa a temperatura limitrofe no oceano Atlântico Norte acima do qual o conteúdo de calor seria disponibilizado à tempestade. A profundidade da camada de mistura (PCM) representa a terceira variável requisitada pelo modelo e é definida como a profundidade em que a temperatura diminui em 0.5°C da SST.

Na adaptação deste modelo para o Oceano Atlântico Sul, as variáveis requisitadas pelo modelo foram modificadas para representarem as características térmicas do oceano da área de estudo. Em um primeiro momento as variáveis foram definidas como incógnitas, sendo elas: i) profundidade da isoterma que representa a termoclina (DT), ii) profundidade da isoterma que representa a temperatura limitrofe (DTL) e iii) a

profundidade da camada de mistura (PCM). A temperatura limítrofe (TL) corresponde a menor temperatura da camada de mistura entre os diferentes meses do ano, assumindo que a partir desta temperatura o conteúdo de calor estaria disponível para o furacão. A termoclina foi definida como a região com forte gradiente térmico que separa a camada superficial da camada profunda do oceano. Por fim, a temperatura representante da camada de mistura, assim como na metodologia original, foi definida como a temperatura que diminui em 0.5°C da SST. A temperatura limítrofe e a temperatura da termoclina foram definidas a partir da análise de perfis climatológicos mensais do *World Ocean Atlas 2001* (WOA-01).

Uma vez definidas essas variáveis, seus valores médios diários, representados matematicamente por \overline{DT} , \overline{DTL} e \overline{PCM} , foram obtidos a partir do cálculo de valores climatológicos diários utilizado no intuito de aumentar a resolução temporal e evitar transições severas entre os diferentes meses do ano. Esses dados diários são calculados a partir da média dos dados de 15 dias, sendo considerados no cálculo os 7 dias anteriores e 7 dias posteriores ao dia desejado (Figura 3). Para criar a climatologia do dia 2 de Outubro, por exemplo, a climatologia de Setembro terá peso de $6/15$ enquanto que a climatologia de Outubro terá peso de $9/15$. Nesse estudo não houve combinação entre dados modelados e climatológicos como na metodologia original e, portanto, somente a climatologia WOA-01 foi utilizada (Figura 4). Essa climatologia não assimila nenhum dos dados *in situ* usados posteriormente neste trabalho, permitindo uma avaliação imparcial da mesma.

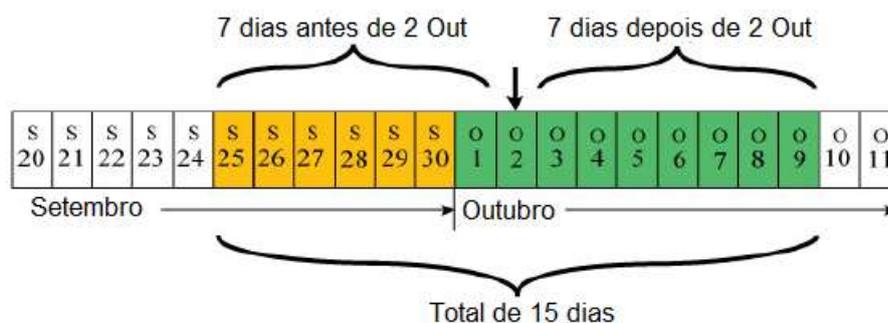


Figura 3. Determinação da climatologia diária a partir da média de 15 dias consecutivos.

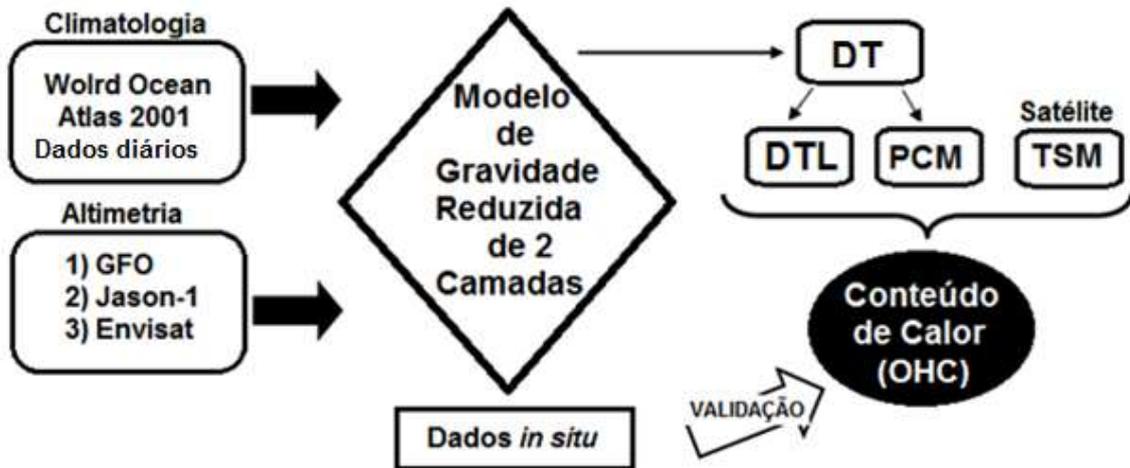


Figura 4. Fluxograma da Metodologia adaptada de Meyers *et al.*, 2010.

A partir da definição das variáveis médias (\overline{DT} , \overline{DTL} e \overline{PCM}), da gravidade reduzida (g') (Equação 1) e da anomalia de altura da superfície do mar (η') definida a partir dos dados de altimetria com resolução de $1/4^\circ$, foi possível estimar a profundidade da isoterma da termoclina permanente (DT') (Equação 2). Com isso, foi possível calcular a profundidade da isoterma da temperatura limítrofe (DTL') e da camada de mistura (PCM') por meio das Equações 3 e 4.

$$g' = g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (1)$$

onde a aceleração da gravidade, g , é de $9,81 \text{ m s}^{-2}$;

$$DT' = \overline{DT} + \frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \eta' \quad (2)$$

$$DTL' = \frac{\overline{DTL}}{\overline{DTP}} ZTP' \quad (3)$$

$$PCM' = \frac{\overline{PCM}}{\overline{DT}} DT' \quad (4)$$

Em um modelo de gravidade reduzida de duas camadas as mudanças na altura da superfície do mar implicam em mudanças na interface que divide as duas camadas. Caso a anomalia de altura seja positiva (negativa), a camada superficial será mais espessa (fina) e a profundidade da interface será mais profunda (rasa). Sendo assim,

para inferir os valores da DTL' e da PCM' foi adotado um alongamento ou encolhimento uniforme da camada superficial do oceano. Esses cálculos foram realizados para cada ponto de grade do oceano dentro da área de estudo em profundidades maiores que 100 m. Em casos em que a profundidade da isoterma for maior que a batimetria local, a mesma teve o valor da profundidade local.

Finalmente, o conteúdo de calor estimado (OHC') foi calculado a partir da temperatura limítrofe e a da profundidade da sua isoterma (TL , DTL'), da profundidade da isoterma da camada de mistura (PCM') e dos valores de SST provenientes do satélite TMI-AMSR-E com $\frac{1}{4}^\circ$ de resolução (Equação 5). Para esse cálculo, assumiu-se que o perfil de temperatura pertencia a uma camada de mistura homogênea com gradiente térmico constante desde a base da camada de mistura até a DTL' (Figura 5).

$$OHC' = \frac{1}{2} \rho_1 c_p (DTL' + PCM') (SST - TL) \quad (5)$$

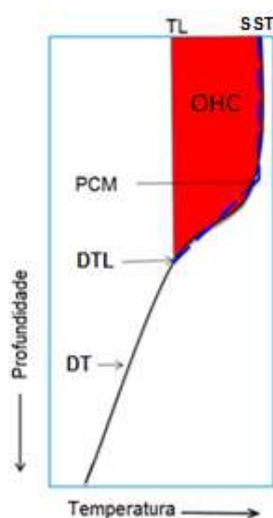


Figura 5. Esquema do cálculo do Conteúdo de Calor. A porção vermelha representa o conteúdo de calor calculado a partir da integralização do perfil de temperatura preto. A linha tracejada em azul representa aproximadamente o perfil de temperatura do oceano superficial.

