

Revisão

## Uma Revisão dos Processos de Interação Oceano-Atmosfera em Regiões de Intenso Gradiente Termal do Oceano Atlântico Sul Baseada em Dados Observacionais.

Luciano Ponzi Pezzi<sup>1</sup>, Ronald Buss de Souza<sup>2</sup>, Mário F.L. Quadro<sup>3</sup><sup>1</sup>*Coordenação Geral de Observação da Terra, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.*<sup>2</sup>*Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Santa Maria, RS, Brasil.*<sup>3</sup>*Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.*

Recebido: 30/3/2015 - Aceito: 23/10/2015

### Resumo

De um modo geral, a interação do oceano com a atmosfera em regiões de intensa atividade da mesoescala oceânica (frentes oceanográficas, meandros e turbilhões de escalas espaciais típicas de cerca de 100-500 km e escalas temporais de cerca de 2-3 meses) apresenta uma correlação positiva entre a temperatura da superfície do mar (TSM) e variáveis meteorológicas tais como a estabilidade da Camada Limite Atmosférica Marinha (CLAM), a intensidade do vento e os fluxos de calor, de *momentum* e de gases entre o oceano e a atmosfera. Isto sugere que o oceano força a atmosfera nas escalas espaciais e temporais relacionados à mesoescala oceânica. Principalmente com base em dados observacionais, porém não exclusivamente, este trabalho apresenta uma breve revisão científica sobre o impacto das estruturas de mesoescala presentes no Oceano Atlântico Sudoeste em alguns componentes do sistema acoplado oceano-atmosfera que, em certos aspectos, impactam o tempo e o clima das regiões continentais adjacentes na América do Sul. Inclui-se neste artigo também uma breve revisão do estado da arte do conhecimento sobre a parte oceânica da Zona de Convergência do Atlântico Sul. Este artigo apresenta as características oceanográficas gerais da área de estudo, incluindo alguns aspectos sobre a circulação do Atlântico Sul e a variabilidade. Lembrando do fato que o Atlântico Sudoeste e Sul são regiões consideradas como trilha de tempestade, este trabalho também discute os impactos dos gradientes de TSM do Oceano Atlântico Sul Ocidental sobre os sistemas atmosféricos transientes que atravessam frequentemente esta região. Além disso, o artigo discute novos indícios de que os processos oceanográficos que ocorrem no litoral sul do Brasil no inverno tem um forte impacto sobre a modulação CLAM sobre a plataforma continental do sul do Brasil. O artigo aponta também indícios passados e presentes que os processos ecológicos causados pela variabilidade climática atmosférica e marinha na costa sul do Brasil impactam na desova e captura da sardinha (*Sardinella Brasiliensis*), que é um dos mais importantes recursos marinhos renováveis do Brasil. O artigo termina apresentando alguns dos esforços observacionais atuais do Brasil, visando a coleta de dados meteorológicos e marinhos no Oceano Atlântico Equatorial e Sul. Estes esforços visam aumentar a nossa compreensão do acoplamento oceano-atmosfera nas escalas sinóticas e climáticas, bem como o papel do Oceano Atlântico em controlar o calor, *momentum* e fluxos de dióxido de carbono para a atmosfera.

**Palavras-chave:** interação oceano-atmosfera, TSM, camada limite atmosférica marinha, ZCAS, Oceano Atlântico Sudoeste, dados *in situ*.

## A Review on the Ocean-Atmosphere Interaction Processes in Regions of Strong Sea Surface Temperature Gradients of The South Atlantic Ocean Based on Observational Data

### Abstract

In a general view, the interaction of the ocean with the atmosphere in regions of intense oceanic mesoscale activity (oceanographic fronts, meanders and eddies typical of spatial scales of about 100-500 km and time scales of about 2-3

months) presents a positive correlation between the sea surface temperature (SST) and meteorological variables such as the stability of the Marine Atmospheric Boundary Layer (MABL), the wind intensity and the heat, momentum and gas fluxes between the ocean and the atmosphere. This suggests that the ocean forces the atmosphere at the spatial and temporal scales related to the oceanic mesoscale. Mostly based on observational data, this work presents a brief scientific revision on the impact of the mesoscale structures present in the Southwestern Atlantic Ocean on some components of the coupled ocean-atmosphere system that, in certain aspects, impact the weather and the climate of the adjacent continental regions of South America. It is also included in this article a brief review of the state of the art knowledge about the oceanic part of the South Atlantic Convergence Zone. This paper presents the general oceanographic characteristics of the study area, including some aspects about the South Atlantic circulation and variability. Recalling the fact that the subtropical South Atlantic is a Storm Track region, this paper also discusses the impacts of the SST gradients of the Southwestern Atlantic Ocean on the transient atmospheric systems that frequently cross the region. In addition, the paper discusses novel indications that the oceanographic processes occurring at the southern coast of Brazil in wintertime have a marked impact on the MABL modulation over the southern Brazilian continental shelf. The paper reports past and present indications that the ecological processes caused by the atmospheric and marine climate variability of the southern coast of Brazil impact the spawning and catches of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*), one of most important renewable marine resources of Brazil. The paper finishes presenting some of the current observational efforts of Brazil aiming the collection of marine meteorology data in the South and Equatorial Atlantic Ocean. These efforts intend to widen our understanding of the ocean-atmosphere coupling at the synoptic and climatic scales as well as the role of the Atlantic Ocean in controlling the heat, momentum and carbon dioxide fluxes to the atmosphere.

**Keywords:** air-sea interaction, SST, marine atmospheric boundary layer, SACZ, Southwest Atlantic Ocean, *in situ* data.

## 1. Introdução

A camada limite atmosférica marinha (CLAM) é localmente modulada pela temperatura da superfície do mar (TSM) que se encontra logo abaixo dela. Essa modulação vem sendo estudada em várias regiões do mundo onde ocorrem frentes oceânicas, como é o caso da língua de água fria observada em superfície e sub-superfície nos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais, no Oceano Austral e, ultimamente de maneira incipiente no Oceano Atlântico Sudoeste na região sudoeste do giro subtropical da circulação média do Atlântico, onde as correntes do Brasil e das Malvinas se encontram, denominada de Confluência Brasil-Malvinas (CBM). Os efeitos da variabilidade climática e de mesoescala oceânica do Oceano Atlântico Sudoeste no clima e tempo da América do Sul ainda não são completamente entendidos. Sugere-se, porém que esta região tem um papel muito importante para o tempo e clima do Brasil, especialmente suas regiões sul e sudeste, pois vários fenômenos atmosféricos que afetam o continente sul-americano surgem nas regiões costeiras ao largo do Oceano Atlântico Sudoeste ou passam por sobre esse oceano.

A região compreendida entre a Península Antártica e a região sul do Brasil (especialmente nas regiões costeiras do norte da Península Antártica, Argentina, Uruguai e sul do Brasil) apresenta a maior taxa de formação de ciclones do hemisfério sul (Hoskins e Hodges, 2005). Os autores utilizaram mais de 40 anos de dados de reanálises do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e demonstraram a variabilidade sazonal da distribuição das rotas de passagens dos ciclones (*Storm Tracks*) no hemisfério sul, enfatizando que em todas as estações do ano há grande atividade ciclogênica sobre o Oceano Atlântico Sul e que os ciclones sobre o norte da Antártica em geral provém de latitudes mais baixas.

Considerando-se os resultados descritos por Hoskins e Hodges (2005), quando se pensa nas regiões de gênese e passagem de fenômenos atmosféricos transientes que ocorrem em escala sinótica, percebe-se que uma atenção especial deve ser dada ao papel da variabilidade oceânica em várias escalas sobre as regiões sul e sudeste do Brasil, especialmente as regiões costeiras. Na escala climática, essas são justamente as regiões onde espera-se sofrer mais diretamente o impacto das mudanças climáticas através do aumento do nível do mar e de um eventual aumento de eventos extremos como ressacas, alagamentos e erosão costeira causados pelas tempestades severas (*Storm Surges*). Esses eventos representam uma ameaça à vida e ao patrimônio, podendo causar grandes prejuízos às regiões impactadas. Parise et al. (2009), por exemplo, relacionam as condições meteorológicas típicas para a geração de tempestades severas e apontam seus efeitos sobre a erosão costeira na região sul do Brasil.

Dentre vários ciclones já descritos que atingem rotineiramente a região costeira sul do Brasil, destaca-se o caso do Catarina, o controverso fenômeno (ciclone subtropical ou furacão?) registrado em março de 2004 com efeitos devastadores sobre o litoral norte do estado do Rio Grande do Sul e sul do estado de Santa Catarina. Tendo sido gerado no interior do Oceano Atlântico Sul em latitude próxima a 30° S, o Catarina foi um fenômeno típico da interação oceano-atmosfera que experimentou uma intensificação de seus ventos associada à sua passagem em oceano aberto acima de vórtices de mesoescala de núcleo quente, presentes nas águas do Oceano Atlântico Sul naquela época do ano (Vianna et al., 2010).

Atualmente há uma carência de estudos que permitam uma maior compreensão dos fenômenos que relacionam o estado do oceano e da atmosfera e suas interações nas várias escalas de tempo e espaço. Para o caso do Brasil e

especialmente para as regiões costeiras do sul e sudeste onde os efeitos das passagens de frentes atmosféricas são frequentes, o conhecimento acerca da real influência Oceano Atlântico Sul no tempo e clima é muito importante. Esse trabalho não visa esgotar o assunto sobre o papel do Oceano Atlântico sobre o clima e tempo do Brasil. Ao invés, o principal objetivo desse é oferecer uma breve revisão do que se conhece acerca do papel desse oceano em algumas componentes do sistema climático e sobre a situação atmosférica sinótica a partir de dados observacionais.

O trabalho é organizado da seguinte maneira: na sessão 2 são apresentados alguns aspectos da circulação e variabilidade oceânica da área de interesse. Na sessão 3 aborda-se o papel dos anticiclones transientes, dos ciclones extra-tropicais e das mudanças climáticas. A sessão 4 revisa alguns estudos observacionais realizados no Oceano Atlântico Sul com ênfase nos principais aspectos determinantes para o acoplamento sinótico entre o oceano e a atmosfera dessa região. As trocas de dióxido de carbono e sua importância no sistema acoplado oceano-atmosfera são exploradas na sessão 5. Considerando-se a importância econômica da pesca da sardinha verdadeira (*Sardinella brasiliensis*) para o país e sua dependência direta das condições oceanográficas e meteorológicas locais na região costeira sul-sudeste do Brasil, a seção 6 desse trabalho mostra a influência da variabilidade climática marinha dessa região na desova e nas capturas desse recurso vivo. O artigo termina na sessão 7, onde relatam-se alguns esforços observacionais atualmente estão em curso visando aprofundar nosso conhecimento sobre os mecanismos de interação oceano-atmosfera no Atlântico Sudoeste e Sul.

