



Laboratório de Estudos do Oceano e da Atmosfera
OBT - INPE

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

LABORATÓRIO DE ESTUDOS DO OCEANO E DA ATMOSFERA

Interação oceano-atmosfera-gelo marinho no Setor Atlântico do Oceano Austral

PROJETO ANTARCTIC MODELING OBSERVATION SYSTEM (ATMOS)

Beneficiário:

MSc. Ueslei Adriano **Sutil**

Orientador:

Dr. Luciano Ponzi **Pezzi**

PROJETO DE PESQUISA APRESENTADO À FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO
ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP) COM VISTAS À OBTENÇÃO DE BOLSA DE
DOUTORADO

Maio 2020

Sumário

	RESUMO	1
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Projeto AnTarcctic Modeling Observation System (ATMOS)	3
2	MOTIVAÇÃO E HIPÓTESE	5
3	OBJETIVOS	6
3.1	Objetivo Geral	6
3.2	Objetivos Específicos	6
4	MATERIAIS E MÉTODOS	6
4.1	Área de Estudo	6
4.1.1	O Mar de Weddell	7
4.2	Modelos numéricos	8
4.2.1	Weather Research Forecast (WRF)	8
4.2.2	Regional Ocean Modeling System (ROMS)	9
4.2.3	Simulating Waves Nearshore (SWAN)	9
4.2.4	Budgell's Sea Ice Model	9
4.2.5	Model Coupling Toolkit (MCT)	10
4.2.6	Spherical Coordinate Remapping Interpolation Package (SCRIP)	10
4.2.7	Coupled Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport Modeling System (COAWST)	10
4.3	Dados	12
4.3.1	Dados <i>in situ</i> do LOA/INPE	12
4.3.2	Dispositivo de Baixo Custo para Coleta de Dados Atmosféricos (DBCCDA)	13
4.3.3	NOAA/NSDIC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration (CDR)	14
4.3.4	ERA5 Reanalysis Dataset	14
4.3.5	Simple Ocean Data Assimilation (SODA) v3.12.1	14
4.3.6	ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model (ETOPO1)	15
4.4	Preparação e Análise dos Dados	15
4.4.1	Realização das Simulações	15
4.4.2	Planejamento dos experimentos	15
4.4.3	Grades e aninhamento	17
4.4.4	Estimativas de Fluxo de Calor	17
5	RESULTADOS	18
5.1	Resultados Preliminares	18
5.1.1	Simulação preliminar	18
5.1.2	Dados preliminares do DBCCDA	19
5.2	Resultados Esperados	20
6	PLANO DE TRABALHO E CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO	21
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

Resumo. Em resposta à chamada CNPq/MCTIC/CAPES/FNDCT 21/2018, propomos junto ao projeto Antarctic Modeling Observation System, um projeto de Tese de Doutorado para investigar os processos de interação oceano-atmosfera-gelo marinho e as trocas de fluxos turbulentos nesta interface, em micro e mesoescalas, no Setor Atlântico do Oceano Austral. Por ser uma região onde são necessários mais esforços para investigar o comportamento dos campos atmosféricos e hidrodinâmicos, esperamos, através da execução deste projeto, implementar um sistema de modelagem numérica regional acoplada capaz de reproduzir com precisão e acurácia as trocas de calor, *momentum* e massa que ocorrem na interface oceano-atmosfera sob a influência da presença ou não do gelo marinho, além de investigar o impacto do gelo marinho na circulação oceânica e nos processos de formação de massas d'água no Mar de Weddell. O projeto abrirá novos horizontes para a pesquisa do Brasil na Antártica através da modelagem numérica regional acoplada, além de fornecer dados inéditos para propor mecanismos físicos que expliquem o papel do oceano e da atmosfera na restauração do estado de equilíbrio do gelo marinho.

1 INTRODUÇÃO

O Oceano Austral é um importante contribuidor para a manutenção do clima da Terra. Entretanto, diversos trabalhos apontam que o calor e o Carbono provenientes da atmosfera, bem como a ação antrópica, impactam de maneira direta neste ambiente. Estes impactos já são observados na região oeste da Península Antártica, com um aquecimento de até 3 °C no período entre 1955 e 2004 (Turner et al., 2005) e de cerca de 1 °C na porção oceânica (Meredith & King, 2015). Apesar destes dados alarmantes, o oceano Austral está entre os ambientes menos compreendidos e investigados pela comunidade científica. Logo, devido à grande necessidade e urgência para entender as grandes questões sobre o ambiente global da atualidade, são cada vez mais necessários os esforços para estudar essa região.

Desde o final da década de 80 a extensão do gelo marinho tem diminuído nos mares de Amundsen e Bellingshausen, sobretudo durante as estações mais quentes do ano. É observado o oposto no mar de Ross e Amundsen, que nas estações mais frias há um aumento da extensão do gelo marinho (Lee et al., 2017). Estudos como Parise et al. (2014), Cunningham & Bonatti (2011) e Raphael et al. (2011) investigam a interação gelo marinho-oceano-atmosfera e concluem que apesar da baixa troposfera ser aquecida pelos fluxos de calor provenientes do oceano, a variação do gelo marinho na região austral pode impactar médios e altos níveis da troposfera. Também foi estudado por Carpenedo et al. (2013) e Parise et al. (2014) que as variações do gelo marinho altera o gradiente de temperatura no eixo Equador-Polos, alterando assim o transporte meridional de calor no planeta e, como consequência, o clima local, regional e global. Portanto, determinar as alterações no campo de gelo marinho e as causas desta variabilidade é essencial para o melhor entendimento das variações climáticas.

Apesar desta importância, ainda são poucos os esforços para estudar o impacto do gelo marinho no clima da América do Sul. No Hemisfério Sul, os trabalhos de [Nakamura & Shimpo \(2004\)](#) e [Ummenhofer & England \(2007\)](#) focam nas regiões da Austrália e Nova Zelândia e o oceano Pacífico oeste. [Pook et al. \(2013\)](#) comentam que quando os jatos subtropical e polar atigem o máximo de separação, geramente no inverno, há a ocorrência de diversos casos de eventos extremos, ligados à bloqueios atmosféricos na Austrália e Nova Zelândia. Para a América do Sul, não há nenhum estudo que relacione a posição do jato e eventos extremos, nem mesmo sobre a variação do gelo marinho Antártico. Recentemente, [Rodrigues & Woolings \(2017\)](#) mostraram que as ondas de Rossby originadas no oceano Índico e Pacífico podem vir a causar bloqueios atmosféricos e eventos extremos na região. Além disso, os autores comentam que a trajetória dessas ondas possuem um forte sinal na região do mar de Amundsen, na Antártica, uma região com expressiva variação recente do gelo marinho.

Ao analisar a memória e sensibilidade do sistema climático acoplado do Hemisfério Sul ante a variação do gelo marinho, [Parise et al. \(2014\)](#) descobriram que a restauração do equilíbrio climático após uma perturbação no gelo marinho Antártico é desencadeada a partir de um mecanismo de dupla escala temporal, que age a partir do efeito de isolamento térmico do gelo marinho e o consequente pulso de água doce proveniente do derretimento do gelo e restaurado pelo calor armazenado nas camadas subsuperficiais do Oceano Austral à medida que a água doce e fria em superfície é advectada para latitudes mais baixas.

Entretanto, não se conhece ainda o papel dos distúrbios transientes na restauração do balanço térmico frente à perturbações climáticas em altas latitudes. Também não se conhece o impacto das variações na cobertura do gelo marinho Antártico nos ciclones extratropicais na América do Sul e Atlântico Sul.

Outra questão importante paira em torno do futuro da Corrente Circunpolar Antártica (CCA). Sabe-se que os vórtices oceânicos de mesoescala transferem *momentum* linear, de acordo com [Munk & Palmén \(1951\)](#), da superfície para o fundo do mar. Esse efeito é importante para transportar calor em direção ao polo e é necessário para equilibrar o calor perdido na atmosfera em altas latitudes, como estudado por [Johnson & Bryden \(1989\)](#). Logo, estudar o impacto que a variação do gelo marinho pode causar nos vórtices oceânicos é fundamental para entender um pouco mais sobre a CCA, uma vez que os vórtices oceânicos são diretamente conectados à circulação de revolvimento global uma vez que transportam massa em direção aos polos em associação ao fluxo instável da CCA ([Rintoul, 2019](#)). A CCA possui grande influência na plataforma oeste da Península Antártica. Ela flui ao longo da quebra de plataforma e é uma grande transportadora de calor e nutrientes através de interações com glaciares, plataformas de gelos e com uma intensa variabilidade interanual da formação e interação do gelo marinho com a atmosfera ([Moffat & Meredith, 2018](#)).

No Mar de Weddell, no Setor Atlântico do Oceano Austral, está uma importante região de gelo marinho, além de ser uma fonte de massas de águas frias e densas, representando uma zona de ventilação dos oceanos e para a circulação termohalina. Estudos observacionais sobre a interação do gelo marinho com a atmosfera mostram que há uma forte retroalimentação entre estes dois meios, particularmente nas escalas de tempo mais rápidas, entretanto, o mecanismo que rege tais processos ainda não está claro. Em outras palavras, o gelo marinho no Oceano Austral é importante pois modifica o balanço de radiação, energia e os processos de troca de massa. A presença do gelo marinho reduz a Temperatura da Superfície

do Mar (TSM), redireciona as correntes de superfície e altera a taxa de subsidência das águas de superfície nas latitudes. Como as anomalias de gelo marinho tendem a persistir por vários meses, elas podem ter o potencial de afetar fortemente a circulação atmosférica e oceânica (Simmonds et al., 2003).