A grande vantagem deste modelo é utilizar dados de sensoriamento remoto que apresentam grande cobertura espacial e temporal para calcular o conteúdo de calor para toda a área de estudo em uma resolução de $\frac{1}{4}^\circ$, em escala quase sinótica e de relevância no estudo dos processos de interação oceano-atmosfera.

4.2.2 Conteúdo de calor observado (OHC_{obs})

O conteúdo de calor observado (OHC_{obs}) foi calculado através da integração trapezoidal que vai desde a superfície do oceano (Sfc) até a profundidade da isoterma da temperatura limítrofe (DTL), como pode ser visto na Equação 6. No intuito de validar o conteúdo de calor estimado pelo modelo (Equação 5), este cálculo foi realizado através de perfis de temperatura *in situ* das boias ARGO.

$$OHC_{obs} = \int_{ZTL}^{Sfc} c_p \rho (TSM - TL) dz \quad (6)$$

A densidade utilizada nessa equação respeitará a metodologia original, onde um polinômio de 4ª ordem é desenvolvido (MILLER & POISSON, 1981) a partir de dados de temperatura e de salinidade. Para o calor específico da água, c_p , será utilizado o valor de $4200 \text{ Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ADAPTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A adaptação do modelo de cálculo do OHC (Meyers *et al.*, 2014) para a região de estudo consiste na determinação das isotermas características da temperatura limítrofe (TL) e da região da termoclina (TP), melhor detalhada no item 4.2.1. Uma vez que os dados climatológicos do WOA-01 com $\frac{1}{4}^\circ$ de resolução representam as características oceanográficas de forma mais realística (BOYER *et al.*, 2005), fez-se uma análise mensal qualitativa da estrutura termal do oceano para a área de estudo a partir da quebra de plataforma a fim de determinar os valores de TL e TP.

Através da variação mensal dos perfis climatológicos de temperatura (Figura 6) a isoterma de 19°C foi escolhida como a temperatura limítrofe que representa a temperatura a partir da qual os perfis térmicos variam ao longo dos meses (identificada como TL na Figura 6). A TL representa neste trabalho o limite mínimo necessário para que o oceano sirva como fonte de energia para intensificar o furacão Catarina. A isoterma de 15°C foi escolhida para representar a divisão entre a camada superficial e profunda do oceano, já que separa a camada superficial sujeita a variabilidade sazonais da camada profunda do oceano livre dessas variações (identificada como TP na Figura 6).

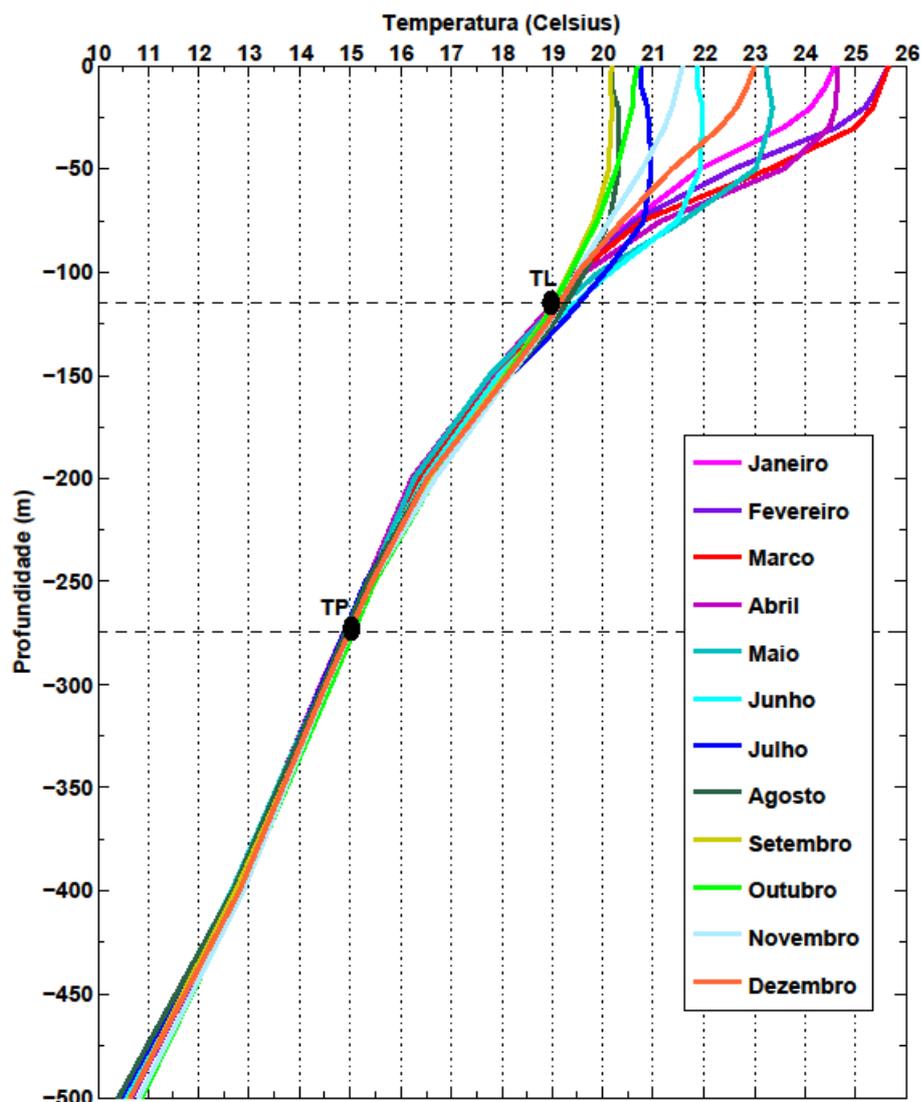


Figura 6. Variação vertical da temperatura média mensal da área de estudo. Os meses do ano são representados pelas diferentes cores. TL marca a temperatura de 19°C escolhida para representar a temperatura limítrofe e TP marca a temperatura de 15°C escolhida para representar a temperatura da termoclina.

Uma vez definidas a temperatura limítrofe e a temperatura da termoclina, as incógnitas \overline{DT} , \overline{DTL} se tornaram $\overline{D15}$, $\overline{D19}$ e assim o conteúdo de calor estimado foi calculado pelo modelo através da Equação 5 descrita no item 4.2.1.

A validação dos resultados de OHC produzidos pelo modelo foi realizada pela comparação com o OHC calculado a partir dos perfis das boias ARGO (<http://www.argodatamgt.org/Access-to-data/Argo-data-selection>) como mencionado da metodologia deste trabalho. De um total de 36 perfiladores ARGO presentes na

área de estudo ao longo do ano de 2004 (representados pelos marcadores em x na Figura 7) foram selecionadas mensalmente as boias mais próximas entre si (31 delas) para a determinação de um único perfil para cada um dos meses. Devido à escassez de dados, foi utilizado um ano de dados das boias ARGO para aumentar o número de dados disponível para o cálculo do conteúdo de calor observado e consequente para a validação do modelo. Na Figura 7 as diferentes cores representam os meses ao longo do ano de 2004 e para os meses de fevereiro (verde claro), junho (roxo), setembro (verde), novembro (marrom) e dezembro (branco) somente duas das três boias disponíveis foram utilizadas tendo em vista a grande distância entre as duas primeiras e a terceira boia.