## 2. Circulação e Variabilidade Oceânica

A importância do Oceano Atlântico Sul para o clima do planeta está cada vez mais clara através de pesquisas recentes que avaliam a contribuição desse oceano para a circulação termohalina global através da chamada Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (CRMA). O importante trabalho de Garzoli e Matano (2011) explica com detalhes os processos de circulação tridimensional e de modificação de massas de água que fazem o Oceano Atlântico Sul o único oceano do mundo onde há um transporte líquido meridional de calor em direção ao Equador a partir do Polo Sul.

Em superfície, o Oceano Atlântico Sul é caracterizado pela sua circulação média que se distribui num giro anticiclônico fechado, chamado Giro Subtropical do Atlântico Sul (GSTAS - Peterson e Stramma, 1991; Stramma e England, 1999). Esse giro é mantido pela circulação geostrófica e pela ação dos ventos na superfície do mar, sendo muito semelhante em forma e extensão ao giro atmosférico subtropical que se situa sobre o Oceano Atlântico Sul. Garzoli e Matano (2011) e Campos (2014) descrevem de forma didática os processos de conexão da circulação média do Oceano Atlântico Sul com os movimentos de água

das bacias dos oceanos Pacífico e Índico. Os autores descrevem que as águas desses oceanos penetram o Atlântico Sul formando o ramo superior da circulação termohalina global com, respectivamente, águas mais frias e menos salinas na borda oeste da bacia atlântica e águas mais quentes e mais salinas na sua borda leste. Em ambas as bordas, a intrusão de águas pela Passagem de Drake e pelo Cabo da Boa Esperança contribuem para tornar as respectivas regiões da CBM e da Retroflexão da Corrente das Agulhas duas das regiões dinamicamente mais ativas do oceano global.

O GSTAS é delimitado na sua borda ocidental, paralela ao continente Sul Americano, pela Corrente do Brasil (CB). A CB é uma corrente de contorno oeste originada na bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE), em torno de 10°S, que flui para o sul ao longo da quebra da plataforma continental até a região da CBM. A CBM, descrita originalmente por Clowes (1933), caracteriza-se pelo encontro dos núcleos da CB (transportando águas quentes e salinas) e da Corrente das Malvinas (CM, transportando águas frias e menos salinas). Legeckis e Gordon, (1982), Gordon (1989), Olson *et al.* (1988), Garzoli e Garrafo (1989), Garzoli e Simionato (1990), Garcia *et al.* (2004), Gonzales-Silvera *et al.* (2006), Souza *et al.* (2006), Barré *et al.* (2006) e Jullion *et al.* (2010) são exemplos de trabalhos que descrevem as características oceanográficas e sua variabilidade espaço-temporal na região da CBM, demonstrando a importância da utilização de dados de satélites para um melhor entendimento dessa região.

Uma das principais características da CBM é a presença de fortes gradientes horizontais e verticais termais entre as massas d'água de diferentes origens, acompanhados por intensos gradientes horizontais de TSM, das anomalias de altura do nível do mar, da concentração de clorofila superficial entre outros (Legeckis e Gordon, 1982; Chelton *et al.*, 1990; Lentini *et al.*, 2002; Garcia *et al.*, 2004; Souza *et al.*, 2006). Essas propriedades tem sido investigadas principalmente através de dados de inúmeros sensores a bordo de satélites, tais como o AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), o SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*), o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), o AMSR (*Advanced Microwave Scanning Radiometer*) e os radares-altímetros TOPEX-Poseidon e Jason, entre outros. Os intensos gradientes de propriedades imprimem uma grande instabilidade à região da CBM a qual, por sua vez, ocasiona uma grande atividade de mesoescala oceânica expressa na forma de meandros e vórtices de núcleo quente e frio ejetados na direção de norte para sul e vice-versa, respectivamente. Segundo Garzoli e Simionato (1990), as feições de mesoescala presentes na CBM, assim como as próprias instabilidades das correntes que se encontram na região, são os agentes dominantes da dinâmica regional.

Outra importante característica da CBM é a sua oscilação sazonal: a região de máximos gradientes horizontais

termas e também a região onde o núcleo da CB se separa da região de quebra de plataforma continental e se desloca na direção do oceano aberto migram entre latitudes mais ao norte no inverno e mais ao sul no verão, oscilando entre uma latitude média de 38° S (Garzoli e Garrafo, 1989; Peterson e Stramma, 1991). Um dos principais mecanismos forçantes para essa dinâmica sazonal é a ação dos ventos (Garzoli e Giulivi, 1994), os quais são controlados pela dinâmica sazonal de deslocamento norte-sul do giro atmosférico subtropical situado sobre o Oceano Atlântico Sul. Dessa forma, o processo primário relacionado às trocas de *momentum* entre a atmosfera e o oceano na interface entre esses dois sistemas é essencial para a manutenção da circulação superficial geral do Oceano Atlântico Sul. Outro mecanismo importante, descrito em trabalhos liderados por pesquisadores brasileiros e argentinos como Matano (1993), Wainer *et al.* (2000) e Fetter e Matano (2008), por exemplo, é a variabilidade do transporte da CM. Esse, por sua vez, é influenciado pelas flutuações do transporte da Corrente Circumpolar Antártica (CCA), da qual a CM é uma extensão, e pelos campos de vento sobre o Oceano Austral.

No lado quente da CBM encontram-se as águas transportadas pela CB. Essa é uma corrente fraca quando comparada a outras correntes de contorno oeste do oceano global, como a Corrente do Golfo, a Corrente de Kuroshio e a Corrente das Agulhas, por exemplo. Stramma *et al.* (1990), utilizando o método geostrófico para o cálculo das velocidades de corrente, difundiram a idéia que o transporte da CB é relativamente pequeno atingindo valores de 4 Sv (sendo que  $1 \text{ Sv} = 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) perto de 10° S e na região entre 19° S e 25° S sendo cerca de 11 Sv, ou menos, de acordo com Stramma *et al.* (1990). Segundo esses autores, o transporte da CB continuaria na mesma ordem de grandeza até 20° S. Com base em umas das primeiras medidas diretas de corrente tomadas na CB, Garfield (1990) indicou que, na realidade, o transporte dessa corrente apresenta uma amplificação ao sul da latitude de Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro (23° S). De acordo com Silveira *et al.* (2001), essa amplificação do transporte da CB se deve à contribuição da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) que torna a corrente também mais espessa. O estudo de Silveira *et al.* (2001) apresenta uma farta descrição do comportamento da CB ao longo da costa sudeste do Brasil incluindo uma revisão de conceitos sobre a definição dessa corrente, as massas d'água associadas e medidas de velocidade e transporte. A dinâmica da CB, sua variabilidade espacial na mesoescala oceânica, estrutura vertical, energética e outros temas tem sido objeto de estudos importantes levados por pesquisadores brasileiros desde a década de 2000 até a atualidade. Muito do nosso conhecimento atual sobre a CB é derivado dos trabalhos fundamentais de Silveira *et al.* (2001, 2004, 2008), Calado *et al.* (2006), Soutelino *et al.* (2011), Francisco *et al.* (2011) e Rocha *et al.* (2014), por exemplo.

A CM, por outro lado, transporta as águas encontradas no lado frio da CBM. Essa corrente é considerada um ramo da CCA que se estende por sobre a região da quebra de plataforma continental argentina (Gordon, 1989). Jullion *et al.* (2010) descrevem que, por conta dessa corrente marinha, a própria região da CBM possui uma complicada estrutura termohalina que favorece as trocas de massa, calor e sal entre o GSTAS e a CCA. Segundo os autores, é na região da CBM que a CCA interage com as frentes oceanográficas subtropicais que demarcam o limite sul do GSTAS. Isso confere à região da CBM uma grande importância como região chave para o entendimento das trocas (conexões) entre a CCA (Oceano Austral) e as frentes subtropicais (Oceano Atlântico Sul). Esse fato, somado ao entendimento dos processos de variabilidade da modulação da CLAM pelos intensos gradientes de TSM da região da CBM (a ser melhor descrita na sessão 4.2. desse trabalho) levaram Pezzi *et al.* (2009) a considerar a CBM também como uma região chave para o estudo do tempo e do clima na América do Sul.

Sobre as frentes subtropicais do Oceano Atlântico Sul, a circulação oceânica superficial é dominada por um sistema de correntes chamado de Corrente do Atlântico Sul, ou Corrente Sul Atlântica (CSA). A CSA se desloca nas camadas superficiais e intermediárias ao longo das frentes subtropicais do Oceano Atlântico Sul, seguindo até cerca da costa africana, onde passa a receber a influência de parte da variabilidade de mesoescala causada pelo aporte de vórtices oceânicos quentes e mais salinos, originados a partir do Oceano Índico pela Corrente das Agulhas. Na região próxima ao continente africano, a CSA se divide e a maior parte do seu transporte é dirigido para norte através da Corrente de Benguela que, por sua vez, alimenta a Corrente Sul Equatorial (CSE). A CSE segue na direção do extremo nordeste do Brasil, onde também se bifurca gerando um ramo para sul que é a CB, fechando o GSTAS. O outro ramo da CSE se desloca para norte e passa a ser chamado de Corrente Norte do Brasil (CNB). Essa segue até o hemisfério norte e eventualmente transfere sua massa e energia (incluindo calorífica) para a Corrente do Golfo (Peterson e Stramma, 1991).

Garzoli e Matano (2011) recentemente reforçaram a compreensão científica sobre o papel do Oceano Atlântico Sul como o oceano que conecta as bacias do Índico e Pacífico com o Oceano Atlântico Norte, enfatizando que esse oceano não pode, de maneira nenhuma, ser considerado um condutor passivo entre esses diversos oceanos. Ao contrário, o Oceano Atlântico Sul se destaca por influenciar significativamente a estrutura de massas d'água da CRMA. Dessa forma, o Oceano Atlântico Sul apresenta-se como um elo importante aos processos de teleconexão oceânica global. Garzoli e Matano (2011) acrescentam que as regiões da borda oeste e leste do limite sul das frentes subtropicais do Oceano Atlântico Sul (regiões da CBM e da Retroflexão da Corrente das Agulhas, respectivamente),



por apresentarem grande variabilidade de mesoescala, contribuem de forma mais ampla à variabilidade da CRMA.