Entre os desafios da ciência nessa região, até o presente momento a comunidade científica não conseguiu prever as respostas da cobertura do gelo Antártico frente às tendências climáticas devido à escassez de dados e ausência de parametrizações dos processos físicos que estão envolvidos nesse sistema acoplado (Turner et al., 2005). Logo, considerando as rápidas mudanças no ambiente Antártico, que podem ter impactos locais, regionais e globais, percebe-se a urgência em em lançar mão em esforços para entender o complexo acoplamento dos mecanismos que ditam a morfologia das massas de gelo da Antártica (Mayewski et al., 2009). Também é notado que não considerar a interação oceano-onda-gelo em estudos de modelagem terrestre é um dos motivos pelo qual os modelos climáticos não são capazes de prever a perda de gelo no continente Antártico nas últimas décadas. Kohout et al. (2014) comentam que a ausência do processo de interação oceano-onda-gelo em estudos regionais e globais é vista como uma das razões pelas quais os modelos climáticos não foram capazes de prever a perda significativa de massa de gelo na Antártica observada nas últimas décadas.

Outro importante desafio da ciência antártica está dificuldade na coleta de dados *in situ* (Babanin et al., 2019). Visto que as regiões polares são famosas por seu clima e tempo severos, a tendência para melhorar a compreensão em estudos de interação oceano-atmosfera-gelo marinho, bem como a habilidade em modelar estas condições, é incentivar projetos que desenvolvam meios para obter dados de forma mais simples e barata. Recentemente, diversos estudos objetivam o desenvolvimento em eletrônicos e softwares livres e de código aberto, que criam novas oportunidades para este campo, como os trabalhos de Rabault et al. (2017) e Rabault et al. (2020).

1.1 Projeto AnTarcctic Modeling Observation System (ATMOS)

O Laboratório de Estudos do Oceano e da Atmosfera (LOA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais possui uma vasta, e antiga, cooperação com o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR). O PROANTAR foi criado em 1982 como uma resposta à entrada do Brasil no Tratado da Antártica, em 1975. É um programa do governo brasileiro e, a partir da Comissão Interministerial para Recursos do Mar (CIRM), coordena a pesquisa e o apoio operacional para a pesquisa na região. Atualmente o LOA/INPE conta com participação em mais de 13 Operações Antárticas (Figura 1), através da coleta de dados meteorológicos e oceanográficos, que são de grande relevância na região de interesse deste projeto, e tem tido repercussão nacional e internacional. O grupo possui caráter multi e interdisciplinar e é composto por pesquisadores do INPE e trabalha em cooperação com diversas instituições brasileiras e estrangeiras, onde vários programas de pós-graduação estão diretamente envolvidos com as pesquisas do grupo. Também é importante ressaltar este projeto usará um cluster, com 81 nós e 2592 processadores, que o LOA/INPE possui nas dependências do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). Esse cluster fornece uma poderosa capacidade de processamento de simulações numéricas em alta resolução e é uma ferramenta poderosa para estudos em ciência Antártica.

O Projeto ATMOS é uma iniciativa do Laboratório de Estudos do oceano e da Atmosfera do Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais (LOA/INPE) e surgiu como uma resposta à chamada CNPQ/MCTIC/-CAPES/FNDCT 21/2018. Foi aprovado em Novembro de 2019, inserido na Linha Temática "Mudanças Climáticas e o Oceano Austral". O projeto está estruturado sob a observação *in situ* e modelagem numérica regional acoplada para estudar os processos de Interação oceano-Ondas-Atmosfera-Gelo Marinho determinantes no padrão de fluxos de calor e *momentum* nessas interfaces no setor do Oceano Austral. O Projeto é desenvolvido dentro do Programa Antártico do INPE (PAN), um programa do INPE/MCTIC, e possui com parcerias em diversas instituições nacionais e internacionais, em particular com universidades da Inglaterra, Estados Unidos e Austrália.

O Projeto ATMOS propõe atingir diversos objetivos, como por exemplo:

- Formar uma equipe multidisciplinar para estudar, compreender e ampliar o conhecimento científico sobre os complexos processos de interação entre os subsistemas atmosfera, oceano e criosfera no Setor Atlântico do Oceano Austral e continentes adjacentes;
- Trabalhar na Ilha do Rei George, onde está localizada a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), visando continuar os esforços do Laboratório de Estudos do oceano e da Atmosfera em estudar esta região através de projetos prévios como o Projeto Interação oceano-Atmosfera na Região da Confluência Brasil-Malvinas (INTERCONF);
- Abrir novas frentes de parcerias com universidades e institutos de pesquisa nacionais e internacionais e fomentar a formação de jovens pesquisadores Antárticos brasileiros;
- Fomentar a inovação em projetos voltados para a aquisição de dados na Antártica a partir de dispositivos de baixo custo com de código aberto e software livre.

A experiência adquirida na formação e condução de programas e projetos de pesquisa do Laboratório de Estudos do oceano e da Atmosfera (LOA), criado no âmbito da Coordenadoria de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), embasa e motiva a apresentação do projeto ATMOS e desta proposta de tese de doutorado. O LOA, através do trabalho e participação científica do Coordenador, o Dr. Luciano Pezzi, contribui através de estudos multidisciplinares de longo prazo para o entendimento da relação entre o ambiente físico e aspectos biogeoquímicos nos oceanos Atlântico Sul e Austral, há pelos menos 15 anos como mostrado na Figura 1 e também em vários trabalhos científicos publicados em revistas internacionais e nacionais. As atividades científicas desenvolvidas pelo LOA estão inseridas em inúmeros programas nacionais e internacionais, demonstrando assim total compatibilidade com as metas de longo prazo da comunidade científica mundial.

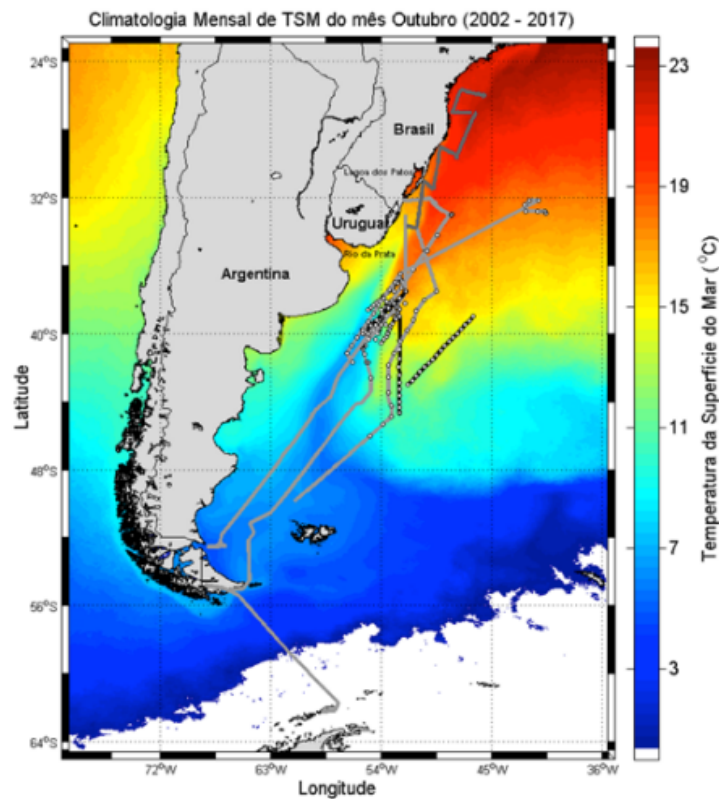


Figura 1: TSM climatológica do mês de outubro do satélite Aqua-MODIS entre os anos de 2002 e 2017. As linhas representam as trajetórias dos cruzeiros realizados pelo LOA-INPE entre os anos de 2004 e 2016. As linhas pretas indicam as trajetórias de Operações Antárticas somente com amostragens de perfis verticais de temperatura do mar e da atmosfera, com as posições indicadas pelos círculos brancos. As linhas cinza, indicam trajetórias de cruzeiros com medidas dos fluxos turbulentos.

2 MOTIVAÇÃO E HIPÓTESE

A partir do exposto acima, propomos lançar mão em esforços que respondam como funciona o acoplamento dos mecanismos de interação entre o gelo marinho-oceano-atmosfera no setor Austral do Oceano Atlântico, pois esta região pode sofrer alterações no balanço de trocas calor e *momentum* a partir da quantidade de gelo marinho presente na região. Logo:

O gelo marinho, na região do Mar de Weddell, constitui em uma importante feição para alterar as trocas de calor e momentum entre o oceano e a atmosfera. Portanto, se houver cobertura de gelo marinho sobre o oceano, então os fluxos de calor latente e momentum na interface oceano-atmosfera serão menores que os valores encontrados quando não há essa feição.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Investigar os processos de interação no sistema oceano-gelo marinho-atmosfera, para compreender o efeito da variação temporal e espacial e o papel do gelo marinho no balanço de calor e momentum no setor Atlântico do Oceano Austral.

3.2 Objetivos Específicos

Especificamente, pretendemos atingir os seguintes objetivos específicos:

- Configurar e implementar um domínio de grade numérica regional em altíssima resolução para o sistema de modelagem regional acoplada COAWST, com os modelos atmosférico, hidrodinâmico, de gelo marinho e o de ondas ativados;
- Configurar um dispositivo de baixo custo, baseado em Arduino, para a coleta de dados atmosféricos na Antártica e assimilar, nas simulações, os dados coletados *in situ*;
- Realizar testes de sensibilidade e verificar o desempenho e reprodutibilidade dos modelos, comparando com os dados coletados durante as Operações Antárticas e de Sensoriamento Remoto;
- Observar o comportamento dos fluxos de calor e *momentum* na presença e ausência de cobertura de gelo marinho, assim como o impacto dessa feição na circulação oceânica;
- Estimar o efeito do gelo marinho na circulação oceânica do Mar de Weddell e a sua contribuição na estratificação e formação das massas de água na região.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será apresentada a área de estudo, bem como os modelos numéricos e os dados que serão utilizados para realizar as simulações.

4.1 Área de Estudo

A Antártica é um continente com aproximadamente 14 milhões de quilômetros quadrados, marca que a coloca como o quinto maior continente planeta (NSF, 2019). Ela também abriga 90% do gelo e 70% da reserva total de água doce da Terra (NSF, 2019). Este continente é circundado pelo Oceano Austral, que abriga a corrente mais importante corrente oceânica deste oceano, a CCP (Figura 2), que flui de oeste para leste e possui transporte médio entre 100-150 Sverdrups e temperatura média variando entre -1 a 5 °C, dependendo da época do ano e localização e os valores típicos de salinidade variam entre 33.5 e 34.7 em direção à 65 °S. Esta assinatura de temperatura e salinidade é devida a combinação de massas de água que se encontram no Oceano Austral e são misturadas e redistribuídas pela CCP (Pickard & Emery, 1990).