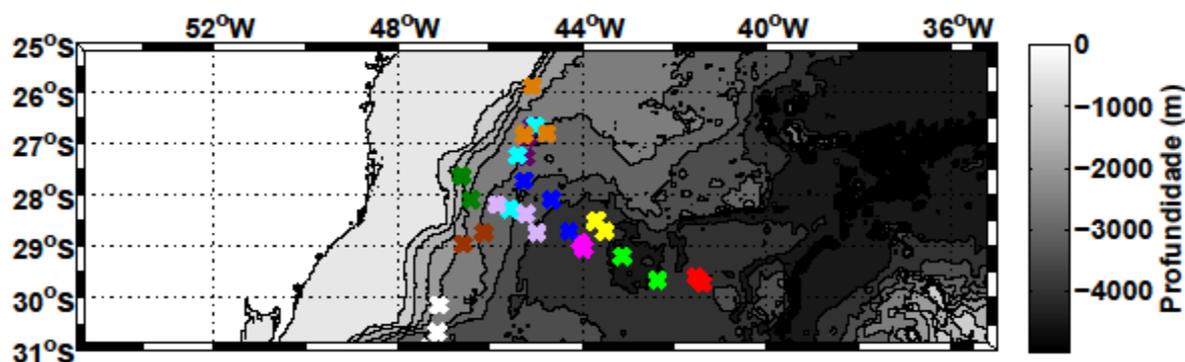


Figura 7. Localização dos perfiladores ARGO na área de incidência do furacão Catarina. Os símbolos representam as boias e as cores os meses do ano de 2004, sendo elas: vermelho (janeiro – 3 boias), verde claro (fevereiro – 2 boias), amarelo (março – 3 boias), rosa (abril – 3 boias), azul marinho (maio – 3 boias), roxo (junho – 2 boias), azul claro (julho – 3 boias), lilás (agosto – 3 boias), verde (setembro – 2 boias), laranja (outubro – 3 boias), marrom (novembro – 2 boias) e branco (dezembro – 2 boias).

A Figura 8 mostra as médias e desvios padrão entre o OHC estimado e observado ao longo do ano na área de estudo. O OHC observado foi calculado através do perfil médio retirado de uma média aritmética entre as boias escolhidas seguindo o critério adotado com relação a distância entre as mesmas, assim as médias foram calculadas com 2 ou 3 perfis dependendo da disponibilidade das boias descritas na Figura 7. O OHC estimado foi então calculado a partir do perfil médio retirado dos mesmos pontos das boias.

Na maioria dos meses a variabilidade do OHC observado (barras vermelhas na Figura 8) foi maior do que o OHC estimado (barras azuis na Figura 8), provavelmente porque os perfis climatológicos de temperatura utilizados no modelo representam uma média da estrutura termal do oceano, diminuindo a variabilidade térmica dos mesmos. As exceções deste padrão ocorreram nos meses de junho e novembro, quando ocorreu a menor variabilidade do OHC observado em relação ao OHC estimado. Este resultado pode estar associado ao fato de que os perfiladores estiveram mais agrupados nesses dois meses, como pode ser observado na Figura 7 em que as boias de cor roxa e marrom encontram-se bem próximas entre si, originando um perfil médio de menor variabilidade.

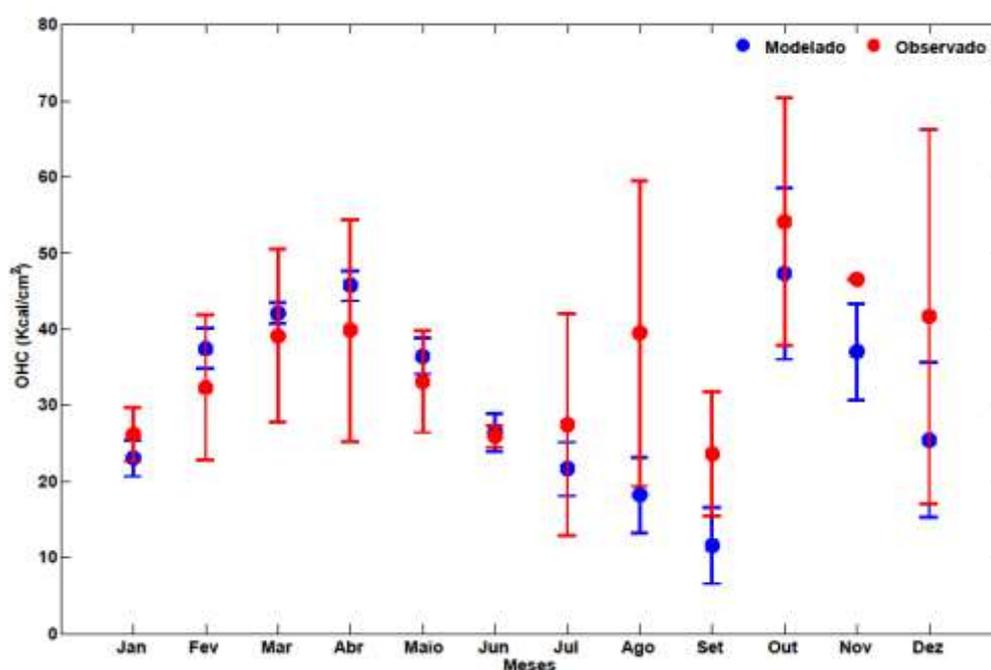


Figura 8. Média e desvio padrão do conteúdo de calor (OHC) estimado pelo modelo (círculos e barras azuis) e calculado através de dados dos perfiladores ARGO (círculos e barras vermelhas) na área de estudo.

De janeiro a junho as médias e os desvios padrão do OHC estimado e observado encontram-se mais próximos um do outro, o que pode ser explicado pelo fato dos perfiladores estarem localizados na região oceânica profunda, caracteristicamente de menor hidrodinâmica. No período de julho a dezembro os perfiladores se localizaram próxima à quebra de plataforma, uma região sujeita a ação da Corrente do Brasil e dos meandros e vórtices a ela associados (SILVEIRA *et al.*, 2000) o que pode ter

contribuído para a maior variabilidade dos conteúdos térmicos observados na Figura 8.

Apesar da variabilidade observada no conteúdo térmico dos dados *in situ* comparativamente aquele estimado, no mês de março de 2004, quando o furacão Catarina se desenvolveu, os valores de OHC foram próximos e, assim, considerados válidos para os objetivos desse estudo.

5.2 RESULTADOS DO MODELO

O furacão Catarina foi analisado ao longo de toda a sua trajetória, retirados do trabalho de R. Edson na University of Guam, entre 51°-35°W e 25°-33°S durante os dias 19 e 28 de março de 2004 (Figura 9a). Entre os dias 19 e 23 de março o furacão Catarina foi classificado como um ciclone extratropical e, depois de sofrer transição tropical (TT) no dia 24 de março, a tempestade evoluiu para um sistema de núcleo quente (MCTAGGART *et al.*, 2006). Através de dados de satélite verificou-se que o furacão Catarina se desenvolveu sobre águas com temperaturas superficiais inferiores a 26°C (Figura 9a) e que a sua trajetória coincidiu com a presença de 4 ANQs (Figura 9b). A ocorrência de 4 ANQs também foi reportada por Vianna *et al.* (2010), enquanto que Pereira Filho *et al.* (2010) considerou somente 3 dos 4 anéis. Diversos estudos no hemisfério norte mostram a importância de ANQs na intensificação de furacões, como por exemplo, os furacões Opal, Katrina e Rita e o super tufão Maemi (MARKS *et al.*, 1998; BOSART *et al.*, 2000; HONG *et al.*, 2000; SHAY *et al.*, 2000 e 2009)