Segundo Campos (2014), em concordância ao descrito anteriormente por Garzoli e Matano (2011), o mecanismo geral de circulação da CRMA é alimentado na superfície pela intrusão de águas dos oceanos Pacífico e Índico que são eventualmente transportadas para o Oceano Atlântico Norte após ingressarem no Oceano Atlântico Sul. Além de aquecerem-se, a evaporação que ocorre quando essas águas passam pelo Equador torna-as mais salinas. Mais tarde, ao longo de seu deslocamento para norte no hemisfério norte, essas águas perdem seu calor para a atmosfera porém mantêm-se ainda salinas. Nas regiões próximas à Noruega e à Groenlândia, as águas superficiais resfriadas tornam-se eventualmente mais densas que as águas vizinhas e acabam por afundar dando origem a uma massa d'água conhecida como APAN. A APAN então, por efeitos do gradiente de pressão e da rotação da Terra por meio da geostrofia, desloca-se ao longo de camadas profundas do oceano desde o hemisfério norte até o hemisfério sul onde, no ambiente subantártico, mescla-se com outras massas d'água, contribuindo para a formação da Água Antártica de Fundo (contribuição do ramo inferior da APAN) e da Água Intermediária Antártica (contribuição do ramo superior da APAN).

Focando-se especialmente no Oceano Atlântico Sudoeste em direção à costa sul-americana a partir da região da CBM, existe também uma região bastante complexa em termos oceanográficos que se origina pela mistura de massas d'água formadas em regiões de frentes oceanográficas de quebra de plataforma e de águas de origem continental oriundas das descargas fluviais dos estuários do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos. Autores como Miranda (1972), Ciotti *et al.* (1995), Lima *et al.* (1996), Garcia (1997), Castro e Miranda (1998) descreveram a composição das massas d'água na plataforma continental sul-sudeste do Brasil e sua relação com a descarga do Rio da Prata e Lagoa dos Patos. Recentemente, Guerrero *et al.* (2014) e Matano *et al.* (2014) realizaram estudos sobre a exportação dessas águas da plataforma para o oceano profundo. Os autores descreveram alguns processos de variabilidade espaço-temporal entre a plataforma argentina, uruguaia e sul-brasileira e o oceano profundo, utilizando dados de salinidade superficial do oceano derivados do sensor SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) e de um modelo numérico oceânico de alta resolução. Ambos estudos mostraram um padrão sazonal bem definido da salinidade, e uma marcada sazonalidade na exportação de águas costeiras de baixa salinidade para o oceano profundo. Na primavera e verão, as águas de baixa salinidade que dominam a plataforma são transferidas para o oceano aberto principalmente ao sudeste da foz do Rio da Prata. Em contraste, no outono e inverno, as águas de baixa salinidade estendem-se ao longo da costa em direção ao norte porém mantendo a exportação para o oceano aberto. Guerrero *et al.* (2014) sugerem que localização exata do

caminho de exportação das águas costeiras dependem da localização da CBM e da presença dos vórtices de mesoescala e meandros da CB.

Embora muito pouco se tenha feito no hemisfério sul, estudos sobre a variabilidade e predição climática do Oceano Atlântico são o foco do programa CLIVAR (*Climate Variability and Predictability*). Embora focado para estudar o Oceano Atlântico como um todo (obviamente incluindo-se as regiões do Ártico, Atlântico Norte, Atlântico Equatorial e Atlântico Sul), resultados recentes do programa focam quase que totalmente no hemisfério norte. O extenso trabalho de Hurrell *et al.* (2006) sobre o programa discorre sobre três fenômenos até então entendidos como centrais no estudo do clima do Oceano Atlântico como um todo: A Oscilação do Atlântico Norte (*North Atlantic Oscillation* - NAO), a Variabilidade do Atlântico Tropical (*Tropical Atlantic Variability* - TAV) e a CRMA, já descrita aqui. Segundo Hurrell *et al.* (2006), a manifestação conjunta ou independente desses fenômenos no Oceano Atlântico (principalmente Norte) produz uma série de impactos consideráveis em escalas desde a sazonal até a interanual, com consequências importantes do ponto de vista social e ambiental nos continentes.

Hurrell *et al.* (2006) descreve que o NAO é o padrão mais pronunciado e recorrente de variabilidade da circulação atmosférica, influenciando a variabilidade climática desde a costa leste americana até a Sibéria e do Ártico até o Atlântico Norte Subtropical. Segundo os autores, há um consenso de que a variabilidade atmosférica associada ao NAO é originada da dinâmica da atmosfera extratropical e bastante pronunciada na escala interanual. Os autores descrevem também que os processos de interação oceano-atmosfera no hemisfério norte determinados pelos campos de TSM e pela distribuição de gelo marinho teriam impacto na evolução temporal recente do NAO.

Considerando-se a importância dos efeitos do gelo marinho e da cobertura de neve sobre os fluxos de calor latente e sensível entre o oceano e a atmosfera e tomando o exemplo do trabalho de Deser *et al.* (2004) no Ártico, Hurrell *et al.* (2006) argumentam que seria razoável imaginar que os efeitos do gelo marinho e neve pudessem ter um papel de retroalimentação em relação às anomalias na circulação atmosférica. Deser *et al.* (2004) mostraram que mudanças na cobertura do gelo no Ártico estão correlacionadas com variações no NAO. No caso do hemisfério sul, no entanto, há relativamente menos informação. Especula-se, porém, que processos semelhantes determinados pela extensão do gelo marinho antártico, ocorram.

Parise (2014) e Parise *et al.* (2015) exploraram a sensibilidade e memória do clima global ao aumento do gelo marinho ao redor da Antártica, considerando a sua máxima persistência (concentração e espessura) sob as condições climáticas atuais. Além disso, foram avaliadas a sensibilidade da ciclogênese e ciclólise do Hemisfério Sul e os respectivos impactos no clima da América do Sul. O au-

mento do gelo marinho causou uma redução da temperatura da água do mar e do ar ao sul de 55° S e um aumento dessas nas regiões subtropicais próximas a 35° S. Esse resfriamento, devido ao aumento do transporte de calor para sul e a convergência em baixos níveis, colabora na caracterização de um padrão típico da fase positiva do Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode* - SAM), também conhecido como Oscilação Antártica (*Antarctic Oscillation*).

Segundo Marshall (2003), o SAM é o principal modo de variabilidade atmosférica do hemisfério sul, nas latitudes extratropicais e mais altas, consistindo-se de um padrão zonalmente simétrico (anular) de propriedades sincronizadas em diferença de fase entre a Antártica e as médias latitudes. A identificação desses padrões é comumente realizada através de Análises de Componentes Principais (Funções Ortogonais Empíricas) em diversos campos atmosféricos incluindo a temperatura do ar e pressão ao nível do mar, altura geopotencial e a componente zonal do vento. A fase positiva (negativa) do SAM indica que o campo de pressão sobre a Antártica é mais baixo (alto) que nas latitudes médias do hemisfério sul.

Utilizando dados de seis estações meteorológicas durante os anos de 1958 a 2000 em latitudes entre 40° S e 65° S, Marshall (2003) descreve que no período estudado houve um aumento na diferença entre os campos zonais de pressão ao nível médio do mar entre as altas (diminuindo) e as médias latitudes (aumentando), o que resulta numa tendência positiva especialmente alta a partir da década de 1970. Thompson e Solomon (2002) explicaram essa tendência positiva da SAM através do resfriamento da baixa estratosfera sobre o continente antártico, principalmente devido à diminuição das concentrações de ozônio. Em consequência, ainda segundo Thompson e Solomon (2002), acredita-se que a alteração da SAM e sua atual tendência contribuem de maneira acentuada para o aquecimento da região oeste da Península Antártica e o resfriamento da região leste do continente antártico constatado nos dias de hoje.

No cenário de tendência positiva da SAM, segundo Parise (2014) e Parise *et al.* (2015), o fluxo de calor sensível do oceano para a atmosfera é intenso nas margens do gelo marinho, onde a baroclinia da atmosfera também aumenta. A autora acrescenta que um cenário de aumento do gelo marinho faz com que os ventos de oeste se intensifiquem nas altas latitudes (sul de 50° S) e se enfraqueçam nas latitudes médias (entre 45° S e 10° S). Ainda, a corrente de jato polar se intensificaria em direção aos pólos enquanto o jato subtropical se enfraqueceria em direção ao Equador. Nesta linha, Machado *et al.* (2014) mostraram que a intensificação da tensão de cisalhamento do vento na região extratropical do hemisfério sul induz a um aumento da TSM e da temperatura do ar em médias e altas latitudes desse hemisfério, além de induzir uma redução na espessura do gelo marinho antártico, favorecendo o enfraquecimento da fase positiva da SAM.

Summerhayes (2009), discorrendo sobre o papel do ambiente antártico no sistema climático global, aponta para o fato de que, apesar da dinâmica dos processos de interação oceano-atmosfera ser bem conhecida, a complexidade do sistema global de transporte de calor e a sua relação com o gelo marinho e continental torna a predição das mudanças globais uma tarefa muito árdua. O autor lembra também que há diferenças muito grandes na circulação atmosférica e oceânica entre o hemisfério norte e o sul. Enquanto no norte a região polar é caracterizada por um oceano cercado por continentes, na Antártica ocorre o inverso. A forma quase circular do continente antártico localizada sobre o pólo sul e as características topográficas do oceano adjacente fazem com que as correntes marinhas e o fluxo atmosférico médio sejam na direção zonal.

Apesar do seu importante papel dentro dos mecanismos climáticos do planeta, o papel do Oceano Austral e adjacências e do Oceano Atlântico Sudoeste na modulação do tempo e do clima do continente sul americano tem sido investigado apenas recentemente (Diaz *et al.*, 1998; Tokinaga *et al.*, 2005; Hurrell *et al.*, 2006; Pezzi *et al.*, 2009; Takahashi *et al.*, 2009; Acevedo *et al.*, 2010; Camargo *et al.*, 2013; Pezzi *et al.*, 2016). Ainda existem muitas perguntas não respondidas. Sabe-se da importância dos estudos observacionais e da modelagem numérica para o entendimento dos papel dos processos oceanográficos do Oceano Atlântico Sudoeste no clima regional e global. Estudos enfocando a variabilidade dos campos de TSM (Lentini *et al.*, 2001, Souza *et al.*, 2006), a evolução dos campos de anomalias de TSM (Silveira *et al.*, 2011; Silveira e Pezzi, 2014) e a energética das correntes marinhas (Oliveira *et al.*, 2009; Moura *et al.*, 2011) são cada vez mais numerosos. Da mesma forma importantes, os processos de interação oceano-atmosfera ligados à dinâmica do CO<sub>2</sub> estão recebendo atenção crescente.