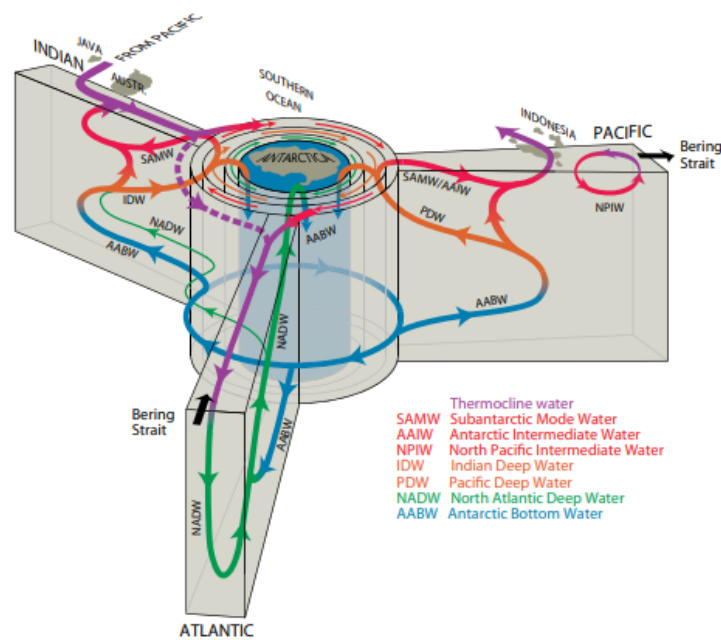


Figura 2: Representação esquemática da Célula de Revolvimento Global proposta por Talley (2013). Observa-se a formação da AABW na região do Mar de Weddell.

O Oceano Austral é essencial para investigações sobre o estudo climático do planeta, pois é o principal meio onde ocorrem as trocas de calor, energia e massa entre as três principais bacias oceânicas do planeta. Além disso, a variabilidade sazonal e interanual da cobertura do gelo marinho ocasionam um significativo impacto nos processos de formação de massas de água, em particular no mar de Weddell, onde é formada a Água de Fundo antártica (AABW; Santini et al., 2018; Talley, 2013). A AABW (Figura 2) é formada, de acordo com Talley, 2013, a partir da geração de massas de água profundas e com alta salinidade em altas latitudes do Atlântico Norte (NADW) e que são transportadas em direção ao hemisfério sul pela Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC) e que ganha calor durante sua trajetória e ascende à superfície no Oceano Austral. Santini et al. (2018), Haid & Timmermann (2013) e Tamura et al. (2011) comentam que a formação da AABW também está associada à formação do gelo marinho e seu derretimento sazonal, que influenciam a estabilidade do oceano superior devido à mudança da salinidade associada ao efeito Brine¹.

4.1.1 O Mar de Weddell

A porção ao leste da Península Antártica possui como mais importante feição o Giro de Weddell (GW). Conforme observado na Figura 3, ele é um giro ciclônico (move-se no sentido oeste no ramo sul e para leste no ramo norte) que encontra na ação dos ventos a sua maior força motriz. De acordo com Gordon et al. (2001), essa região possui um grande transporte ascendente de água de subsuperfície no interior do giro, devido a um forte bombeamento de Ekman ocasionado pela natureza divergente do giro. A região também é formadora da Água Circumpolar Profunda (CDW), formada nas partes sudeste do

¹Liberação do sal para o meio líquido durante a formação do gelo marinho.

GW, em regiões próximas à Península Antártica e a água em superfície é trocada a pela proximidade com a CCA (Vernet et al., 2019). A CDW possui temperatura máxima logo abaixo da pincloclina, de acordo com Kerr et al. (2018), e os maiores valores de temperatura são encontrados na região sudeste do GW, indicando essa região como um importante local recipiente de água da CCA.

A produção de água mais densa deve ocorrer, preferencialmente, na Plataforma Continental na porção sudoeste do Mar de Weddell, onde a água é resfriada para o ponto de congelamento devido ao contato com a atmosfera, e aumenta a salinidade, a partir da expulsão do sal durante o congelamento a partir do efeito Brine (Vernet et al., 2019). A partir desse processo, a água segue para a margem da Plataforma Continental e flui em direção ao assoalho oceânico até ser desviada à esquerda, pelo efeito de Coriolis, e é incorporada ao GW.

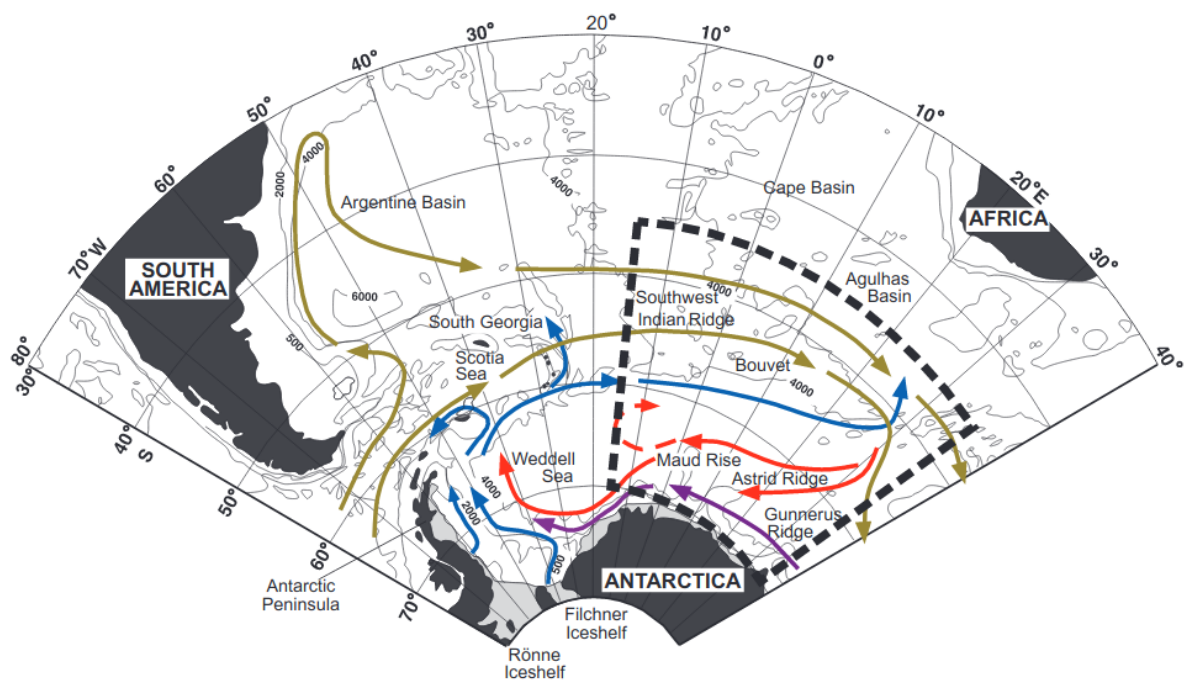


Figura 3: Representação esquemática da circulação profunda da CDW (linhas vermelhas). A Corrente costeira Antártica está representada pelas linhas de cor roxa, e a formação e circulação da CDW originada no lado leste da Plataforma Antártica, está representada pelas linhas azuis.

4.2 Modelos numéricos

Nesta subseção serão descritos os modelos numéricos que serão utilizados para a execução deste projeto.

4.2.1 Weather Research Forecast (WRF)

O WRF (Skamarock et al., 2008) é um modelo atmosférico desenvolvido pelos National Centers for Environmental Prediction (NCEP), National Center for Atmospheric Research (NCAR) e grupos de

pesquisa de diferentes universidades. Para integrar no tempo as equações governantes, o módulo Advanced Research WRF (ARW) utiliza modos de baixa frequência que são integrados utilizando o esquema de Runge-Kutta de terceira ordem, e os modos acústicos e de ondas de gravidade (alta frequência) integrados com menor passo de tempo. Dessa maneira, se mantém a estabilidade numérica, através de um esquema *forward-backward* para os modos acústicos que se propagam horizontalmente, e de um esquema implícito para modos acústicos de propagação vertical e oscilações de empuxo (Skamarock et al., 2008). O modelo WRF utiliza uma grade do tipo Arakawa-C (Arakawa & Lamb, 1977), onde as velocidades normais são escalonadas a meio comprimento da grade das variáveis termodinâmicas.

4.2.2 Regional Ocean Modeling System (ROMS)

O ROMS (Shchepetkin & McWilliams, 2005) é um modelo oceânico tridimensional de superfície livre, coordenada vertical sigma (seguidora do terreno) e que resolve equações primitivas. Este modelo utiliza a média de Reynolds e o método de diferenças finitas para resolver as equações de Navier-Stokes, assumindo aproximações hidrostáticas e de Boussinesq (Haidvogel et al., 2008). As equações hidrostáticas de *momentum* utilizam um esquema de passo de tempo *split-explicit*, onde os modos barotrópico e baroclínico são resolvidos separadamente e em distintos números finitos de passos de tempo para resolver as equações de superfície livre e *momentum* integrado na vertical. Esta estrutura separada de passos de tempo separados mantém a conservação de volume e a preservação de consistência que são necessárias para as equações de traçadores (Haidvogel et al., 2008; Shchepetkin & McWilliams, 2005). A partir da grade, o modelo resolve as equações na horizontal através de coordenadas curvilíneas ortogonais do tipo Arakawa-C (Arakawa & Lamb, 1977). Na vertical, as coordenadas seguem as feições do terreno e permitem ajustar a resolução ao longo da coluna d'água. Para garantir a conservação de *momentum*, a grade utiliza diferenças finitas de segunda ordem (Haidvogel et al., 2008).