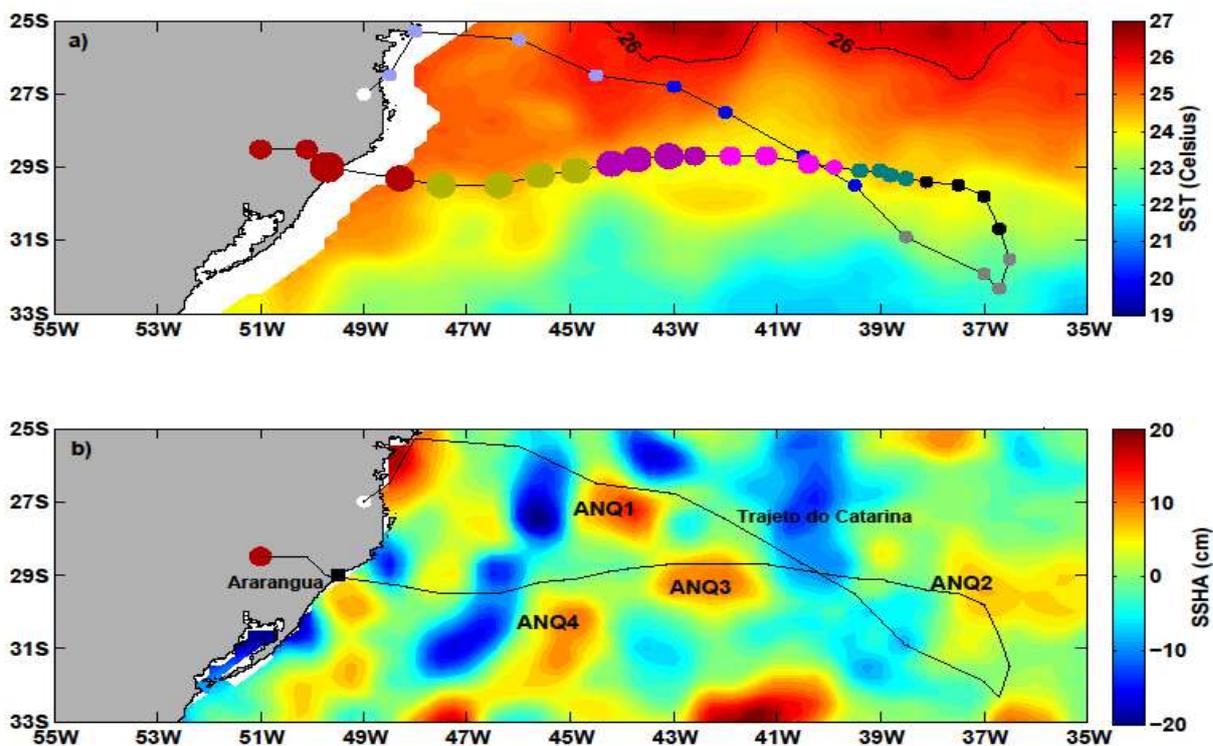


Figura 9. Valores médios de (a) SST entre os dias 19 e 28 de março de 2004. Os círculos representam a posição geográfica do furacão em intervalos de 6 horas para os diferentes dias: círculos branco-19/03, lilás-20/03, azuis-21/03, cinzas-22/03, pretos-23/03, verdes-24/03, rosas-25/03, roxos-26/06, amarelos-27/03 e vermelhos-28/03). Os tamanhos dos círculos aumentam de acordo com a intensificação do furacão em 5 níveis: sistema extratropical, híbrido, tempestade tropical, categoria 1 e 2 de furacão. Valores médios de SSHA (b) durante o período do furacão onde estão identificados os ANQs 1, 2, 3 e 4.

No presente estudo foi observado que os anéis denominados de 1, 2 e 3 permaneceram quase-estacionários durante a passagem do furacão, enquanto que o ANQ4 apresentou deslocamento espacial amplo, além de interagir com pequenos anéis ao seu redor. A Figura 10 mostra o deslocamento na direção sul de um possível anel situado ao redor de 28°S que se propagou com velocidade de $0,26 \text{ m.s}^{-1}$ e se uniu ao ANQ4 no dia 27 de março, coincidindo com a passagem do furacão sobre essa feição.

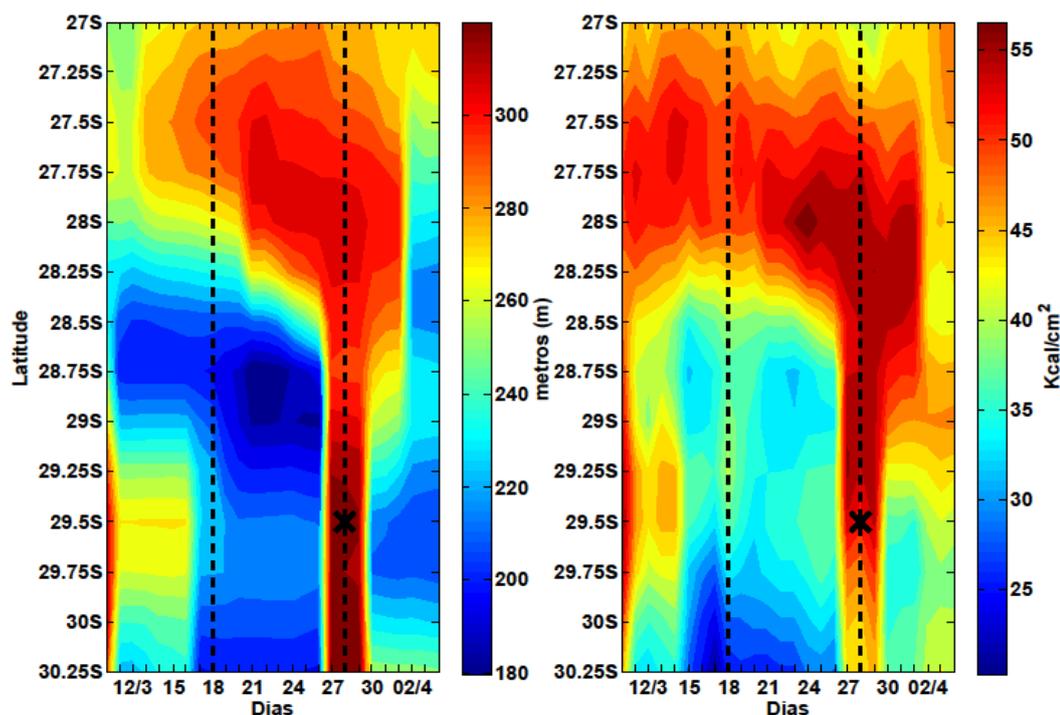


Figura 10. Variação espaço-temporal da isoterma de 15°C à esquerda e do conteúdo de calor à direita ao longo da longitude de 46.5°W. As linhas tracejadas delimitam o período de incidência do furacão Catarina e o marcador representa a posição do furacão no dia 27 de março (18 horas antes do mesmo atingir costa catarinense).

A velocidade média de deslocamento do furacão Catarina foi estimada em aproximadamente $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ após a tempestade ter revertido sua trajetória com um giro anticiclônico, antes de assumir rumo oeste no dia 24 de março. Através da análise de OHC, verificou-se que após evoluir para Tempestade Tropical (25 de março), a trajetória do furacão Catarina permaneceu sobre águas com OHC superior a 30 Kcal.cm^{-2} (Figura 11a). De acordo com trabalhos realizados no Oceano Pacífico Oeste (LIN *et al.*, 2005) e no Golfo do México (LEIPPER & VOLGENAU, 1972), esta quantidade de calor seria suficiente para sustentar um furacão por mais de 7 dias, assumindo uma perda de calor pelo oceano de aproximadamente $4 \text{ Kcal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