Em escala sinótica, o Oceano Atlântico Sudoeste tem um papel fundamental nos processo de interação oceano-atmosfera e na modulação da estabilidade da CLAM, como mostrado em Pezzi *et al.* (2005, 2009, 2016), Acevedo *et al.* (2010) e Camargo *et al.* (2013), por exemplo. Diaz *et al.* (1998) demonstraram também que a TSM dessa região oceânica, na escala climática sazonal, apresenta uma correlação negativa com a precipitação da região sul do Brasil e do Uruguai. Os autores ressaltam que, independente dos efeitos remotos de outras regiões oceânicas (por exemplo o efeito do El Niño - Oscilação Sul, ENOS), as maiores correlações acontecem entre abril e julho, quando é encontrado o sinal mais forte da modulação do Oceano Atlântico Sudoeste na precipitação. Haylock *et al.* (2006), no entanto, discordam dos resultados anteriormente mostrados por Diaz *et al.* (1998), indicando que a TSM do Oceano Atlântico Sudoeste não apresenta uma relação direta com eventos extremos de precipitação ocorridos sobre a América do Sul e o Brasil.

Segundo Turner (2009), o ENOS é o maior fenômeno climático do planeta nas escalas temporais decadal e sub-decadal, com efeitos no tempo e clima muito além da região tropical do Oceano Pacífico, onde é bem marcado. Como resultado do ENOS, um padrão de onda de Rossby atmosférica quasi-estacionária se estabelece em ambos os hemisférios do planeta, estabelecendo a teleconexão entre as altas e as baixas latitudes. O trem de ondas de Rossby do hemisfério sul é conhecido como *Pacific-South American Teleconnection* (PSA) e conecta regiões tão longínquas como o Oceano Pacífico Tropical e o Mar de Amundsen-Scott, no Oceano Austral. Embora o PSA seja primariamente relacionado ao ENOS, o fenômeno é evidente em várias escalas de tempo mesmo na ausência do ENOS. Como resposta atmosférica, existem diferentes regimes de aumento dos processos de convecção atmosférica sobre o Oceano Pacífico, assim como a sua supressão em outras regiões do planeta. Alterações na posição e intensidade do jato subtropical podem ser resultantes de trocas longitudinais na circulação de Hadley. Essas, por sua vez, são dependentes da alteração que o ENOS promove na circulação atmosférica meridional média.

Para o Oceano Atlântico Sudoeste, vários autores sugerem que os campos de TSM podem responder à variabilidade climática associada ao fenômeno ENOS. Por exemplo, Campos *et al.* (1999) encontraram dois picos de alta coerência entre a TSM e o Índice de Oscilação Sul (*Southern Oscillation Index* - SOI) nos períodos de 0,7 e 1,5 anos. A variabilidade interanual da TSM foi estudada ao longo da isóbata de 50 m entre 24° S e 38° S para o período de 1982 a 1994. Lentini *et al.* (2001) também buscaram relacionar o ENOS com as anomalias de TSM na região da plataforma continental e talude do Oceano Atlântico Sudoeste (profundidades menores que 1000 m). Os autores utilizaram 13 anos de dados de TSM obtidos através de satélites entre janeiro de 1982 e dezembro de 1994. Dentre as observações realizadas, Lentini *et al.* (2001) reportam a presença de 13 eventos frios e 7 eventos quentes imediatamente após eventos ENOS. Os resultados suportam a hipótese de que a penetração costeira de águas anormalmente frias (quentes) desde o sul até o norte geralmente ocorrem após 1 ano de cada evento El Niño (La Niña). Posteriormente, Severov *et al.* (2003) analisaram 133 anos de dados de TSM no Oceano Atlântico Sul, relacionando os eventos de El Niño (La Niña) à diminuição (aumento) da TSM na Corrente das Malvinas e ao aumento (diminuição) da TSM na CB.

Trabalhando com dados de satélites Soppa *et al.* (2011), estudaram a correlação entre as anomalias de TSM (ATSM) e o ENOS em 9 províncias biofísicas no Oceano Atlântico Sudoeste previamente definidas por Longhurst (1998) e Saraceno e Provost (2005). Os autores encontraram uma correspondência entre picos de energia nas séries de ATSM e o fenômeno ENOS, expresso pelo *Multivariate ENOS Index* (MEI). Há uma tendência para que valores extremos de ATSM no Oceano Atlântico ocorram

próximos a eventos mais fortes de El Niño ou La Niña. Isso foi especialmente evidente sobre a Corrente da Patagônia após o El Niño de 1997-1998. Os autores observaram também ATSM negativas alguns meses antes da La Niña de 1988-1989 em quase todas as províncias biofísicas estudadas. O máximo coeficiente de correlação cruzada entre o MEI e a ATSM (-0,8) ocorreu na região da CBM, com um retardo de tempo de 9 meses. Isso significa que 9 meses após um máximo de amplitude do ENSO no Oceano Pacífico Equatorial ocorre um mínimo de amplitude nos campos de ATSM na região da CBM. Os mecanismos forçantes para esse tipo de conexão estão ainda sob investigação.

Vários estudos mostraram que o Oceano Atlântico Tropical e Sul tem um papel muito importante na modulação do posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Quando esta região está anormalmente aquecida (resfriada), há um aumento (diminuição) da precipitação na região Nordeste do Brasil. Uma das principais causas disso é o deslocamento da posição da ZCIT mais para o sul (norte), descrito em vários trabalhos na literatura científica (Moura e Shukla, 1981; Nobre e Shukla, 1996; Pezzi e Cavalcanti, 2001; Kayano e Andreoli, 2011, 2012). Este fenômeno ficou conhecido pelo nome de Dipolo do Atlântico e, dependendo da fase do ENOS, este poderia ter seus impactos na modulação do clima do Nordeste do Brasil reforçados ou revertidos (Pezzi e Cavalcanti, 2001).

Por outro lado, de acordo com Bombardi *et al.* (2014), quando se consideram somente as regiões tropical e extratropical do Oceano Atlântico Sul, define-se o chamado Dipolo do Atlântico Sul. A fase negativa desse dipolo, caracterizado pela presença de anomalias positivas de TSM na região extratropical, está relacionada ao aumento na precipitação da região Sudeste do Brasil. Bombardi *et al.* (2014) argumentam que as causas desse aumento de precipitação estão relacionadas aos seguintes fatores: o deslocamento mais para o norte dos ciclones extratropicais, além de um aumento na ciclogênese próxima à região Sudeste do Brasil. Estes fatores contribuem para o estabelecimento de um mecanismo típico causador de precipitação naquela região que é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), essa última estando associada ao Sistema de Monção da América do Sul. Esses mecanismos de precipitação e seus aspectos de interação do oceano com a atmosfera são melhor discutidos na sessão 4.2 desse trabalho.

Os mecanismos de formação das anomalias de TSM na região tropical do Oceano Atlântico podem ser forçadas por mecanismos externos a esta região, por exemplo o ENOS e a NAO (Sutton *et al.*, 2000). Porém, em latitudes mais afastadas do Equador, essas anomalias podem estar associadas a uma resposta do oceano ao forçamento do vento na superfície do mar (Chang *et al.*, 2000; Kushnir *et al.*, 2002; Saravanan e Chang, 2004). Rodrigues *et al.* (2015) estudaram os impactos do ENOS sobre as anomalias de TSM do Oceano Atlântico Sul, sugerindo que a modu-



lação dessas anomalias é causada pelos modos do trem de ondas atmosféricas do PSA.

Com relação a conexões com mais altas latitudes, um esquema simplificado das relações entre a variação interanual da TSM, a pressão atmosférica ao nível do mar e a extensão do gelo marinho no hemisfério sul foi apresentado por White e Peterson (1996). Essas variáveis foram comparadas ao curso médio da CCA, e a progressão das anomalias dessas variáveis em direção a latitudes mais baixas, segundo os autores, indicam meios de comunicação entre a CCA e os giros subtropicais dos três oceanos mais ao norte (Atlântico, Pacífico e Índico). Segundo Turner (2009), White e Peterson (1996) foram os primeiros autores a descrever a Onda Circumpolar Antártica (*Antarctic Circumpolar Wave* - ACW). A ACW representa um modo de acoplamento oceano-atmosfera caracterizado por uma progressão em fase para leste das anomalias de TSM, pressão atmosférica ao nível do mar, ventos e extensão de gelo marinho no Oceano Austral. A ACW, por sua vez, se relaciona com o ENOS através de mecanismos de retroalimentação positiva (White *et al.*, 2002).

### 3. Sistemas Transientes e Mudanças Climáticas

Segundo Cavalcanti *et al.* (2009) os sistemas frontais, os ciclones, os sistemas convectivos de mesoescala (SCMs), os sistemas ciclônicos em níveis médios (“vórgula invertida”) e os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) são os distúrbios transientes que alteram a circulação atmosférica e determinam as condições de tempo da região sul do Brasil. Nessa região, assim como no sudeste, há a atuação na escala climatológica da ZCAS e de bloqueios atmosféricos que podem afetar o tempo por períodos próximos ao semanal provocando chuvas intensas. Cavalcanti *et al.* (2009) também descrevem a atuação das brisas marítimas, sistemas de circulação local totalmente dependentes das condições oceânicas vizinhas à costa.

Kaufmann e Anabor (2010, 2011) descrevem que a circulação de anticiclones transientes (ATs) transporta as massas de ar frias que avançam pela região sul da América do Sul em trajetórias tanto continentais quanto oceânicas. Os autores descrevem que frequentemente se observa a presença de nebulosidade baixa ao longo da circulação anticiclônica, e que uma ampla cobertura de nuvens rasas está relacionada à passagem de massas de ar frias e estáveis sobre águas mais quentes. Segundo Garreaud (2000), esses ATs ocorrem em média a cada 1 a 2 semanas, sendo que no inverno tanto a frequência quanto a intensidade deles é maior.

Tomando o caso dos intensos contrastes termais que ocorrem na região da CBM no Oceano Atlântico Sudoeste, Kaufmann e Anabor (2010, 2011) descrevem que as massas de ar ao cruzarem essa região experimentam uma amplificação dos processos de umidificação e instabilização em baixos níveis. Os autores mostram que, dependendo do posicionamento do anticiclone transiente, a nebulosidade

rasa formada na região da CBM é advectada para a região costeira e interior do sul do Brasil, podendo causar nebulosidade cumuliforme. A nebulosidade rasa pode causar precipitação de baixa intensidade sobre o continente (Kaufmann e Anabor, 2010, 2011).

Sob o ponto de vista meteorológico, no entanto, a região na CBM e toda a FST se encontram localizadas na região preferencial de atividade das tempestades de latitudes médias (ciclones extratropicais). Blackmon *et al.* (1977) denominaram de *Storm Tracks* (STs) essa faixa do planeta e a sua contrapartida no hemisfério norte. Localizados aproximadamente entre os paralelos de 35° e 65° em ambos os hemisférios, os STs desempenham um papel fundamental no clima do planeta, principalmente em regiões de latitudes médias e altas, por possuírem a capacidade de alterar a condição de tempo de determinada região e exercerem forte influência na precipitação, cobertura de nuvens e radiação incidente.