4.2.3 Simulating Waves Nearshore (SWAN)

O SWAN (Booij et al., 1996; Booij et al., 1999) é um modelo de terceira geração, concebido para uso em regiões costeiras com águas rasas e correntes locais. O modelo é amplamente utilizado na previsão numérica do espectro de ondas em regiões costeiras, estuários, canais e outros, podendo utilizar campos de vento, batimetria e correntes fornecidos por outros modelos (Booij et al., 1996; Booij et al., 1999).

Silva (2013), Booij et al. (1996) e Booij et al. (1999) elencam as principais características do SWAN:

- Refração de onda com profundidade variável;
- Empinamento induzido pela profundidade e corrente;
- Geração e propagação de ondas pelo vento;
- Dissipação por *whitecapping*;

4.2.4 Budgell's Sea Ice Model

O Modelo de Gelo Marinho, proposto por Budgell (2005) está integrado ao modelo oceânico ROMS e compartilha os mesmos passos de tempo e grade do modelo, além da mesma estrutura de codificação

paralela para uso com Message Passing Import (MPI). Dessa maneira, permite a modelagem dinâmica e termodinâmica onde houver o predomínio de gelo marinho, como por exemplo em altas latitudes. Os principais atributos do modelo, de acordo com [Hedström \(2018\)](#), são:

- Dinâmica elástica-viscosa de [Hunke & Dukowicz \(1997\)](#) e [Hunke \(2001\)](#);
- Termodinâmica proposta por [Mellor & Kanta \(1989\)](#);
- Coordenadas curvilíneas-ortogonais;
- Grade Arakawa-C proposto por [Arakawa & Lamb \(1977\)](#);
- Advecção de traçadores proposta por [Smolarkiewicz & Grabowski \(1990\)](#);
- Parametrização de gelo proposta por [Lemieux et al. \(2015\)](#).

4.2.5 Model Coupling Toolkit (MCT)

O MCT ([Jacob et al., 2005](#); [Larson et al., 2005](#); [Warner et al., 2008](#)) é um conjunto de rotinas livres, escritas em Fortran 90 que permitem a transmissão e transformação dos diferentes dados necessários ao acoplamento de modelos. Durante a inicialização, os domínios dos modelos são decompostos em segmentos que são distribuídos entre os processadores, permitindo que os modelos sejam acoplados também de forma paralela.

- Um registro das componentes dos modelos;
- Descritores de decomposição do domínio;
- Ferramentas paralelizadas para interpolação entre grades;
- Ferramentas para mesclar dados de entre vários componentes;
- Um modelo de programação semelhante ao MPI (Message Passing Interface).

4.2.6 Spherical Coordinate Remapping Interpolation Package (SCRIP)

O SCRIP ([Jones, 1998](#); [Jones, 1999](#)) é um pacote necessário para projetos que utilizam mais de um modelo numérico e que possuem grades horizontais diferentes, ou seja com diferentes resoluções espaciais. O SCRIP gerará os pesos de interpolação que serão usados para remapear os dados entre as distintas grades dos diferentes modelos, para que haja o acoplamento e troca de informação entre os modelos numéricos.

4.2.7 Coupled Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport Modeling System (COAWST)

O COAWST é um sistema *open-source* de modelagem numérica regional acoplada composto pelos módulos atmosférico, oceânico, ondas e de sedimentos oceânicos. O modelo atmosférico é o WRF, o modelo oceânico é o ROMS, o modelo de ondas são o SWAN ou o WaveWatch 3 e o modelo de transporte de sedimentos é o Community Sediment Transport Modeling Project (CSTM; [Warner et al., 2008](#)).

O COAWST, é um sistema baseado no conceito de “modelo de comunidade”, ou seja, é desenvolvido por um grupo de pesquisadores de várias instituições internacionais, como mostrado no trabalho de [Warner et al. \(2010\)](#). Esse sistema, permitiu os avanços na representação da dinâmica costeira, devido ao acoplamento do modelo de ondas ao de circulação oceânica e atmosférica ([Warner et al., 2008](#)). Um aspecto do COAWST que deve ser ressaltado, é que ele permite um acoplamento dinâmico entre o oceano e a atmosfera aonde os fluxos são trocados ativamente nas duas direções, da atmosfera para o oceano e vice-versa. Esses modelos tridimensionais têm sido desenvolvidos e aplicados a cenários idealizados para se entender alguns processos de maneira isolada e em cenários realistas, como simular as interações entre um ciclone tropical e o oceano (Bender e Ginis, 2000; Bender et al, 2007; Chen et al, 2007).

O COAWST, através do MCT ([Jacob et al., 2005](#)), permite a troca de informações entre os modelos com uma frequência ajustável definida pelo usuário. Para o presente projeto de tese de doutorado, escolheremos o modelo de ondas SWAN como modelo de ondas e ativaremos todos os outros modelos, com exceção do CSTM. A utilização do COAWST, como sistema de modelagem numérica, possibilitará a simulação mais acurada e precisa dos processos de interação oceano-atmosfera-gelo marinho, permitindo identificar a evolução da dinâmica e termodinâmica da região de estudo.

Conforme a [Figura 4](#), as informações trocadas entre modelos são:

- WRF para o ROMS: cisalhamento de superfície e fluxo de calor líquido (calculado no ROMS a partir das componentes dos fluxos de calor latente e sensível e radiação de ondas curta e longa, a pressão atmosférica, umidade relativa, temperatura do ar, nuvens, precipitação e as componentes do vento;
- ROMS para o WRF: temperatura da superfície do mar;
- SWAN para o ROMS: direção da onda em superfície e no fundo, altura, comprimento, período, dissipação de energia e velocidade orbital inferior;
- ROMS para o SWAN: batimetria, elevação da superfície, altura da superfície do mar e correntes médias em profundidade;
- SWAN para o WRF: rugosidade da superfície do mar (calculado no WRF a partir da altura significativa da onda, comprimento e período);
- WRF para o SWAN: vento em 10m de altura.

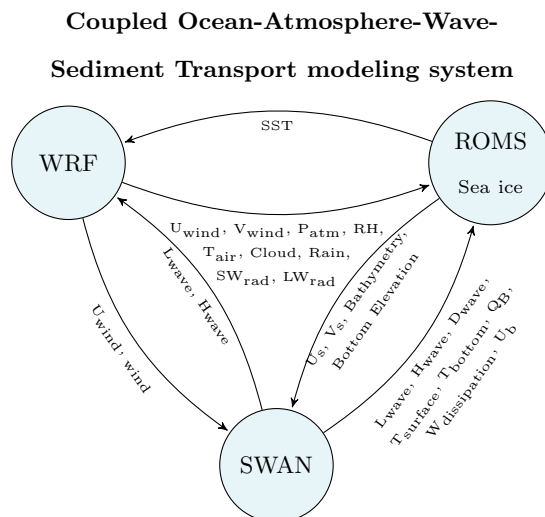


Figura 4: Esquema da troca de informações entre três modelos que compõe o sistema COAWST (Adaptado de Warner et al. (2008); fonte: Sutil & Pezzi (2019)).

Existem diversos estudos publicados que utilizam o COAWST. Warner et al. (2008) mostraram a estrutura do COAWST e sua aplicação na simulação do furacão Isabel, ocorrido em setembro de 2003. Para isso foi realizada uma sequência de simulações, alterando-se as componentes do sistema de modelagem e o modo de acoplamento entre os módulos atmosfera-oceano-ondas e foi mostrado que a simulação do fenômeno foi mais acurada e precisa ao utilizar o acoplamento entre modelos. Recentemente Pullen et al., 2018, apresentaram uma interessante revisão sobre estruturas de modelagem acoplada, onde foram simulados alguns estudos de caso de interação oceano-atmosfera para investigar o o acoplamento entre ciclones tropicais e o oceano, como o primeiro furacão híbrido ocorrido no oceano Atlântico, o Catarina (McTaggart-Cowan et al., 2006).

4.3 Dados

Nessa subseção serão apresentados os dados que serão utilizados para alimentar o sistema de modelagem numérica para realização das simulações.

4.3.1 Dados in situ do LOA/INPE

O LOA/INPE possui um extenso banco de dados *in situ*, com mais de 13 anos de coletas (Figura 1) no Oceano Austral e Atlântico utilizando CTS, XBTs, bóias oceanográficas, flutuadores, radiossondagens da atmosfera e de fluxos turbulentos que poderão ser utilizados como comparação com as simulações realizadas pelos modelos.

Para este projeto de tese de doutorado, utilizaremos os dados meteoceanográficos coletados entre Outubro e Novembro de 2018, durante a Operação Antártica 37 e entre Outubro e Dezembro de 2019, durante a Operação Antártica 38, para verificar o desempenho dos modelos em simular as condições atmosféricas e oceânicas da região de estudo.

4.3.2 Dispositivo de Baixo Custo para Coleta de Dados Atmosféricos (DBCCDA)

A fim de incentivar o fomento à inovação na pesquisa Antártica e lançar mão nos esforços para coleta de dados em uma região com condições severas de tempo e clima, pretendemos construir um Dispositivo de Baixo Custo para Coleta de Dados Atmosféricos (DBCCDA), baseado em Arduino e com software livre e de código aberto. Os dados deste dispositivo serão acrescentados ao banco de dados criado pelo LOA/INPE e serão usados na assimilação de dados dos modelos numéricos.

Para o desenvolvimento do DBCCAA, utilizamos uma placa de desenvolvimento DOI ESP32 ESP-WROOM-32, produzida pela Doctors of Intelligence Technology (DOIT). Baseado no CHIP ESP32-D0WDQ6, feito pela empresa Espressif, a placa possui funções que incorpora a utilização de WiFi, Bluetooth e o microprocessador, que a qualifica para atender uma grande variedade de projetos. O ESP32 possui um microprocessador Xtensa 32-Bits LX6 de baixo consumo de energia, com dois núcleos de CPU (processador dual core) que podem ser controlados individualmente com frequência de clock ajustável de 80MHz à 240MHz. Outra vantagem é a possibilidade de desligar a CPU e utilizar o coprocessador de baixa potência para monitorar, com baixo consumo de energia, periféricos como sensores e interfaces I2C.