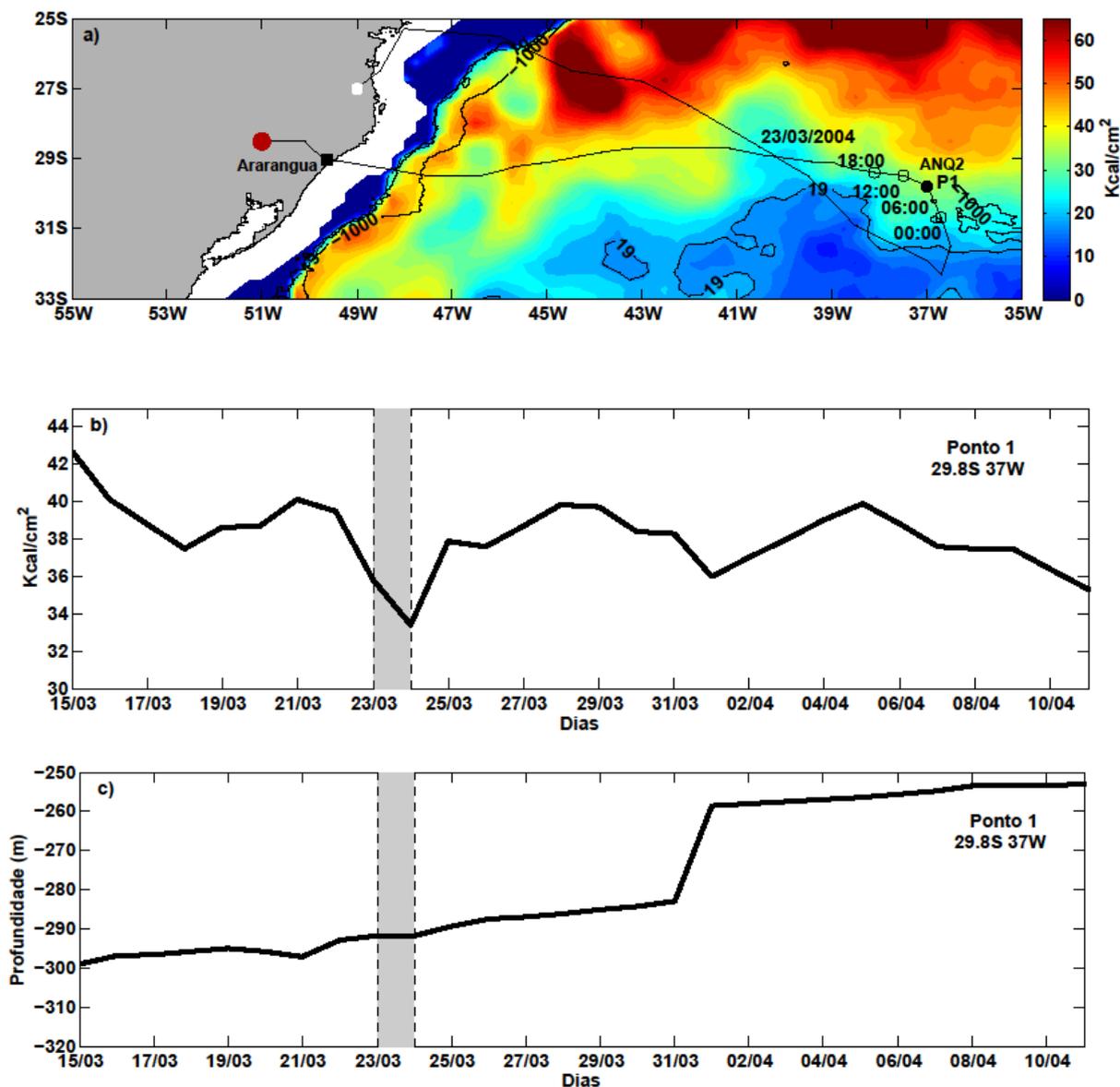


Figura 11. Conteúdo de calor e o deslocamento espaço-temporal do furacão as 00, 06 (círculo preenchido), 12 e 18UTC do dia 23 de março de 2004, além da identificação do ANQ2 (a). Variação temporal do conteúdo de calor no ponto 1 (b). Variação temporal da profundidade da isoterma de 15°C do ponto 1 (c).

A fim de analisar o papel do oceano na evolução do furacão Catarina, foram definidos pontos sobre os ANQs 2, 3 e 4 já que feições com elevado OHC associado como os ANQs são conhecidos por serem responsáveis pela intensificação dos furacões no Oceano Atlântico Norte (SHAY *et al.*, 2000 e 2009; JAIMES E SHAY, 2009).

Assim sendo, o ponto 1, identificado na Figura 11a, esteve localizado sobre o centro do ANQ2 e indica a região onde o Catarina deu início ao processo de TT (PEZZA &

SIMMONDS, 2005). Neste ponto o OHC estimado foi de $35.8 \text{ Kcal.cm}^{-2}$ (Figura 11b) e, posteriormente à passagem do Catarina, este conteúdo diminuiu em apenas $2,4 \text{ Kcal.cm}^{-2}$ (área hachurada) (MCTAGGART-COWAN *et al.*, 2006). Após a passagem da tempestade neste ponto (Figura 11c), a profundidade da termoclina praticamente não variou assim como os valores de SST (redução em $0,2^{\circ}\text{C}$) e de SSHA (redução em $0,1 \text{ cm}$). Estes resultados sugerem que a evolução do furacão Catarina de um sistema extratropical para um sistema híbrido foi conduzida, principalmente, devido a efeitos meteorológicos, como anteriormente reportado por Pezza e Simmonds (2005) e Pezza *et al.* (2009). No entanto, Pereira Filho *et al.* (2010) citam o papel desempenhado pelo fluxo de calor sensível e latente na interface oceano-atmosfera na evolução desse sistema que mostra que o oceano teve papel secundário nesta evolução.

O ponto 2 (Figura 12b), localizado no centro do ANQ3, apresentou uma diminuição do OHC em $5,1 \text{ Kcal.cm}^{-2}$ após a passagem do furacão (área hachurada), uma diminuição da profundidade da termoclina em aproximadamente 37 m (Figura 12c) seguido da diminuição da SSHA em $7,7 \text{ cm}$. Esses resultados são comparáveis aqueles observados na intensificação do furacão Opal ao passar sobre um ANQ. Nesse caso o ANQ sob o Opal perdeu 24 Kcal.cm^{-2} de OHC, diminuiu a profundidade da termoclina em 50 m e do SSHA em 20 cm (SHAY *et al.*, 2000). No caso do furacão Catarina, Pereira Filho *et al.* (2010) e Vianna *et al.* (2010) observaram uma diminuição em torno de 40 m na profundidade da termoclina (representada pela isoterma de 17°C) deste anel, assim como uma diminuição dos valores de SSHA. De acordo com e Vianna *et al.* (2010) a diminuição da profundidade da termoclina foi uma resposta ao rotacional da tensão de cisalhamento do vento na superfície do oceano que induziu o processo de divergência de Ekman.