Além da forte ligação com características do tempo, os STs têm um papel fundamental na circulação geral da atmosfera através da sua forte influência nas trocas de calor vertical e horizontal, vapor de água e momentum (Justino, 2004; Lau, 1988). A troca de momentum na interface oceano-atmosfera é responsável pela agitação marítima que pode levar à ocorrência de ressacas e ondas de grande amplitude, provocando transtornos à navegação, operações em plataformas de petróleo e destruição de áreas costeiras (da Rocha *et al.*, 2004).

Estudos recentes já associam os STs às mudanças climáticas na América do Sul. O furacão Catarina, por exemplo, causou enormes prejuízos materiais e levantou a questão de como os processos de interação oceano-atmosfera num regime de aquecimento global podem causar efeitos catastróficos na costa sul-sudeste do Brasil (Pezza e Simmonds, 2005). Dentro do diagnóstico feito para o Catarina, além da própria dinâmica e termodinâmica da atmosfera, uma das causas sugeridas foi o deslocamento do Catarina sobre águas relativamente mais quentes do Oceano Atlântico Sudoeste que estavam presentes em sua trilha, como relatado por Davis e Bosart (2004) e McTaggart-Cowan e Bosart (2006). Vianna *et al.* (2010) demonstraram pela primeira vez como a interação do oceano com a atmosfera foi determinante no ciclo de vida do Catarina. Segundo estes autores o sistema interagiu intensamente com quatro vórtices oceânicos quentes. A água sub-superficial aflorada, por ressurgência, estava aproximadamente com a mesma temperatura da água em superfície. Esta situação termodinâmica causada tanto pela TSM quanto pelo conteúdo de calor disponível de camadas sub-superficiais dentro do vórtice quente influenciaram na maturação e intensificação do Catarina.

As tendências previstas para a costa leste da América do Sul, em um cenário de aquecimento global, podem favorecer a intensificação dos STs, aumentando a probabilidade de ocorrência dos ciclones extratropicais mais inten-

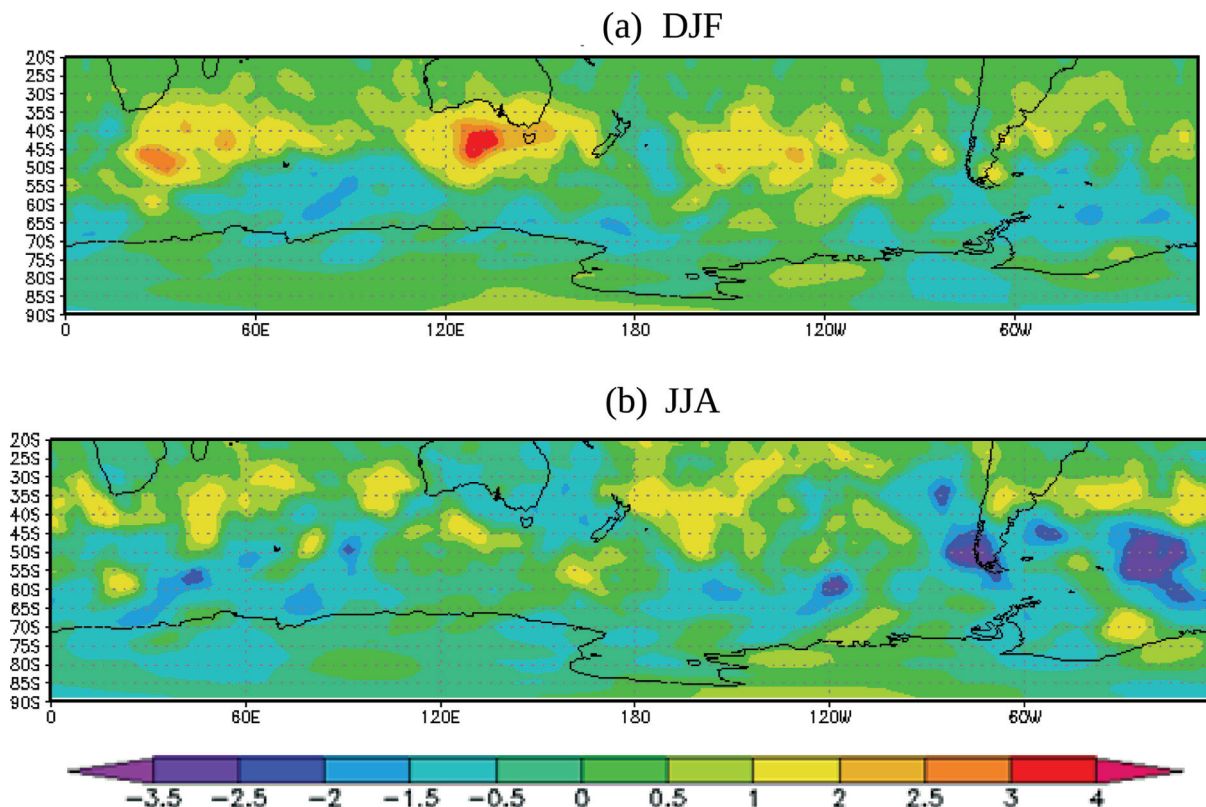


sos no Atlântico Sul. Freitas (2011), por exemplo, analisou um cenário de aquecimento global A1B (IPCC) com respeito ao cenário atual. A autora mostra, por exemplo, que os campos de anomalia do transporte meridional de calor sensível (Fig. 1) poderão sofrer mudanças consideráveis na região do Oceano Atlântico subtropical. Anomalias negativas extremamente altas serão encontradas nas latitudes abaixo da FST, especialmente sobre a Patagônia, na região da CBM e no centro do Oceano Atlântico Sul nos meses de inverno. A autora indicou que, no cenário de aquecimento global A1B, as trajetórias dos ciclones extratropicais deverão sofrer uma modificação na sua distribuição futura, provavelmente associada à redução da cobertura de gelo antártico no futuro. Como consequência, haveria o deslocamento dos STs de aproximadamente  $5^\circ$  para o sul. De uma certa forma, os resultados de Freitas (2011) apontam na mesma direção do trabalho prévio de Bengtsson *et al.* (2006), que usaram modelos globais de circulação atmosféricos mais complexos que Freitas (2011). Neste trabalho, os autores mostram que a trajetória dos ciclones seria levemente afetada em sua direção e intensidade para algumas regiões do Hemisfério Sul, tal como a América do Sul e Austrália. Bengtsson *et al.* (2006) argumentam que um aumento na intensidade dos ciclones, embora leve, estaria associado ao seu deslocamento mais para o sul dos STs.

Segundo Freitas (2011), é razoável sugerir que um aumento da baroclinia atmosférica induzida pelo aumento

do gradiente termal causado pelo contraste térmico entre o gelo e a água podem influenciar a atividade dos STs. Em latitudes médias, a alteração do transporte meridional de calor sensível na atmosfera, associado ao aumento na emissão dos gases de efeito estufa, e às variações da camada de ozônio previstas, sugere que a variação na distribuição dos STs poderá estar relacionada às mudanças nos padrões do gradiente meridional da TSM no Oceano Atlântico Sul. Essas mudanças poderão ser determinantes para o deslocamento e intensificação dos STs num cenário futuro.

Parise (2014) examina um cenário de aumento na extensão e espessura do gelo marinho antártico demonstrando uma intensificação do jato polar e uma consequente mudança nas características dos STs. A densidade de trajetórias dos ciclones, ciclogênese e ciclólise aumentará sobre as altas e médias latitudes. Porém, a atividade dos distúrbios transientes será reduzida sobre a América do Sul devido ao deslocamento das tempestades mais para o sul. No cenário examinado por Parise (2014), ocorrerá também uma redução na formação de ciclones sobre as duas principais regiões ciclogênicas no Oceano Atlântico Sul e América do Sul entre  $30^\circ$  S e  $45^\circ$  S. Uma redução da precipitação sobre a América do Sul é prevista devido ao aumento na estabilidade estática da atmosfera causado pelo enfraquecimento do jato subtropical.



**Figura 1** - Campos de anomalia do transporte meridional de calor sensível no hemisfério sul associados aos STs obtidos pela diferença entre as simulações para o futuro e presente, unidade em  $^\circ\text{C.m.s}^{-1}$ . Fonte: Freitas (2011).

## 4. Interação Oceano-Atmosfera em Escala Sinótica

### 4.1. Regiões de intenso gradiente termal oceânico

Tokinaga *et al.* (2005), Pezzi *et al.* (2005, 2009, 2016), Acevedo *et al.* (2010), Camargo *et al.* (2013), entre outros, argumentam que o entendimento dos processos de interação oceano-atmosfera no Oceano Atlântico Sul permitirá uma melhor compreensão sobre o papel desse oceano no tempo e clima da América do Sul. Os processos que ocorrem na interface entre o oceano e a atmosfera são complexos. O acoplamento no sistema oceano-atmosfera ocorre através das interações na interface entre a superfície do mar e a CLA, onde se processam as trocas de momentum, energia e gases entre os dois sistemas. O oceano suprime a atmosfera com vapor d'água e energia que, consequentemente, influenciam o ciclo hidrológico e o balanço energético da atmosfera. A atmosfera, por sua vez, fornece para os oceanos água na forma de precipitação que afeta a origem das massas d'água, além de momentum e energia calorífica, que força as ondas, as correntes geradas pelo vento e a circulação termohalina global.

A TSM exerce um papel importantíssimo no balanço de calor entre o oceano e a atmosfera pois, através dela, a energia na forma de fluxos de calor é trocada. Pequenas variações de TSM podem acarretar grandes variações nos fluxos de calor na interface oceano-atmosfera e esses, por sua vez, tem papel preponderante na manutenção do clima do planeta. Os trabalhos de Moura e Shukla (1981), Ropelewski e Halpert (1987, 1989), Nobre e Shukla (1996), Uvo *et al.* (1998), Pezzi e Cavalcanti (2001), por exemplo, demonstram a marcada influência da TSM do Oceano Atlântico tropical no clima da região nordeste do Brasil. Não obstante, a TSM também pode provocar impactos significativos no escoamento atmosférico e, por conseguinte, modular os sistemas meteorológicos na escala do tempo.

Sabe-se que os modelos numéricos climáticos são bastante discordantes entre si na simulação dos fluxos de calor, umidade e de momentum entre o oceano e a atmosfera (Wainer *et al.*, 2003). Estas discrepâncias são bastante conhecidas sobre as regiões tropicais e subtropicais do Oceano Atlântico Sul. Conhecer estes erros e tentar melhorar a representação destas variáveis em modelos numéricos ainda é um grande desafio científico. É muito importante que se aumente o número de estações, bem como a frequência temporal de amostragem *in situ* no oceano, pois isso proporcionaria um aumento no conhecimento sobre comportamento climatológico das variáveis e processos determinantes para as interações oceano-atmosfera.