Para a coleta de dados de Temperatura do Ar e Umidade Relativa, escolhemos o sensor DHT/AM3202, que utiliza um sensor de umidade capacitativo e um termistor para medir o ar circundante e converte o dado obtido através da emissão de um sinal digital, sem a necessidade de conversores analógicos. Com baixo custo, o sensor permite obter leitura de dados a cada 2 segundos (0,5 Hz). A faixa de medição do sensor de umidade é de 0 a 100%, com precisão de 2-5% e a faixa de medição de temperatura é de -40 a 80 °C, com 0.5 °C de precisão.

Para os dados de Pressão Atmosférica, utilizamos o sensor BME280 desenvolvido pela Bosch. Ele é um sensor que mede de 0 a 100% com precisão de 3% a umidade relativa, pressão barométrica de 300Pa a 1100 hPa com precisão absoluta de 1 hPa e temperatura de -40 °C a 85°C com precisão de 1°C.

Atualmente o dispositivo encontra-se em fase de desenvolvimento, com um teste realizado durante a Operação Antártica 38, em Fevereiro de 2020, conforme apresentado na [Figura 5](#). No futuro, pretendemos acoplar um sensor de magnitude de vento junto ao dispositivo.



Figura 5: Beneficiário do projeto testando o DBCCDA na Baía do Almirantando durante a Operação Antártica 39, em Fevereiro de 2020.

4.3.3 NOAA/NSDIC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration (CDR)

Com uma resolução espacial de 25 x 25 km, o CDR ([Peng et al., 2018](#)) fornece os registros de concentração de gelo marinho obtidos a partir de sensores passivos de micro-ondas instalados em satélites. O banco de dados fornece uma série temporal consistente, diária e mensal de concentrações de gelo do mar, de 09 de julho de 1987 até o processamento mais recente nas duas regiões polares do planeta. Estes dados, assim como os dados obtidos pelo LOA/INPE serão utilizados como fonte de comparação com as simulações realizadas pelo COAWST.

4.3.4 ERA5 Reanalysis Dataset

ERA5 ([ERA5 Reanalysis 2017](#)) é uma reanálise produzida pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Ele cobre o período de Janeiro de 1950 até a atualidade e é distribuído com 37 níveis de pressão, da superfície até 0.01 hPa. A resolução espacial é de 31 km e a resolução espacial é horária e mensal. Os dados do ERA5 serão utilizados para alimentar as forçantes do modelo atmosférico WRF.

4.3.5 Simple Ocean Data Assimilation (SODA) v3.12.1

O SODA v3.12.1 ([Carton et al., 2009](#)) é um conjunto de reanálise que utiliza um modelo de circulação geral dos oceanos com resolução horizontal de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ e 40 níveis verticais seguidoras do terreno e a resolução temporal é de 5 ou 10 dias ou mensal, disponível entre 1980 e 2015. O SODA possui variáveis

bidimensionais da altura do nível do mar, componentes zonal e meridional da velocidade integrada na vertical e variáveis tridimensionais de temperatura, salinidade, componente zonal e meridional da velocidade e variáveis de gelo marinho. Os dados do SODA serão utilizados para alimentar as forçantes do modelo hidrodinâmico ROMS.

4.3.6 ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model (ETOPO1)

O ETOPO1 ([Amante & Eakins, 2009](#)) é produzido pelo National Geophysical Data Center e fornece duas camadas de informações de relevo. As camadas incluem batimetria sobre os oceanos e alguns dos principais lagos da Terra. A topografia terrestre e a batimetria oceânica baseiam-se na topografia SRTM30e através de vários cruzeiros batimétricos. Os dados do ETOPO1 serão utilizados para alimentar a grade batimétrica utilizada pelo modelo hidrodinâmico ROMS.

4.4 Preparação e Análise dos Dados

Nessa seção serão descritos como os dados serão preparados para realizar as simulações bem como a análise dos dados obtidos.

4.4.1 Realização das Simulações

Nessa seção serão descritas como serão realizadas as simulações, com suas respectivas avaliações e análises.

4.4.2 Planejamento dos experimentos

A fim de representar as principais características meteoceanográficas da área de estudo, propomos a realização os seguintes experimentos:

- **CTRL:** Experimento controle realizado com a assimilação de dados *in situ*;
- **CTRL_NO_INSITU:** Experimento controle sem a assimilação de dados;

Após a realização dos três experimentos, os dados simulados serão avaliados utilizando dados *in situ* provenientes das coletas do projeto ATMOS. Os dados atmosféricos para pressão, umidade relativa, direção e velocidade do vento e temperatura do ar serão comparados com os dados das radiossondagens, os dados oceânicos para temperatura serão comparados com dados de XBT, CTD e a bóia oceanográfica, e, por fim, os dados de gelo marinho serão comparado com dados do CDR. As avaliações serão conduzidas com a produção de diagramas de Taylor ([Taylor, 2001](#)). Esse diagrama é eficiente em identificar a Raiz Quadrada do Erro-Médio (RMSE), o desvio padrão do experimento e o coeficiente de correlação. Também serão gerados mapas horizontais do RMSE, viés e Erro Médio Absoluto.

As equações do RMSE (1) e do Viés (2) são mostradas abaixo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (X_{sim,i} - X_{obs,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$Vies = \sum_i^n (X_{sim} - X_{obs}) \quad (2)$$

Onde:

X_{sim} é a variável simulada e X_{obs} é a variável observada e n é o número amostral.

Pretende-se, com essa metodologia, ser capaz de avaliar se a assimilação de dados apresentou um incremento significativo na capacidade de simular a região de estudo ante ao experimento sem a assimilação.

Após a verificação da performance de cada simulação (CTRL e CTRL_NO_INSITU), será utilizada a simulação que melhor representou a região de estudo para ser analisada com os próximos experimentos que modificarão a quantidade de gelo marinho presente no Mar de Weddell. Os experimentos são:

- **ICE_NORMAL**: Simulação com a presença de gelo marinho;
- **ICE_MINUS_100**: Simulação sem o de gelo marinho presente na simulação ICE_NORMAL;;
- **ICE_MINUS_80**: Simulação com 80% menos de gelo marinho presente na simulação ICE_NORMAL;
- **ICE_MINUS_60**: Simulação com 60% menos de gelo marinho presente na simulação ICE_NORMAL;
- **ICE_MINUS_40**: Simulação com 40% menos de gelo marinho presente na simulação ICE_NORMAL;
- **ICE_MINUS_20**: Simulação com 20% menos de gelo marinho presente na simulação ICE_NORMAL;
- **ICE_SUM_100**: Simulação com 100% menos de gelo marinho presente na simulação ICE_NORMAL;
- **ICE_SUM_80**: Simulação com 80% menos de gelo marinho presente na simulação ICE_NORMAL;
- **ICE_SUM_60**: Simulação com 60% menos de gelo marinho presente na simulação ICE_NORMAL;
- **ICE_SUM_40**: Simulação com 40% menos de gelo marinho presente na simulação ICE_NORMAL;
- **ICE_SUM_20**: Simulação com 20% menos de gelo marinho presente na simulação ICE_NORMAL;

Para avaliar a simulação ICE_NORMAL, será aplicada a mesma metodologia utilizada na definição da simulação controle.

4.4.3 Grades e aninhamento

Para o modelo atmosférico, será utilizado um domínio de alta resolução no Oceano Austral para aninhar outros dois subdomínios menores e de maior resolução espacial (divididos por um fator de 3), conforme a (Figura 6). Para os modelos oceânico, de ondas e de gelo marinho, propomos apenas um domínio para cada modelo, semelhantes ao domínio d01 do modelo atmosférico.

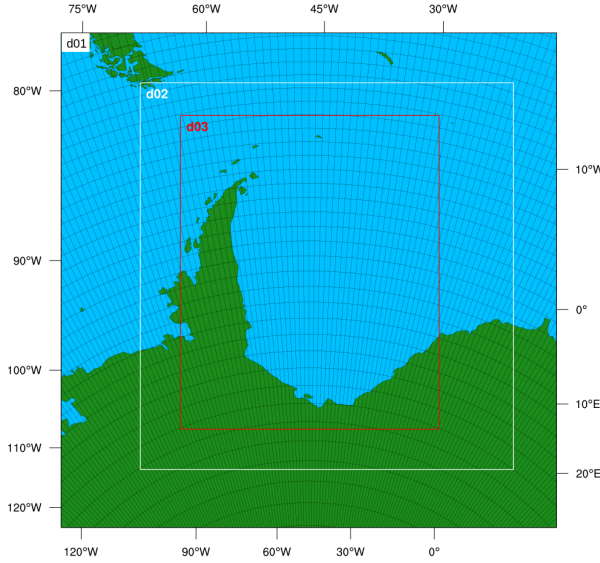


Figura 6: Representação esquemática dos domínios propostos (d01, d02 e d03) para as simulações no modelo atmosférico.

Quanto à resolução espacial, propomos utilizar na primeira grade (d01) no modelo atmosférico, 30 km x 30 km, na segunda grade (d02), 10 km x 10 km e na terceira grade (d03), 3.33 km x 3.33 km. As grades dos modelos hidrodinâmico, de ondas e de gelo marinho terão 8 km x 8 km de resolução espacial.

4.4.4 Estimativas de Fluxo de Calor

Propomos estimar os Fluxos de Calor Latente (Q_L) e Sensível (Q_S) descritos em [Pezzi et al. \(2009\)](#) e [Fairall et al. \(1996\)](#) e apresentados abaixo:

$$Q_S = \rho c_p C_h U (\theta_{air} - SST) \quad (3)$$

$$Q_L = \rho L_e C_e U (q_s - q_{air}) \quad (4)$$

Onde C_h e C_e são os coeficientes de transferência de calor e umidade que dependem dados estabilidade atmosférica e são gerados por relações de similaridade. θ_{air} é a temperatura potencial, q_s é a umidade específica ao nível do mar e q_{air} é a umidade específica em z_r . U é a velocidade média dos ventos em

superfície relativos à superfície do mar. Propomos estudar também o Fluxo Total de Calor (Q_T), dado por:

$$Q_T = Q_L + Q_S \quad (5)$$

Esses cálculos são realizados com base em parametrizações aerodinâmicas (*bulk*) do esquema proposto por Fairall et al. (2003). Vihma et al. (2002) estudou o balanço de calor no Mar de Weddell, comparando dados coletados por boias ancoradas e saídas de modelo. Com a possibilidade de medir diretamente os fluxos de calor sensível e latente a partir dos sensores instalados em uma torre micrometeorológica, que já está sendo largamente utilizada pelo projeto ATMOS e nas campanhas anteriores do LOA/INPE, o próprio método de parametrização pode ser melhor avaliado para a região desse estudo, além de servir de base para avaliação dos dados simulados. Santini et al. (2018) e Butterworth & Miller (2016) mostraram que o fluxo de calor latente em médias e altas latitudes podem apresentar divergências em suas magnitudes de acordo com o método utilizado para sua determinação (*bulk* ou covariância de vórtices) associados a diferentes condições ambientais.