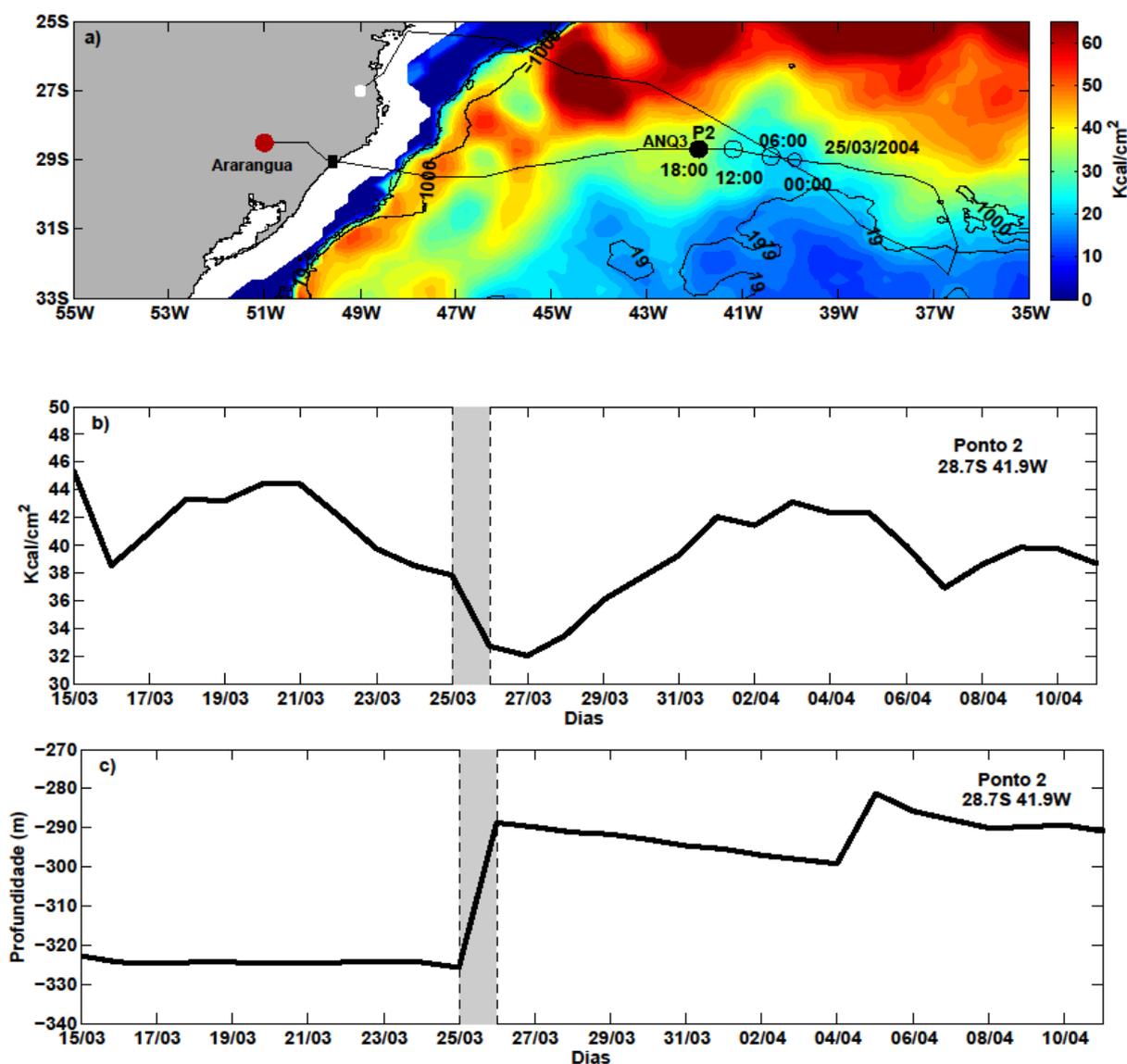


Figura 12. Conteúdo de calor e o deslocamento espaço-temporal do furacão as 00, 06, 12 e 18UTC (círculo preenchido) do dia 25 de março de 2004, além da identificação do ANQ3 (a). Variação temporal do conteúdo de calor no ponto 2 (b). Variação temporal da profundidade da isoterma de 15°C no ponto 2 (c).

Da mesma forma que no ponto 1, o ANQ3 não apresentou variação na SST após a passagem do furacão, apesar de ter havido ascensão da termoclina. Esse comportamento era esperado pois as isotermas D15 e D19 eram profundas no interior do anel (Tabela 1), fazendo com que, apesar do rotacional negativo da tensão de cisalhamento do vento, a ascensão de água não afetasse a SST de forma significativa, diminuindo-a em apenas 0,2°C. De maneira semelhante, estudos observaram que na maior parte da região sob o furacão Katrina a distribuição da SST apresentava-se uniforme a 30°C e o seu esfriamento após a passagem dos furacões foi menor que

1°C (SCHARROO *et al.*, 2005 e 2006; SUN *et al.*, 2006; MAINELLI *et al.*, 2008; SHAY, 2009; SHAY *et al.*, 2011; JAIMES & SHAY, 2009, 2010; GONI *et al.*, 2009). O mesmo aconteceu com o super tufão Maemi, onde a SST local exibia uniformidade entre as temperaturas de 30-31°C enquanto o mesmo viajava sobre três ANQs na porção oeste do Pacífico Norte e, após sua passagem, o esfriamento da SST foi quase que imperceptível (LIN *et al.*, 2005).

Tabela 1. Parâmetros da estrutura do oceano dentro e fora do anel de núcleo quente 3.

	SSHA (cm)	SST (°C)	D15 (m)	D19 (m)	PCM (m)
25 de março de 2004					
Ponto 2 (28.7°S 41.9°W)	+11,4	23,7	325,7	117	39,6
Ponto fora do anel (28.7°S 40°W)	-9	23,9	189,5	66,6	23,2

Valores superiores a 50 Kcal.cm⁻² foram encontrados no ponto 3 associado ao centro do ANQ4 (Figura 13a) um dia antes do Catarina atingir a categoria 2 de furacão. Como mencionado anteriormente e evidenciado na Figura 10, coincidentemente à passagem do furacão houve interação entre o ANQ4 e um anel que se deslocou para sul e elevou o conteúdo de calor da região para 54,1 Kcal.cm⁻² (Figura 13b). O deslocamento e interação entre os anéis foi evidenciado através do aprofundamento da termoclina a partir do dia 26 e retorno a profundidade prévia a partir do dia 29 de março (Figura 13c). Esse padrão sugere que o anel que se deslocou continuou sua trajetória para sul. Valores de OHC similares a este foram reportados na bibliografia em ANQs sobre a trajetória do furacão Opal. Segundo Shay *et al.* (2000) esse conteúdo de calor foi responsável pela intensificação do furacão. A análise da variação temporal do OHC no ponto 3 (Figura 13b) indica que houve uma diminuição de 3,4 Kcal.cm⁻² do OHC após a passagem do furacão (28 de março - área hachurada). A quantidade de OHC absorvido pela tempestade foi provavelmente maior já que fluxos de calor sensível e latente persistiram durante as 18 horas que antecederam a intensificação e a chegada do furacão à costa Catarinense (PEREIRA FILHO *et al.*, 2010).