Com respeito à região subtropical do Oceano Atlântico Sul, os gradientes horizontais termais produzidos na CBM na região sudoeste desse oceano são os mais intensos de todo o seu domínio espacial. Essa é a região de encontro entre as águas frias da CM e as águas quentes da

CB, é a região de formação da ACAS, uma água de mistura cujo volume domina o interior do giro subtropical do Oceano Atlântico Sul. Lá a variabilidade de mesoescala oceânica domina o padrão de variabilidade do Oceano Atlântico Sul, e sua dinâmica uma das mais altas do Oceano Global (Chelton *et al.*, 1990). Apesar de sua incontestável importância oceanográfica, poucos autores como Pezzi e Souza (2009), por exemplo, apontam para sua importância para o tempo e clima das regiões sul e sudeste do Brasil.

Medidas sobre a variabilidade oceânica e atmosférica na região CBM tem sido tomadas há mais de 10 anos pelo INPE através do PROANTAR (Programa Antártico Brasileiro). Atualmente, o projeto que mantém essas medidas é o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera (INCT Criosfera). A região do Oceano Atlântico Sudoeste tem sido amostrada anualmente pelos navios do PROANTAR, únicos navios de pesquisa brasileiros que tem capacidade para desenvolver essa derrota periodicamente. Efeitos sinóticos dos contrastes horizontais termais da região da CBM são sentidos na modulação da CLA que se ajusta localmente aos campos de altas (lado da Corrente do Brasil) e baixas (lado da Corrente das Malvinas) TSM. De maneira geral, do lado quente da frente, os ventos na atmosfera tendem a ser bem mais intensos que do lado frio, assim como a umidade é bem mais alta e a altura da camada limite é maior. Há intensos fluxos de calor e momentum no lado quente da frente em comparação com o lado frio e, por esses efeitos serem totalmente ligados à mesoescala oceânica (escalas de poucas centenas de quilômetros e poucos meses), os modelos regionais de previsão do tempo usados no Brasil não os levam em conta no momento.

Pezzi *et al.* (2005, 2009) e Acevedo *et al.* (2010) avaliaram o comportamento sinótico da CLA em função da condição termodinâmica da camada limite oceânica. Os resultados desses autores demonstram que, na ausência de sistemas atmosféricos de grande escala atuantes na região (frentes frias e ciclones extra-tropicais), os grandes contrastes termais horizontais típicos da frente oceanográfica que caracteriza a região da CBM modulam localmente a CLA. No lado norte da CBM, as águas mais quentes da CB induzem mudanças na estabilidade estática da CLA que, por sua vez, afeta a variabilidade na magnitude e intensificação dos ventos. Com isso a CLA torna-se instável e turbulenta, aumentando a transferência de momentum para baixo. O cisalhamento vertical do vento na CLA é reduzido e, consequentemente, ventos mais intensos ocorrem na superfície do mar. Uma situação oposta é verificada sobre as águas mais frias relacionadas às águas da CM: a CLA é mais estável e os ventos são mais fracos na superfície do mar.

Alguns resultados descritos, por exemplo, em Pezzi *et al.* (2005), Dourado *et al.* (2006), Russo *et al.* (2008) e Russo (2009) para a região da CBM concordam com aqueles obtidos em outras regiões do Oceano Global onde exis-

tem frentes oceanográficas fortes e bem definidas que exibem intensos gradientes de TSM como, por exemplo, no leste dos oceanos Pacífico e Atlântico Equatorial e em outras frentes oceanográficas de correntes de contorno oeste como a Corrente do Golfo e a Corrente de Kuroshio, entre outras (Pezzi e Richards, 2003; Pezzi *et al.*, 2004; Small *et al.*, 2008; Chelton e Xie, 2010; Putrasahan *et al.*, 2013a; Putrasahan *et al.*, 2013b).

A modulação na escala sinótica da CLAM pela presença de estruturas oceânicas de mesoescala no Oceano Atlântico Sul, especialmente na região da CBM e ao longo das frentes subtropicais, tem sido objeto de estudo recente por pesquisadores brasileiros. Essas estruturas, descritas com detalhe em Lentini e Souza (2009) e Souza *et al.* (2006), tem importância reconhecida no oceano devido à sua capacidade de exportar propriedades físicas, químicas e biológicas de um lado para outro das frentes oceanográficas. Das propriedades físicas, o transporte de calor, sal e momentum pelos vórtices oceânicos contribui para o equilíbrio dinâmico das correntes marinhas associadas e para a manutenção das propriedades conservativas das massas d'água dos oceanos (temperatura e a salinidade).

Estudos prévios sobre o papel de estruturas oceânicas de mesoescala na modulação da CLAM foram realizados por Lindzen e Nigam (1987), Tokinaga *et al.* (2005) e Small *et al.* (2008). Esses autores demonstram que meandros e vórtices podem ser responsáveis por intensas trocas de calor entre o oceano e a atmosfera. Para o Oceano Atlântico Sul, Souza *et al.* (2010) descreveram pela primeira vez alguns processos de interação oceano-atmosfera sobre estruturas oceânicas de mesoescala. Os autores utilizaram dados de radiossondas, batitermógrafos descartáveis (XBTs) tomados *in situ* no Oceano Atlântico Sul através de navios brasileiros no âmbito do PROANTAR e da I Comissão Oceanográfica Trans-Atlântica (BR-1). A Comissão BR-1 marcou o batismo do Navio Hidro-Oceanográfico Cruzeiro do Sul e a primeira realização pelo Brasil de um cruzeiro de pesquisa ao longo da Frente Subtropical no paralelo de 30° S onde o INPE realizou as primeiras medidas do sistema acoplado oceano-atmosfera durante uma derrota entre o Brasil e a África do Sul entre os dias 19 de outubro e 16 de novembro de 2009.

Usando dados recolhidos no PROANTAR, Souza *et al.* (2010) analisaram dados recolhidos *in situ* entre os dias 3 e 5 de novembro de 2009 sobre um vórtice oceânico quente desprendido da CB que estava presente na região fria da CBM. Os campos de TSM presentes na região da CBM na época e as estimativas de fluxo de calor latente e sensível baseadas no algoritmo proposto por Fairall *et al.* (1996) sobre esse vórtice podem ser vistas na Fig. 2. Os fluxos de calor sobre o vórtice (localizado próximo a 42,5° S) se assemelham àqueles encontrados sobre as águas quentes da CB (entre 36° S e 38° S). Isso é

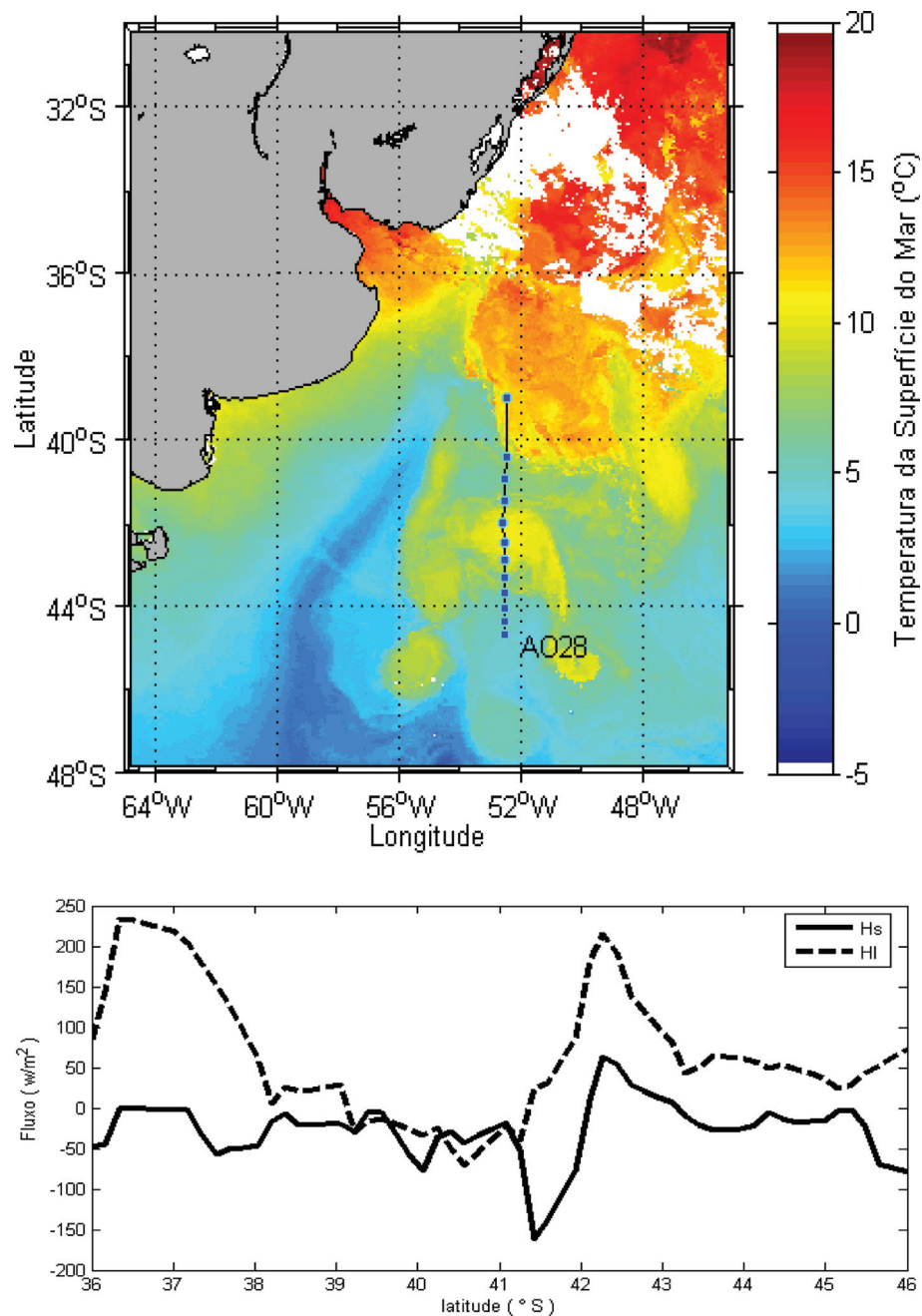
especialmente válido para os fluxos de calor latente, que são próximos a 200 W.m<sup>-2</sup> na CB e sobre o vórtice quente, decrescendo para cerca de zero ou negativos (fluxos para o oceano) sobre as águas frias da CM nas latitudes entre 38° S e 41° S.