5 RESULTADOS

Nessa seção serão apresentados resultados preliminares do projeto e os resultados previstos para a conclusão da tese de doutorado.

5.1 Resultados Preliminares

5.1.1 Simulação preliminar

Este projeto completa uma realização de uma simulação teste para a região de interesse. Utilizando o sistema de modelagem numérica regional acoplado COAWST, realizados uma simulação entre os dias 01 de Setembro e 01 de Outubro de 2015. A Figura 7A apresenta a TSM e os vetores das correntes oceânicas em superfície para o último dia da simulação. É possível observar feições características da região, como a CCA, além de valores de temperatura próximas às encontradas na literatura científica.

A Figura 7B apresenta um corte longitudinal da TSM e temperatura do ar entre 55 °S e 64 °S na longitude de 66 °O. É possível observar a interação oceano-atmosfera da região, com a modulação local da atmosfera através do oceano: em regiões onde o oceano está com uma temperatura mais quente, há a presença de temperatura do ar mais quente e vice e versa.

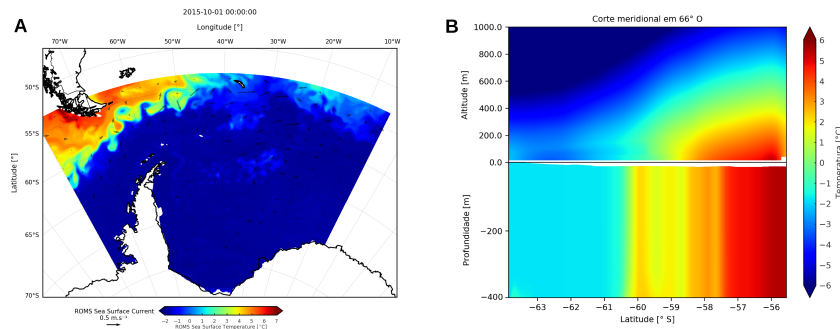


Figura 7: Simulação-teste realizada para o dia 01 de Outubro de 2015. (A) Temperatura da Superfície do Mar (colorido; °C) e Correntes Oceânicas de Superfície (vetores; m/s). (B) Temperatura do Ar (colorido; °C) e Temperatura do Mar (colorido; °C.)

A simulação teste foi realizada para avaliar a capacidade de reproduzir uma simulação para a região de interesse. Ressalta-se que o proponente publicou em setembro de 2018 o Guia Prático para Utilização do COAWST (Sutil & Pezzi, 2018), um guia que foi desenvolvido para auxiliar novos usuários com a familiarização e utilização do COAWST. O Guia foi planejado para ensinar ao leitor as etapas necessárias para utilizar o COAWST, da instalação do modelo à simulação de um caso teste e a configuração de um projeto. Em setembro de 2019, foi publicada a segunda edição do Guia Prático para CONfiguração do COAWST (Sutil & Pezzi, 2019), com a atualização para a versão 3.4 do COAWST, a Introdução de um capítulo sobre o modelo de gelo marinho e a remodelação do pacote de ferramentas *model2roms* utilizado para gerar os dados de entrada do modelo e pode ser adquirido no sítio <https://github.com/uesleisutil/model2roms>.

5.1.2 Dados preliminares do DBCCDA

Foi realizado entre os dias 14 a 18 de Fevereiro de 2020 um teste com o DBCCDA a fim de verificar sua aptidão ao clima e tempo antártico. O sensor de pressão atmosférica instalado, de acordo com a Figura ??, foi comparado com os dados da Base Antártica Chilena Presidente Eduardo Frei Montalva. Os dados coletados pelo DBCCDA foram considerados satisfatórios para a fase inicial de testes, apresentando consistência quando comparados, mesmo suportando ventos superiores a 83 km/h.

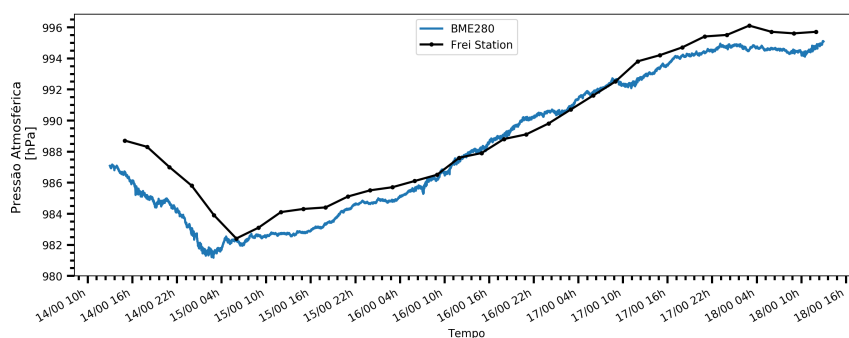


Figura 8: Pressão atmosférica na superfície coletada pelo DBCCDA (Azul) e pela Estação Chilena de Frei (Preto) entre os dias 14 e 18 de Fevereiro de 2020.

O segundo teste realizado, conforme a [Figura 9](#), comparou os dados de Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$) e Pressão Atmosférica (hPa) do DBCCDA com os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação meteorológica A728, localizada entre $-23.041668^{\circ}\text{S}$ e $-45.520841^{\circ}\text{O}$ entre os dias 12 e 19 de Abril de 2020. É possível observar a destreza do DBCCDA em coletar dados similares aos coletados pela estação meteorológica. O RMSE calculado para a Temperatura do Ar entre os dois conjuntos de dados foi de 1.71 e com um p-valor menor que 0.001 e o r^2 de 0.928. Os dados de Pressão Atmosférica (hPa) também apresentaram uma grande simiridade entre os dois conjuntos, com um RMSE de 0.45, um p-valor menor que 0.001 e um r^2 de 0.997.

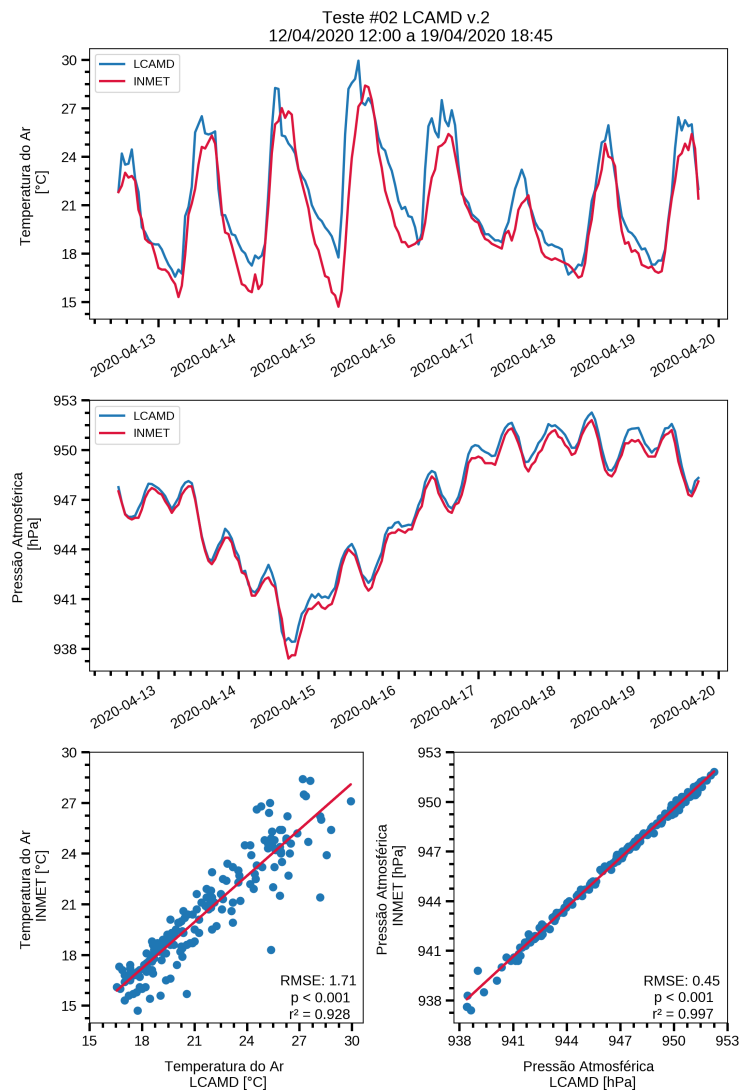


Figura 9: Comparação dos dados de Pressão Atmosférica (hPa) e Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$) coletados pelo DBCCDA (Azul) com os dados da estação meteorológica A728 do INMET (Vermelho) entre os dias 12 e 19 de Abril de 2020.

5.2 Resultados Esperados

Espera-se ao longo da execução do projeto:

- Ter um sistema de previsão do tempo e clima antártico operacional e confiável no INPE;
- Desenvolver um dispositivo de baixo custo que seja usado para coleta de dados atmosféricos na Antártica;
- Compreender melhor o comportamento da formação de massas de água no Mar de Weddell a partir da influência da existência ou não do gelo marinho na superfície oceânica;
- Propor mecanismos físicos que expliquem o papel do oceano e da atmosfera na restauração do estado de equilíbrio do gelo marinho;
- Conhecer o impacto desempenhado pelo gelo marinho nos fluxos de calor, *momentum* e massa na região do Mar de Weddell;
- Análise da persistência (dias ou meses) de uma condição de máxima concentração e espessura do gelo marinho antártico no Mar de Weddell;
- Conhecer o impacto das correntes oceânicas no vento em superfície no Mar de Weddell a partir de simulações com e sem a presença de gelo marinho.