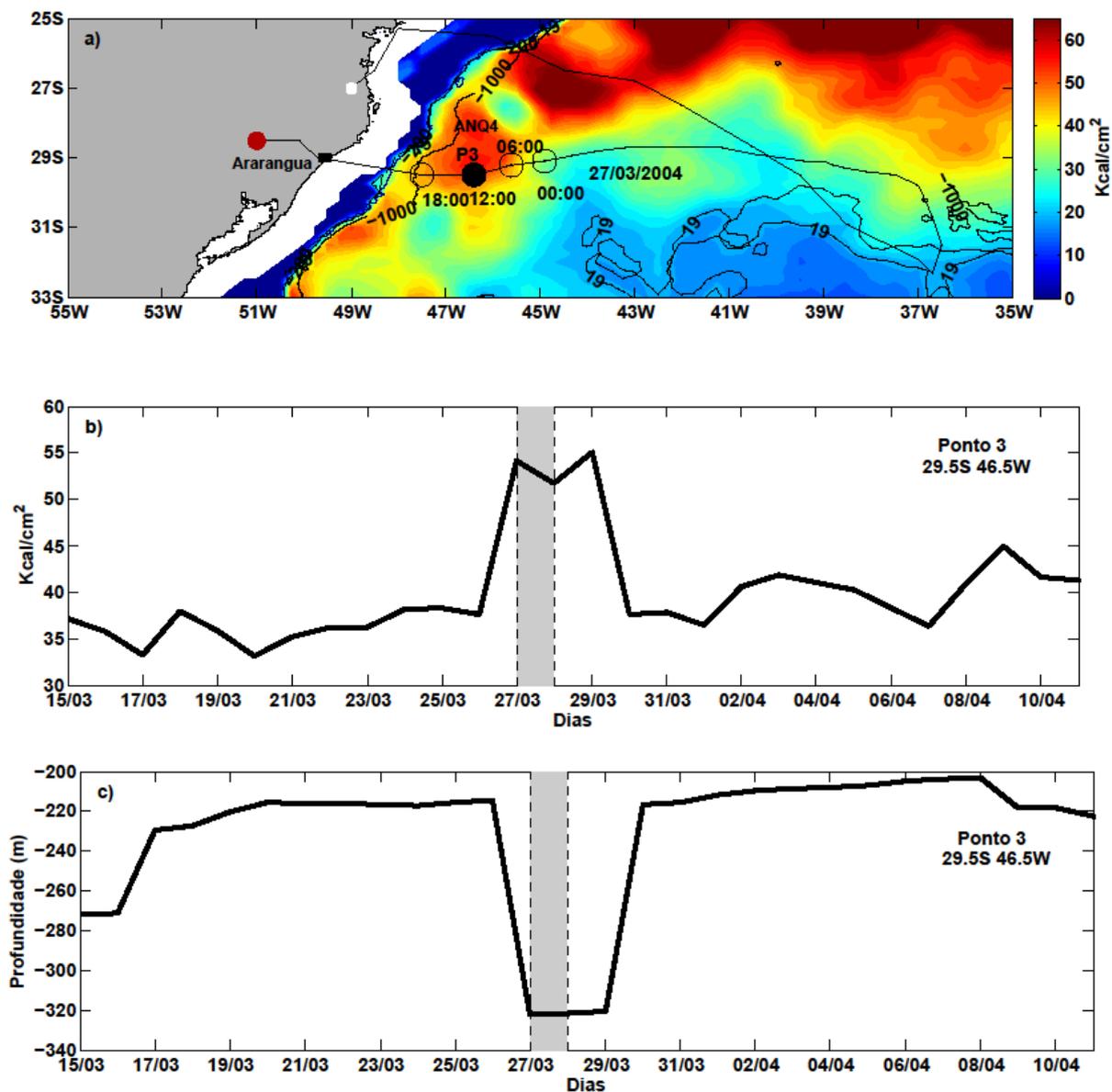


Figura 13. Conteúdo de calor e o deslocamento espaço-temporal do furacão as 00, 06, 12 (círculo preenchido) e 18UTC do dia 27 de março de 2004, além da identificação do ANQ4 (a). Variação temporal do conteúdo de calor no ponto 3 (b). Variação temporal da profundidade da isoterma de 15°C no ponto 3 (c).

6 CONCLUSÃO

As isothermas de 15°C e 19°C foram escolhidas para representar a temperatura limítrofe e a temperatura característica da termoclina da região, respectivamente, e utilizadas na adaptação do modelo de Meyers *et al.* (2014). Os valores de OHC estimado de janeiro a junho encontraram-se, em sua maioria, dentro do intervalo de valores do OHC observado o que viabilizou o uso do OHC estimado pelo modelo neste estudo para o período do furacão Catarina.

Quatro anéis de núcleo quente foram identificados através da análise do OHC, concordando com os resultados de Vianna *et al.* (2010) que foram baseados em dados altimétricos. O ponto 1 foi onde houve a menor troca de calor entre o oceano e a tempestade, podendo indicar que o processo de transição tropical do sistema foi conduzido principalmente por efeitos meteorológicos. Sobre esse anel (ANQ2) foi observado uma diminuição de 2,4 Kcal.cm⁻² de OHC. O ponto 2 foi onde houve a maior troca de calor entre o oceano e a tempestade, o que resultou na evolução da tempestade tropical para um furacão de categoria 1. Sobre esse anel (ANQ3) foi observado uma diminuição de 5,1 Kcal.cm⁻² de OHC e uma ascensão de 37 m da termoclina. No ponto 3 foi observado o maior OHC sobre a trajetória do furacão Catarina, o que resultou na evolução do furacão Catarina para categoria 2. Neste ponto o conteúdo de calor encontrado foi de 54,1 Kcal.cm⁻² e a troca de calor entre o oceano e a tempestade foi de 3,4 Kcal.cm⁻².

Apesar do furacão Catarina ter se desenvolvido sobre águas com temperaturas inferiores a 26°C, abaixo do limite determinado por Palmén (1948), o conteúdo de calor associado a essas águas foi superior a 30 Kcal.cm⁻² e foi suficiente para sustentar o furacão Catarina por cerca de 5 dias após ter sofrido TT. Os resultados encontrados neste trabalho sugerem que a temperatura de 19°C representaria a temperatura mínima requerida para intensificar furacões na área de estudo. Portanto, o monitoramento do conteúdo de calor é mais completo para determinar o papel do oceano na intensificação de furacões do que somente os parâmetros individuais como a SST e a profundidade da termoclina. Este trabalho deve ser considerado em análises quantitativas futuras do conteúdo de calor responsável pela intensificação do furacão Catarina.

7 PERPECTIVAS FUTURAS

Para trabalhos futuros é importante testar a sensibilidade da metodologia utilizada ao determinar diferentes isotermas que representem a temperatura limítrofe e a região da termoclina, buscando uma maior representatividade da estrutura térmica da camada superior do oceano na área de estudo. Além disso, é necessário analisar o conteúdo de calor absorvido pelo furacão sobre os ANQs em toda a sua área tendo em vista o diâmetro médio do furacão (56 km). Por fim, sugere-se a análise do fluxo de calor sensível e latente na interface oceano-atmosfera durante a passagem do furacão, a fim de comprovar que a diminuição de OHC nos ANQs foi resultante da passagem do furacão Catarina.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA

ANTHES, R. A., 1982. Tropical Cyclone: Their Evolution, Structure and Effects. **Meteorological Monographs**, 19, 208. American Meteorological Society, Boston, Mass.

BEVEN, J. L.; AVILA, L. A.; BLAKE, E. S.; BROWN, D. P.; FRANKLIN, J. L.; KNABB, R. D.; PASCH, R. J.; RHOME, J. R.; STEWART, S. R., 2008. Atlantic hurricane season of 2005. **Monthly Weather Review**, 136, 1168, 1169, doi:10.1175/2007MWR2074.1.

BONATTI, J. P.; RAO, V.B.; SILVA DIAS, P. L., 2006. **On the westward propagation of the Catarina Storm**. 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, American Meteorology Society, Foz do Iguacu, Brasil. De 24 a28 de Abril.

BOSART, L.F.; VELDEN, C. S.; BRACKEN, W. E.; MOLINARI, J.; BLACK, P. G., 2000. Environmental influences on the rapid intensification of Hurricane Opal (1995) over the Gulf of Mexico. **Monthly Weather Review**, 128, 322-352.

BOYER, T; LEVITUS, S.; GARCIA, H.; LOCARNINI, R.A.; STEPHENS, C; ANTONOV. J., 2005. Objective analyzes of annual, seasonal, and monthly temperature and salinity for the world ocean on a 0.25 degrees grid. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 7, 931-945. 2005.

CAMPOS, E. J. D.; OLSON, D. B., 1991. Stationary Rossby Waves in western boundary current extensions. **Journal of Physical Oceanography**, 21, 1202-1224.

CASTRO, B. M. de, 1996: **Correntes e massas de água da Plataforma continental norte de São Paulo**. Tese de Livro-Docência. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 248.

CHARNEY, J. G., 1947. The Dynamics of Long waves in a Baroclinic Westerly Currents. **Journal of Meteorology**, 4(5), 135-162.

D'ASARO, E. A., 1985. Upper ocean temperature structure, inertial currents, and Richardson numbers observed during strong meteorological forcing. **Journal of Physical Oceanography**, 15, 943-962.

D'ASARO, E. A.; SANFORD, T. B.; NIILER, P. P., TERRILL E. J., 2007. Cold wake of Hurricane Frances. **Journal of Geophysical Research**. Lett. 34, L15609, doi: 10.1029/2007GL030160.

DAVIS, C. A.; BOSART, L. F., 2003. Baroclinic induced tropical cyclogenesis. **Monthly Weather Review**, 131, 2730-2747.

DUTRA, L. M. M., 2012. **Subtropical cyclones over the South Atlantic: analysis of the dynamic structure of some events**. Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

EADY, E. T., 1949. Long Waves and Cyclones Waves. **Tellus**, 1(3), 35-52.

FEDOROVA, N., 2001. **Meteorologia Sinótica**. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul: Ed. Universitária.

GONI, G. J., E COAUTORES, 2009. Applications of satellite-derived ocean measurements to tropical cyclone intensity forecasting. **Oceanography**, 22 (3), 190-197.

GRAY, W., 1968. Global view of the origin of tropical disturbance and storms. **Monthly Weather Review**, 96, 669-700.

HALLIWELL, G.; SHAY, L. K.; JACOB, S. D.; SMEDSTAD, O.; UHLHORN, E., 2008. Improving ocean model initialization for coupled tropical cyclone forecast models using GODAE nowcasts. **Monthly Weather Review**, 136 (7), 2576-2591.