Arsego *et al.* (2011) desenvolveram um método alternativo para calcular a energia calorífica contida na CLA na região acima do vórtice quente descrito em Souza *et al.* (2010). O método leva em conta a comparação entre uma sondagem atmosférica realizada sobre as águas frias circundantes e outra sobre o vórtice (Fig. 3). Dessa forma, para o caso apontado acima, estimou-se que o vórtice oceânico quente em questão transferiu para atmosfera uma energia na forma de calor latente de  $2 \times 10^{17}$  J. O método, no entanto, indica que a energia na forma de calor sensível na CLA foi negativa (da atmosfera para o oceano) com valores próximos a  $-3,5 \times 10^{16}$  J. Uma estimativa inicial baseada no volume do vórtice e seu conteúdo de energia calorífica calculado segundo Souza *et al.* (2006) indica que a energia transferida na forma de calor latente para a atmosfera corresponde a aproximadamente 0,08% da energia total do vórtice estudado. Essa estimativa é, ao que se sabe, a primeira na literatura da percentagem de energia calorífica contida em um vórtice que é perdida para a atmosfera e não para águas circundantes.

Souza *et al.* (2010) também descrevem as primeiras estimativas de fluxos de calor realizadas com dados tomados *in situ* a partir de um navio brasileiro ao longo da Corrente Sul Atlântica (CSA) no paralelo de 30° S (Fig. 4). Nota-se claramente que o acoplamento entre oceano e atmosfera é modulado localmente pela variabilidade de mesoescala (meandramento da CSA) vista nos campos de TSM e no perfil de temperatura da água em função da profundidade. Do lado oeste do Oceano Atlântico Sul ao longo do paralelo de 30° S, fluxos de calor latente ultrapassam 200 W.m<sup>-2</sup> sobre águas quentes enquanto que, sobre águas frias esses fluxos são baixos ou negativos. Do lado leste do Oceano Atlântico Sul os picos de fluxos de calor latente variam entre 50 a 170 W.m<sup>-2</sup> acima de águas quentes. Os fluxos de calor sensível são sempre baixos, porém ainda apresentam picos relacionados a locais com alta TSM.

A Fig. 4 mostra ainda uma assinatura típica do acoplamento sinótico entre o oceano e a atmosfera comprovada para a região da CBM por Pezzi *et al.* (2005, 2009), onde a altura da CLA diminui sobre águas frias, sendo essa mais estável e com ventos convergentes. Nas camadas superiores do oceano, os meandro frios da CSA ocasionam o esperado soerguimento da termoclina que, por sua vez, tem papel fundamental para a entrada de nutrientes do oceano mais profundo para a camada fótica do oceano. Observa-se também que as estimativas de fluxo de calor, principalmente calor latente, seguem um padrão oscilatório que esta diretamente relacionado com o padrão local de meandramento da CSA.



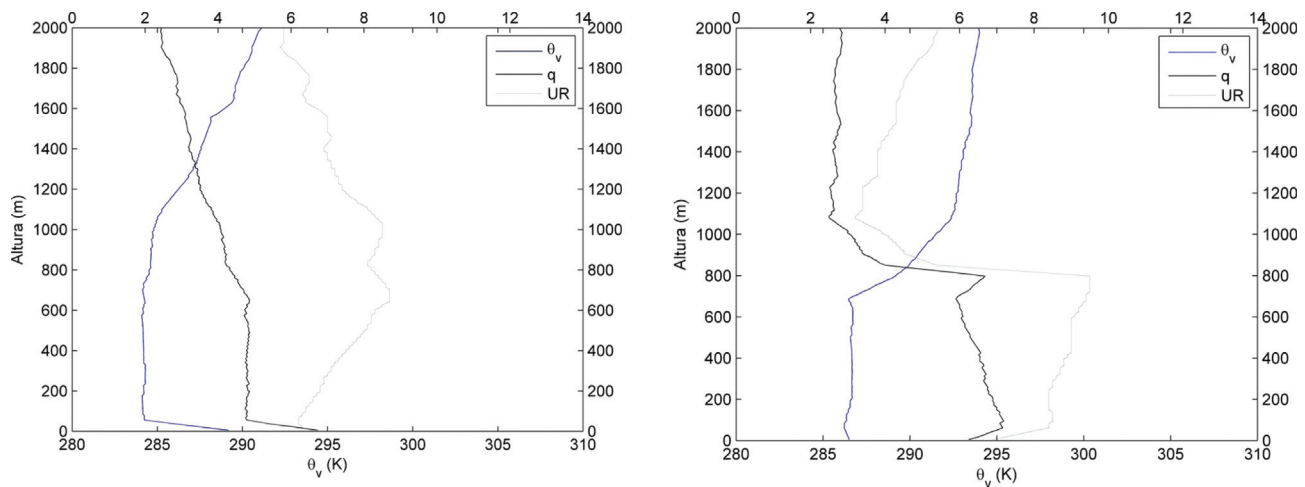


**Figura 2** - (acima) Imagem de TSM média do mês de novembro de 2009 para a região da Confluência Brasil-Malvinas no Oceano Atlântico Sudoeste, com os locais de lançamentos de radiossondas ao longo da derrota do NApOc. Ary Rongel no mesmo mês. Um vórtice quente desprendido da Corrente do Brasil está centrado em 42,5° S, 52° W. (abaixo) Fluxos de calor sensível (Hs) e latente (HI) em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  estimados ao longo da derrota do navio.

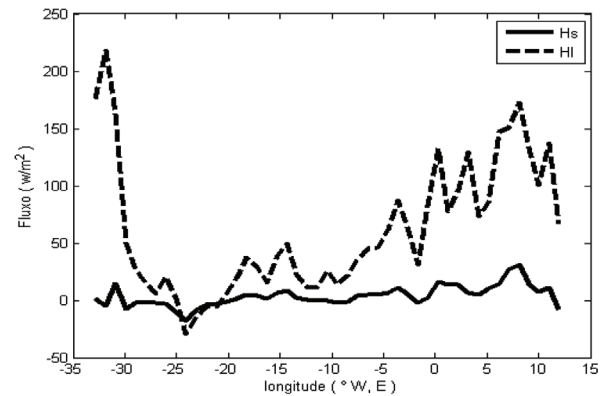
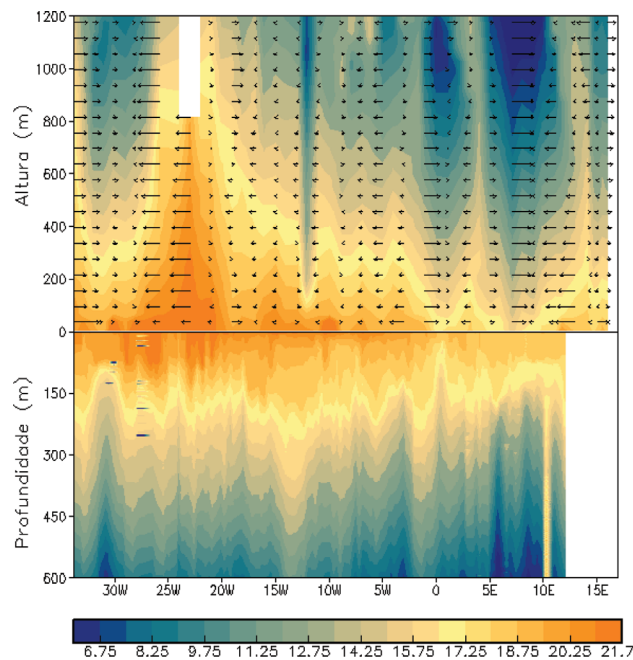
#### 4.2. Sistema de Monção na América do Sul e a zona de convergência do Atlântico Sul

A reversão na direção dos ventos em baixos níveis em função da estação do ano é um fator determinante para o clima de algumas regiões tropicais do planeta. Este esquema de circulação atmosférica que afeta as características precipitação, determina a ocorrência de verões úmidos e invernos secos. Estas reversões na circulação ocorrem principalmente devido ao surgimento de intensos gradientes termiais devido a diferença de aquecimento entre o conti-

nente e regiões oceânicas adjacentes, seguindo a marcha sazonal climática (Trenberth *et al.*, 2006). Esta reversão na circulação atmosférica em baixos níveis é denominado de monção e já foi objeto de estudo de vários autores como Moran e Morgan (1986), Trenberth *et al.* (2006), Zhang e Wang (2008), Gan *et al.* (2009). As principais regiões onde o sistema de monção ocorre estão localizadas na Ásia e Austrália, na África e nas Américas (Trenberth *et al.*, 2006; Zhang e Wang, 2008).



**Figura 3** - Perfis de temperatura potencia virtual ( $\theta_v$ ), umidade específica ( $q$ ) e umidade relativa (UR) obtidos para uma sondagem realizada sobre o vórtice quente desprendido da Corrente do Brasil (Radiossonda numero 8, esquerda) e para uma sondagem realizada em águas frias circundantes (Radiossonda numero 12, direita) na região da Confluência Brasil-Malvinas indicada na Figura 2. Posição e horário de lançamento das radiossondas: (Radiossonda numero 8, esquerda) 42,47° S, 52,50° W, início 03 Novembro de 2009 às 18:38 UTC; (Radiossonda numero 12, direita) 44,02° S, 52,50° W, início 04 Novembro de 2009 às 02:33 UTC.



**Figura 4** - (esquerda) Perfil de temperatura do ar e da água do mar (°C) ao longo do paralelo 30° S obtido a partir de dados observacionais de XBTs e radiossondas recolhidos durante a Comissão BR-1 no Oceano Atlântico Sul entre os dias 19 de outubro e 16 de novembro de 2009. (direita) Fluxos de calor sensível ( $H_s$ ) e calor latente ( $H_l$ ) em  $W.m^{-2}$  estimados a partir dos dados da Comissão BR-1.

A sazonalidade verificada na circulação atmosférica em baixos níveis da América do Sul, no passado, não era reconhecida como um padrão clássico de monção devido a não reversão dos ventos (Webster *et al.*, 1998; Gan *et al.*, 2009). Porém estudos mais recentes (Marengo *et al.*, 2001; Jones e Carvalho, 2002; Gan *et al.*, 2004) mostraram que o Sistema de Monção na América do Sul (SMAS) ocorre associado a uma inversão no sentido das anomalias do vento zonal em baixos níveis, sendo estes de leste durante a

estação seca (fase inativa da Monção) e invertendo para oeste durante a estação chuvosa (fase ativa da Monção). Uma revisão abrangente e detalhada sobre o SMAS pode ser vista em Gan *et al.* (2009) e nas referências encontradas lá.