6 PLANO DE TRABALHO E CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

Propomos, a partir da [Tabela 1](#), os seguintes marcadores para o progresso do projeto de tese de doutorado:

1. Cumprimento das disciplinas do Doutorado;
2. Cumprimento da Prova obrigatória de Línguas;
3. Preparação do projeto (Aquisição de dados *in situ* do DBCCDA e compilação do modelo);
4. Primeiras simulações-teste do projeto e assimilação de dados do DBCCDA;
5. Execução das simulações numéricas utilizando o sistema acoplado COAWST;
6. Cumprimento do Exame de Qualificação;
7. Avaliação das simulações numéricas a partir de dados *in situ* do DBCCDA e Sensoriamento Remoto;
8. Cumprimento do Exame de Proposta da Tese;
9. Análises das simulações - Cálculo dos Fluxos Turbulentos de Calor, massa e *momentum*;
10. Submissão de artigo para o Congresso do Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR);
11. Submissão de artigo em revista Qualis-A;
12. Doutorado Sanduíche no exterior, com o Dr. John Warner da Woods Hole/USGS - EUA;
13. Submissão de artigo em revista Qualis-A internacional;
14. Defesa da tese de doutorado;

15. Embarque nas Operações Antártica para coletas de dados *in situ*;
16. Revisão bibliográfica da literatura.

Atividades	Cronograma de atividades: 2021-2024							
	1º sem. 2021	2º sem. 2021	1º sem. 2022	2º sem. 2022	1º sem. 2023	2º sem. 2023	1º sem. 2024	2º sem. 2024
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								

Tabela 1: Cronograma de atividades desenvolvida para o projeto de tese de doutorado.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este projeto de doutorado faz parte de uma iniciativa inovadora e promissora que visa contribuir para um melhor entendimento dos processos dinâmicos e termodinâmicos de interação do gelo marinho-oceano-atmosfera no setor Atlântico do Oceano Austral. Espera-se aprofundar o conhecimento sobre o impacto do gelo marinho na atmosfera e no oceano.

Através da análise dos resultados, espera-se avançar no entendimento dos modos de variabilidade oceânica e atmosférica dos fluxos de calor e *momentum* e seus processos associados, assim como os impactos eventuais desses processos na região de estudo. Nessa proposta, uma forte ênfase foi dada ao desenvolvimento de um modelo regional acoplado, que considere as componentes de gelo marinho, oceano, ondas e atmosfera e que já é dominada pelos proponentes do projeto. Esta ferramenta será empregada no estudo dos processo dinâmicos e termodinâmicos que ocorrem nestas interfaces. Os dados observacionais *in situ*, coletados anualmente nas Operações Antárticas do Projeto ATMOS, também serão de extrema valia para a utilização em conjunto com o sistema de modelagem, pois permitirá fazer ajustes e verificações da destreza dos modelos e auxiliarão no ajuste fino das parametrizações físicas. Espera-se ao fim do projeto poder contar com um sistema regional acoplado de modelagem numérica, que disponha de altíssima resolução para auxiliar em outras atividades de pesquisa ou até mesmo rotinas operacionais de previsão tempo e clima no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Espera-se que a análise integrada dos fenômenos regionais estudados com o auxílio de ferramentas de modelagem numérica e com dados *in situ* possa garantir, no futuro, um melhor entendimento dos processos físicos que ocorrem na região de estudo. A expectativa é que eventualmente este conhecimento possa ajudar na melhora dos esquemas de simulação e previsão do tempo e clima para a região desse estudo. Unindo-se a dados e resultados de outros projetos em andamento, os gerados por essa proposta

contribuirão para que o entendimento de fenômenos com origem em altas latitudes que serão revertidos numa melhor compreensão dos fenômenos oceânicos e atmosféricos de maior escala.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amante, C. & B. W. Eakins (2009). “ETOPO-1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Source and Analysis.” Em: *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC* 24, p. 19.
- Arakawa, A. & V. R. Lamb (1977). “Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model”. Em: *Methods in Computational Physics* 17, pp. 173–265. DOI: 10.1016/B978-0-12-460817-7.50009-4.
- Babanin, A. V., W. E. Rogers, R. Camargo, M. Doble, T. Durrant, K. Filchuk, K. Ewans, M. Hemer, T. Janssen, B. Kelly-Gerrey, K. Machutcheon, P. McComb, F. Quiao, Schulz E., A. Skvortsov, J. Thomson, M. Vichi, N. Violant-Carvalho, D. Wang, T. Waseda, G. Williams & I. R. Young (2019). “Waves and swells in high wind and extreme fetches, measurements in the southern ocean”. Em: *Frontiers in Marine Science* 6, p. 361. DOI: 10.3389/fmars.2019.00361.
- Booij, N., L. H. Holthuijsen & R. C. Ris (1996). “The SWAN Wave Model for Shallow Water”. Em: *Coastal Engineering Proceedings* 25, pp. 668–675. DOI: 10.9753/icce.v25.%25p.
- Booij, N., R. C. Ris & L. H. Holthuijsen (1999). “A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation”. Em: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104.C4, pp. 7649–7666. DOI: 10.1029/98JC02622. URL: [dx.doi.org/10.1029/98JC02622](https://doi.org/10.1029/98JC02622).
- Budgell, W. P. (2005). “Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region”. Em: *Ocean Dynamics* 55, pp. 370–387. DOI: 10.1007/s10236-005-0008-3.
- Butterworth, B. J. & S. D. Miller (2016). “Automated underway eddy covariance system for air-sea momentum, heat, and CO₂ fluxes in the Southern Ocean”. Em: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 33, pp. 635–652. DOI: doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0156.1.
- Carpenedo, C. B., T. Ambrizzi & L. A. L. Aimola (2013). “Possíveis relações entre a variabilidade interanual do gelo marinho antártico e a precipitação na América do Sul”. Em: *Ciência e Natura* 35, pp. 72–74.
- Carton, J. A., G. A. Chepurin & L. Chen (2009). “SODA3: a new ocean climate reanalysis”. Em: *Journal of Geophysical Research* 123, pp. 6967–6983. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0149.1.
- Cunningham, C. A. & J. P. Bonatti (2011). “Local and remote responses to opposite Ross Sea ice anomalies: A numerical experiment with CPTEC/INPE AGCM”. Em: *Theoretical and applied climatology* 106, pp. 23–44.
- ERA5 Reanalysis (2017). Boulder CO. URL: <https://doi.org/10.5065/D6X34W69>.
- Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. E. Hare, A. A. Grachev & J. B. Edson (2003). “Bulk Parameterization of Air-Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm”. Em: *Journal of Climate* 16.4, pp. 571–591. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2.
- Fairall, C. W., E. F. Bradley, D. P. Rogers, J. B. Edson & G. S. Young (1996). “Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment”. Em: *Journal of Geophysical Research* 101, pp. 3747–3764. DOI: 10.1029/95JC032052.
- Gordon, A. L., M. Visbeck & B. Huber (2001). “Export of Weddell Sea deep and bottom water.” Em: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 106, pp. 9005–9017.
- Haid, V. & R. Timmermann (2013). “Simulated heat flux and sea ice production at coastal polynyas in the southwestern Weddell Sea”. Em: *Journal of Geophysical Research* 118, pp. 2640–2652. DOI: doi.org/10.1002/jgrc.20133.
- Haidvogel, D. B., H. G. Arango, W. P. Budgell, B. D. Cornuelle, E. Curchitser, E. Lorenzo, K. Fennel, W. R. Geyer, A. J. Hermann, L. Lanerolle, J. Levin, J. C. McWilliams, A. J. Miller, A. M. Moore, T. M. Powell, A. F. Shchepetkin, C. R. Sherwood, R. P. Signell, J. C. Warner & J. Wilkin (2008). “Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System.” Em: *J. Comput. Physics* 227.7, pp. 3595–3624. DOI: 10.1016/j.jcp.2007.06.016.
- Hedström, K. S. (2018). “Technical Manual for a Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (Version 5)”. Em: *OCS Study BOEM 2016-037*. URL: https://www.boem.gov/uploadedFiles/BOEM/BOEM_Newsroom/Library/Publications/BOEM_2016-037.pdf.
- Hunke, E. C. (2001). “Viscous-plastic sea ice dynamics with the evp model: linearization issues”. Em: *Journal of Computational Physics* 170, pp. 18–38.
- Hunke, E. C. & J. K. Dukowicz (1997). “An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics”. Em: *Journal of Physical Oceanography* 27, pp. 1849–1868.