HART, R. E.; 2003. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. **Monthly Weather Review**, 131, 585-616.

HOLLAND, G. J., LANDER, M., 1993. The meandering nature of tropical cyclone tracks. **Journal of Atmospheric Science**, 50, 1254-1266.

HONG, X.; CHANG, S. W.; RAMAN, S.; SHAY, L. K.; HODUR, R., 2000. The interaction between hurricane Opal (1995) and a warm core ring in the Gulf of Mexico. **Monthly Weather Review**, 128, 1347-1365.

JACOBS, G. A., 2006. Large-scale ocean circulation. Remote Sensing of the Marine Environment, J. F. R. Gower, Ed., Vol. 6 The Manual of Remote Sensing, **American Society of Photogrammetry and Remote Sensing**, 1-27.

JAIMES, B.; SHAY, L. K., 2009. Mixed layer cooling in mesoscale oceanic eddies during hurricanes Katrina and Rita. **Monthly Weather Review**, 137, 4188-1365.

JONES, S. C. e coautores, 2003. The extratropical transition of tropical cyclones: Forecast challenges, current understanding and future directions. **Weather Forecasting**, 18, 1052-1092.

LAWRENCE, M. B.; PELISSIER, J. M., 1981. Atlantic hurricane season of 1980. **Monthly Weather Review**, 109, 1579, 1581.

LEIPPER, D. F.; VOLDENAU, D., 1972. Hurricane heat potential of the Gulf of Mexico. **Journal of Physical Oceanography**, 2, 218-224.

LIN, I.; WU, C.; EMANUEL, K. A.; WU, C.; PUN, I., 2005. The interaction of Superthyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy. **Monthly Weather Review**, 133, 2635-2649.

MAINELLI, M.; DEMARIA, M.; SHAY, L. K.; GONI, G., 2008. Application of oceanic heat content estimation to operational forecasting of recent Atlantic category 5 hurricanes. **Weather Forecasting**, 23, 3-19.

MARKS, F. D.; SAHY, L. K., 1998. Landfalling tropical cyclones: Forecast problems and associated research opportunities. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 79, 305-323.

MATANO, R. P., 1991. **A numerical study of the circulation in the South Atlantic Ocean**. Dissertação em Oceanografia Física, Universidade de Princetown, 117.

MATANO, R. P., 1993. On the separation of Brazil current from the coast. **Journal of Physical Oceanography**, 23, 1, 79-90.

MCTAGGART-COWAN, R.; BOSART, L. F.; DAVIS, C. A.; ATALLAH, E. H.; GYAKUM, J. R.; EMANUEL, K. A., 2006. Analyses of Hurricane Catarina. **Monthly Weather Review**, 134, 3029-3053.

MEYERS, P. C. **Development and Analysis of the Systematically Merged Atlantic Regional Temperature and Salinity (SMARTS) Climatology for Satellite-Derived Ocean Thermal Structure**. Open Access Teses. University of Miami. Coral Gables, Florida, 2011.

MEYERS, P. C.; SHAY, L. K.; BREWSTER, J.K., 2014. Development and Analysis of the Systematically Merged Atlantic Regional Temperature and Salinity (SMARTS) Climatology for Satellite-Derived Ocean Thermal Structure. **American Meteorological Society**, 31, 131-149.

OLSON, D. B.; PODESTÁ, G. P.; EVANS, R. H.; BROWN, O. B., 1988. Temporal Variations in the Separation of Brazil and Malvinas Currents. **Deep-sea Research**, 17, 445-454.

PALMÉN, E., 1948. On the formation and structure of tropical cyclones. **Geophysika**, 3, 26-38.

PEREIRA FILHO, A. J.; PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I; LIMA, R. S.; VIANNA, M. L., 2010. New perspectives on the synoptic and mesoscale structure of hurricane Catarina. **Atmospheric Research**, 95(2-3), 157-171, doi:10.1016/j.atmosres.2009.09.009.

PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I., 2005. The first South Atlantic Hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. **Geophysical Research Letters**, 32, L15712, doi: 10.1029/2005GL023390.

PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I., 2008. Large-scale factors in tropical and extratropical cyclone transition and extreme weather events. **Annals of New York Academy of Sciences**, 1146, 189-211, doi:10.1196/annals.1446.005.

PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I.; PREIRA FILHO, A., 2009. Climate perspective on the large scale circulation associated with the transition of the first South Atlantic hurricane. **International Journal of Climatology**, 29, 1116-1130, doi:10.1002/joe17.57.

PRICE, J. F., 1981. Upper Ocean Response to a hurricane. **Journal of Physical Oceanography**, 11,153-175.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S., 2004. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.22, n. 2, p. 135-151.

SANFORD, T. B.; BLACK, P. G.; HAUSTEIN, J. R.; FEENEY, J.W.; FORRISTAL, G. Z.; PRICE, J. F.,1987. Ocean response to a hurricane. Part I: Observations. . **Journal of Physical Oceanography**, 17, 2065-2083.

SCHARROO, R., SMITH, W. H. F.; LILLIBRIDGE, J. L., 2006. Reply to comment on "Satellite altimetry and the intensification of hurricane Katrina". **Eos, Transactions American Geophysical Union**, 87 (8), 89.

SCHARROO, R., SMITH, W. H.; LILLIBRIDGE, J. L., 2005. Satellite altimetry and the intensification of Hurricane Katrina. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, 86, 366-367, doi:10.1029/2005EO400004.

SHAY, L. K., 2009. Upper Ocean Structure: Response to strong forcing events. **Encyclopedia of Ocean Sciences**. Ed. 2, J. Steele *et al.*, Elsevier Press International, 4619-4637.

SHAY, L. K., e coautores, 2011. Airborne surveys of the loop current complex from NOAA WP-3D during the Deep Water Horizon oil spill. Monitoring and Modeling the Deep Water Horizon Oil Spill: A Record Breaking Enterprise. Geophysical Monograph Series, vol. 195, **American Geophysical Union**, 131-151.

SHAY, L. K.; BLACK, P. G.; MARIANO, A. J.; HAWKINS, J. D.; ELSEBERRY, R. L., 1992. Upper ocean response to Hurricane Gilbert. **Journal of Geophysical Research**, 97 (12), 20 227-20 248.

SHAY, L. K.; GONI, G. J.; BLACK, P. G., 2000. Effects of a warm oceanic feature on hurricane Opal. **Monthly Weather Review**, 128, 1366-1383.

SHAY, L. K.; UHLHORN, E., 2008. Loop Current response to hurricanes Isidore and Lili. **Monthly Weather Review**, 137, 3248-3274.

SILVA DIAS, P.; SILVA DIAS, M. A. F.; SELUCHI, M.; DINIZ, F. A., 2004. **Preliminary analysis of structure, dynamics and predictability**. Conferência Brasileira de Meteorologia, Sociedade Brasileira de Meteorologia, Fortaleza, Brasil. 29 de Agosto a 3 de Setembro.

SILVEIRA, I. C. A.; SCMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S.; IKEDA, Y., 2000. A Corrente do Brasil ao Largo da costa leste brasileira. *Revista brasileira de Oceanografia*, 48(2), 171-183.

STOMMEL, H., 1948. The westward intensification of Wind-driven ocean currents. **Transactions American Geophysical Union**, 29, 4, 202-206.

SUN, D.; GAUTAM, R.; CERVONE, G.; BOYEYI, Z.; KAPTOS, M., 2006. Comment on "Satellite altimetry and the intensification of Hurricane Katrina." **Eos, Transactions American Geophysical Union**, 87, 89, doi:10.1029/2006EO080006.

VEIGA, J. A. P.; PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I; SILVA DIAS, P., 2008. An analysis of the environmental energetics associated with the transition of the first South Atlantic hurricane. **Geophysical Research Letter**, 35, L15806, doi:10.1029/2008GL034511.

VIANNA, M. L.; MENEZES, V. V.; PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I, 2010. Interaction between Hurricane Catarina (2004) and warm core rings in the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, 115, 1-19, doi:10.1029/2009JC005974.