- Jacob, R. L., J. W. Larson & E. T. Ong (2005). “M x N Communication and Parallel Interpolation in Community Climate System Model Version 3 Using the Model Coupling Toolkit.” Em: *IJHPCA* 19.3, pp. 293–307. DOI: 10.1177/10943420050506116.
- Johnson, G. C. & H. Bryden (1989). “On the size of the Antarctic Circumpolar Current”. Em: *Deep Sea Research-Part A* 36, pp. 39–53.
- Jones, P. W. (1998). *A User's Guide for SCRIP: A Spherical Coordinate Remapping and Interpolation Package version 1.5*. Los Alamos, NM. URL: oceans11.lanl.gov/svn/SCRIP/trunk/SCRIP/doc/SCRIPusers.pdf.
- (1999). “First and Second Order Conservative Remapping Schemes for Grids in Spherical Coordinates”. Em: *Monthly Weather Review* 127, pp. 2204–2210. DOI: 10.1175/1520-0493(1999)127<2204:FASOCR>2.0.CO;2.
- Kerr, R., T. S. Dotto, M. M. Mata & H. H. Hellmer (2018). “Three decades of deep water mass investigation in the Weddell Sea (1984–2014): Temporal variability and changes”. Em: *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 149, pp. 70–83.
- Kohout, A. L., M. J. H. Williams, S. Dean & Meylan M. H. (2014). “Storm-induced sea ice breakup and the implications for ice extent”. Em: *Nature* 509, pp. 604–607. DOI: doi.org/10.1038/Nature132623.
- Larson, J. W., R. L. Jacob & E. T. Ong (2005). “The Model Coupling Toolkit: A New Fortran90 Toolkit for Building Multiphysics Parallel Coupled Models.” Em: *IJHPCA* 19.3, pp. 277–292. DOI: 10.1177/10943420050506115. URL: dblp.uni-trier.de/db/journals/ijhpca/ijhpca19.html#LarsonJ005.
- Lee, S. K., D. L. Volkov, H. Lopez, W. G. Cheon, A. L. Gordon, Y. Liu & R. Wanninkhof (2017). “Wind-driven ocean dynamics impact on the contrasting sea-ice trends around West Antarctica”. Em: *Journal of Geophysical Research: Oceans*. DOI: 10.1002/2016JC012416.
- Lemieux, J. -F., B. Tremblay, F. Dupont, M. Plante, G. C. Smith & D. Dumont (2015). “A basal stress parameterization for modeling landfast ice”. Em: *Journal of Geophysical Research* 120, pp. 3157–3179. DOI: 10.1002/2014JC010678.
- Mayewski, A. L., M. P. Meredith, C. P. Summerhayes, J. Turner, A. Worby, P. J. Barrett, G. Casassa, N. A. N. Bertler, T. Bracegirdle, A. C. Naveira Garabato, D. Bromwich, H. Campbell, G. S. Hamilton, W. B. Lyons, K. A. Maasch, S. Aoki, C. Xiao & T. van Ommen (2009). “State of the Antarctic and Southern Ocean climate system”. Em: *Reviews of Geophysics* 47. DOI: doi.org/10.1029/2007RG00023.
- McTaggart-Cowan, M. J., R. L. F. Bosart, C. A. Davis, E. H. Atallah, J. R. Gyakum & K. A. Emanuel (2006). “Analyses of the Hurricane Catarina”. Em: *Monthly Weather Review* 134, pp. 3029–3053. DOI: doi.org/10.1175/MWR3330.1.
- Mellor, G. L. & L. Kanta (1989). “Journal of Geophysical Research”. Em: *An ice-ocean coupled model* 94.10, pp. 937–954.
- Meredith & J. C. King (2015). “Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century.” Em: *Geophysical Research Letters* 32. DOI: 10.1029/2005GL024042.
- Moffat, C. & Meredith (2018). “Shelf-ocean exchange and hydrography west of Antarctic Peninsula: a review”. Em: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 378. DOI: doi.org/10.1098/rsta.2017.0164.
- Munk, W. H. & E. Palmén (1951). “Note on the Dynamics of the Antarctic Circumpolar Current”. Em: *Tellus* 3, pp. 53–55.
- Nakamura, H. & A. Shimo (2004). “Seasonal variations in the Southern Hemisphere storm tracks and jet streams as revealed in a reanalysis dataset”. Em: *Journal of Climate* 17, pp. 1828–1844.
- NSF (2019). *Ice Sheets*. URL: <https://www.nsf.gov/geo/opp/antarct/science/icesheet.jsp>.
- Parise, C. K., L. P. Pezzi, K. I. Hodges & F. Justino (2014). “The Influence of Sea Ice Dynamics on the Climate Sensitivity and Memory to Increased Antarctic Sea Ice”. Em: *Journal of Climate* 28, pp. 9642–9668. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00748.1.
- Peng, G., W. N. Meier, D. Scott & M. Savoie (2018). “A long-term and reproducible passive microwave sea ice concentration data record for climate studies and monitoring”. Em: *Earth Syst. Sci. Data* 5, pp. 311–318. DOI: doi.org/10.5194/essd-5-311-2013.
- Pezzi, L. P., R. B. Souza, O. Acevedo, I. Wainer, M. M. Mata, C. A. E. Garcia & R. Camargo (2009). “Multiyear measurements of the oceanic and atmospheric boundary layers at the Brazil-Malvinas confluence region”. Em: *Journal of Geophysical Research* 114, p. D19103. DOI: doi.org/10.1029/2008JD011379.
- Pickard, G. L. & W. J. Emery (1990). *Descriptive Physical Oceanography, An Introduction*. New York: Pergamon Press.

- Pook, M. J., J. S. Risbey, P. C. McIntosh, C. C. Ummenhofer, A. G. Marshall & G. A. Meyers (2013). "The seasonal cycle of blocking and associated physical mechanisms in the Australian region and relationship with rainfall." Em: *Monthly Weather Review* 141, pp. 4534–4553.
- Pullen, J., R. Allard, H. Seo, A. J. Miller, S. Chen, L. P. Pezzi, T. Smith, P. Chu, J. Alves & R. Caldera (2018). "Coupled ocean-atmosphere forecasting at short and medium time scales". Em: *Journal of Marine Science* 17, p. 1.
- Rabault, J., G. R. Sutherland, O. Gundersen & A. Jensen (2017). "Measurements of wave damping by a grease ice slick in svalbard using off-the-shelf sensors and open-source electronics". Em: *Journal of Glaciology* 63, pp. 372–381. DOI: 10.1017/jog.2017.1.
- Rabault, J., G. R. Sutherland, O. Gundersen, A. Jensen, M. Atle, A. Marchenko & B. Oyvind (2020). "An open source, versatile, affordable waves in ice instrument for scientific measurements in the polar region". Em: *Cold Regions Science and Technology* 170.
- Raphael, M., W. Hobbs & I. Wainer (2011). "The effect of Antarctic Sea Ice on the Southern Hemisphere Atmosphere during the Southern Summer". Em: *Climate Dynamics* 36, pp. 1403–1417.
- Rintoul, S (2019). "The Global Influence of Localized Dynamics in the Southern Ocean". Em: *Nature* 558, pp. 209–218.
- Rodrigues, R. R. & T. Woolings (2017). "Impact of atmospheric blocking on South America in austral summer." Em: *Journal of Climate* 30, pp. 1821–1837.
- Santini, M. F., R. B. Souza, I. Wainer & M. M. Muelbert (2018). "Temporal analysis of water masses and sea ice formation rate west of the Antarctic Peninsula in 2008 estimated from southern elephant seals SRDL-CTD data". Em: *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 14. DOI: doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.02.013.
- Shchepetkin, A. F. & J. C. McWilliams (2005). "The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model". Em: *Ocean Modelling* 9, pp. 347–404. DOI: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
- Silva, P. E. D. (2013). "Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica". Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, SP: Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Simmonds, I., K. Keay & E. P. Lim (2003). "Synoptic activity in the seas around Antarctica". Em: *Monthly Weather Review* 131, pp. 272–288.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang & J. G. Powers (2008). "A Description of the Advanced Research WRF Version 3." Em: NCAR TN-475+STR.
- Smolarkiewicz, P. K. & W. W. Grabowski (1990). "The multidimensional positive definite advection transport algorithm: non-oscillatory option". Em: *Journal of Comp. Phys.* 86, pp. 355–375.
- Sutil, U. A. & L. P. Pezzi (2018). "Guia Prático para Utilização do COAWST". Em: *National Institute for Space Research* 1, pp. 01–91. DOI: 10.13140/RG.2.2.31726.87363.
- (2019). *Guia Prático para Configuração do COAWST - Segunda Edição*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 100. ISBN: 978-85-17-00098-0. URL: urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34R/3TUTUJB.
- Talley, L. D. (2013). "Closure of the Global Overturning Circulation through the Indian, Pacific and Southern Oceans". Em: *Oceanography* 26. DOI: doi.org/10.5670/oceanogra.2013.07.
- Tamura, T., K. I. Ohshima, S. Nishida & H. Hasumi (2011). "Estimation of surface heat/salt fluxes associated with sea ice growth/melt in the Southern Ocean". Em: *SOLA* 7, pp. 017–020. DOI: doi.org/10.2151/sola.2011-005.
- Taylor, K. E. (2001). "Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram". Em: *Journal of Geophysical Research* 106, pp. 7183–7192. DOI: doi.org/10.1029/2000JD900719.
- Turner, J., S. R. Colwell, G. J. Marshall, T. A. Lachlan-Cope, A. M. Carleton, P. D. Jones, V. Lagun, P. A. Reid & S. Iagovkina (2005). "Antarctic climate change during the last 50 years." Em: *International Journal of Climatology* 25, pp. 279–294. DOI: 10.1002/joc.1130.
- Ummenhofer, C. C. & M. H. England (2007). "Interannual extremes in New Zealand precipitation linked to modes of Southern Hemisphere climate variability." Em: *Journal of Climate* 20, pp. 5418–5440.
- Vernet, M., W. Geibert, M. Hoppema, P. J. Brown, C. Haas, H. H. Hellmer, W. Jokat, L. Jullion, M. Mazloff, D. C. E. Bakker, J. A. Brearley, P. Croot, T. Hattermann, J. Hauck, C.-D. Hillenbrand, C. J. M. Hoppe, O. Huhn, B. P. Koch, O. J. Lechtenfeld, M. P. Meredith, A. C. Naveira Garabato, E. -M. Nöthig, I. Peeken, M. M. Rutgers van der Loeff, S. Schmidtke, M. Schröder, V. H. Strass, S. Torres-Valdés & A. Verdy (2019). "The Weddell Gyre, Southern Ocean: Present Knowledge and Future Challenges". Em: *Reviews of Geophysics* 57, pp. 623–702.

- Vihma, T., J. Uotila, B. Cheng & J. Launiainen (2002). "Surface heat budget over the Weddell Sea: Buoy results and model comparisons". Em: *Journal of Geophysical Research* 107. DOI: doi.org/10.1029/2000JC000372. 2002.
- Warner, J. C., B. Armstrong, R. He & J. B. Zambon (2010). "Development of a Coupled Ocean–Atmosphere–Wave–Sediment Transport (COAWST) Modeling System". Em: *Ocean Modelling* 35.3, pp. 230–244. DOI: [10.1016/j.ocemod.2010.07.010](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.07.010).
- Warner, J. C., C. R. Sherwood, R. P. Signell, C. K. Harris & H. G. Arango (2008). "Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model." Em: *Computers & Geosciences* 34.10, pp. 1284–1306. DOI: [10.1016/j.cageo.2008.02.012](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.02.012).