O SMAS, por ser considerado como o principal mecanismo para o transporte de umidade da região amazônica e norte do Brasil para a região central da América do Sul, contribui diretamente para a configuração da ZCAS (Ca-

sarin e Kousky, 1986; Kodama 1992, 1993; Kodama *et al.*, 1997; Grimm, 2011; Quadro *et al.*, 2012). Jones e Carvalho (2002), por exemplo, mostraram que variações intrazonais nos ventos de baixos níveis sobre Amazônia modulam o SMAS e que os casos mais intensos de ZCAS estão relacionados a regimes de ventos de oeste, associados à fase ativa do SMAS. A ZCAS é um fenômeno atmosférico que ocorre no verão da América do Sul e é caracterizado por uma acentuada região de convergência em baixos níveis e pela persistência de uma banda de nebulosidade orientada no sentido noroeste-sudeste (NW-SE). Ela se estende desde o centro sul da Amazônia, regiões Centro-Oeste e Sudeste, centro sul da Bahia, norte do Estado do Paraná e alongando-se em direção ao Oceano Atlântico Sudoeste (Ferreira *et al.*, 2004). Uma das principais consequências da atuação da ZCAS é a ocorrência dos altos índices pluviométricos, principalmente no final da primavera e nos meses de verão, nas regiões afetadas (Grimm, 2011; Quadro *et al.*, 2012).

Portanto, o SMAS e a ZCAS modulam o ciclo sazonal da precipitação sobre a América do Sul tropical em distintas estações seca e chuvosa em uma região compreendida entre o equador e 25° S (Silva, 2009). Gan *et al.* (2004) mostram que de 50% da precipitação anual sobre a América do Sul tropical e subtropical ocorre nos meses de verão austral (dezembro a fevereiro) e cerca de 90% durante os meses de outubro a abril. Marengo (2005), analisando a variabilidade temporal e espacial do balanço de umidade na região da bacia amazônica e arredores, mostrou que os períodos de primavera e verão apresentam forte convergência de umidade encontrada ao longo da ZCAS.

Grimm *et al.* (2007) sugerem que, ao chegar no final da estação seca do Centro-Oeste e Sudeste do Brasil no final da primavera, a baixa quantidade de nebulosidade no decorrer desta estação acabaria por favorecer o aumento radiação solar líquida em superfície sobre a região costeira do Oceano Atlântico Sudoeste. Esta situação, por sua vez, acabaria por favorecer o abaixamento da pressão, o aumento da convergência em baixos níveis e uma circulação anômala ciclônica no sudeste do Brasil. Essas características todas, associadas a um aumento na convecção, tendem a aumentar a precipitação na região Centro-Oeste do Brasil (Grimm *et al.*, 2007) e desenvolver configurações atmosféricas que acabam por favorecer o estabelecimento da ZCAS.

Vários autores relatam que a ZCAS pode ocorrer associada a outros fenômenos atmosféricos e oceânicos, sendo influenciada por fatores locais ou remotos (Kodama, 1992; Kodama, 1993; Kodama *et al.*, 1997; Grimm e Silva Dias, 1995; Grimm, *et al.*, 2007; Nogués-Paegle e Mo, 1997; Jones e Horel, 1990; Marton, 2000; Chaves e Nobre, 2004; Pezzi *et al.*, 2008; Quadro *et al.*, 2012; Nobre *et al.*, 2012; Jorgetti *et al.*, 2014). Por exemplo, sistemas frontais na região de ocorrência da ZCAS podem interagir com vórtices ciclônicos de altos níveis de escala subsinótica

(Nobre, 1988). Oscilações de 30 a 60 dias podem gerar perturbações atmosféricas que servem de gatilho para convecção associada a ZCAS (Casarin e Kousky, 1986) e explosões convectivas sobre o Brasil Central e sul da Amazônia, responsáveis pela geração da zona de convergência em baixos níveis (Figueroa e Nobre, 1990).

Nos últimos anos também foram realizados trabalhos de modelagem numérica para simulação da ZCAS nas suas componentes atmosférica e oceânica (Chaves e Satyamurty, 2006; Chaves e Nobre, 2004; Pezzi *et al.*, 2008; Nobre *et al.*, 2012) e estudos da variabilidade da ZCAS nas suas diversas escalas espaciais e temporais (Carvalho *et al.*, 2004; Ferreira *et al.*, 2004; Grimm e Zilli, 2009).

Os trabalhos de Chaves e Nobre (2004), Grimm *et al.* (2007), Nobre *et al.* (2012) e Jorgetti *et al.* (2014) ressaltam a importância das anomalias da TSM no transporte de umidade que origina e sustenta a ZCAS. Estes trabalhos sugerem que o Oceano Atlântico tem uma importante contribuição para o aquecimento do ar na camada limite atmosférica e a consequente convergência de massa na região. Nobre *et al.* (2012) discutem fatos interessantes sobre o esquema de interação oceano-atmosfera da ZCAS em sua porção marítima. Esses autores, assim como outros (Grimm, 2003; Robertson e Mechoso, 2000), argumentam que esta parte da ZCAS ocorre preferencialmente sobre as águas superficiais do Oceano Atlântico Sudoeste mais frias. Este fato seria um contraponto ao que ocorre na região equatorial aonde ocorre a ZCIT. Esta última, acompanha as águas superficiais mais quentes, resultando então em um modo termal acoplado direto, ou seja na região onde o oceano fornece mais calor para atmosfera ocorre uma maior convecção, caracterizando assim a ZCIT.

No esquema da ZCAS, Chaves e Nobre (2004) e Nobre *et al.* (2012) descrevem resultados numéricos e propõem um processo inverso. Ou seja, a ZCAS tende a intensificar (enfraquecer) quando está localizada sobre águas anormalmente quentes (frias). Porém, uma vez que a ZCAS se estabeleça, a presença da banda de nebulosidade condicionaria o resfriamento de águas superficiais do Oceano Atlântico Sudoeste devido à atenuação na chegada de radiação de ondas curtas na superfície oceânica, atribuída tanto à presença de nuvens como à entrada de água doce proveniente da precipitação no oceano.

## 5. Trocas de Dióxido de Carbono na Interface Oceano-Atmosfera

As trocas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que ocorrem na interface oceano-atmosfera são uma das componentes mais importantes do ciclo do carbono antropogênico e natural global (IPCC, 2013). Em escalas de tempo longas (multi-decenais a milhares de anos), a transferência do CO<sub>2</sub> com origem em águas profundas é um fator crítico para regular a concentração desse gás na atmosfera, bem como para regular as oscilações climáticas entre as eras climáticas



geladas e as relativamente quentes. Cerca de um terço do  $\text{CO}_2$  emitido pela queima de combustíveis fósseis na era industrial já foi absorvido pelos oceanos (Canadell *et al.*, 2007). O aumento das concentrações atmosféricas de  $\text{CO}_2$  ocorrido desde 1850 foi suficiente para provocar uma mudança de sinal do papel global dos oceanos no balanço de carbono. Antes das grandes perturbações antropogênicas causadas após a Revolução Industrial, os oceanos tinham o papel global de principais emissores de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. Nos dias de hoje, o Oceano Global, em termos médios espaciais, passou a ser um sumidouro de carbono (Sabine *et al.*, 2004). Atualmente não existem grandes controvérsias nem mesmo em relação à magnitude da absorção do carbono pelos oceanos em termos globais, estima-se que a absorção global de carbono pelos oceanos esteja em torno de  $2 \text{ Pg C.ano}^{-1}$  (Canadell *et al.*, 2007).

O Efeito Estufa ocorre devido à presença dos gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera. Esses absorvem a radiação infravermelha terrestre e reemitem parte dela de volta à superfície terrestre e à atmosfera, aquecendo o sistema terrestre. As mudanças no regime climático são atribuídas, em grande parte, à absorção da radiação infravermelha acima dos níveis naturalmente esperados. Observações recentes têm mostrado um aumento na concentração dos principais GEE ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) na atmosfera devido às atividades humanas (IPCC, 2013). As emissões antropogênicas de  $\text{CO}_2$  devem-se principalmente ao uso de combustível fóssil e mudanças no uso do solo, enquanto que as emissões de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  estão relacionadas à agricultura. Este aquecimento ligado às atividades humanas tem um papel determinante no clima do planeta Terra, alterando tanto a circulação atmosférica como a oceânica, a precipitação global e o nível médio do mar. O conhecimento sobre a distribuição latitudinal dos GEE é de grande importância nos estudos dos processos químicos e dinâmicos que controlam as concentrações destes gases na atmosfera. Existem grandes incertezas quanto ao balanço de  $\text{CO}_2$  no sistema oceano-atmosfera. Muito dessas incertezas provém de incertezas nas estimativas indiretas do fluxo de  $\text{CO}_2$ . Com isso, a habilidade dos modelos em prever os níveis futuros de  $\text{CO}_2$  é limitada e, portanto, falha-se em prever as mudanças climáticas com uma melhor precisão (Jiang *et al.*, 2008).

Muito mais difícil do que estimar a absorção global de  $\text{CO}_2$  é compreender os processos físicos regionais envolvidos na determinação destes fluxos. A acurácia de estudos regionais é geralmente limitada pela deficiência em se resolver adequadamente a velocidade de transferência dos gases. Por exemplo, os modelos numéricos de transferência de gás mais utilizados diferem por fatores de três ou mais (Banerjee e MacIntyre, 2004). Isso se reflete em incertezas de pelo menos 300%, como mostrado em recentes tentativas de calcular o fluxo líquido de  $\text{CO}_2$  nos oceanos (Donelan *et al.*, 2002; Takahashi *et al.*, 2002). Tais incertezas são devidas às características altamente variáveis de fatores

correlacionados como ventos, ondas, surfactantes e a convecção termal ou estratificação. Soma-se a isto o fato de que o estado atual da superfície do mar é, não raramente, defasado temporalmente e espacialmente em relação ao vento superficial (forçante).

Apesar de que o Oceano Global, na média, ser considerado um sumidouro de  $\text{CO}_2$ , a distribuição desse gás no oceano apresenta uma grande variabilidade espacial e temporal (Takahashi *et al.*, 2002, 2009). De acordo com esses autores, a diferença entre a pressão parcial de  $\text{CO}_2$  entre o oceano e a atmosfera ( $\Delta p\text{CO}_2$ ) é o mecanismo termoquímico que direciona o sentido do fluxo do  $\text{CO}_2$  na interface oceano-atmosfera. As regiões oceânicas onde a concentração superficial do  $\text{CO}_2$  é maior do que as concentrações atmosféricas se caracterizam como regiões fontes de  $\text{CO}_2$ . Este é o caso em grande parte dos Oceanos Pacífico e Atlântico Tropical, sendo que essa situação é mais acentuada no Pacífico Equatorial Leste. Por outro lado, as regiões denominadas de sumidouros de  $\text{CO}_2$  são aquelas onde a concentração atmosférica de  $\text{CO}_2$  passa a ser maior do que a superficial oceânica. Nesse caso ocorre uma transferência desse gás no sentido atmosfera-oceano. Por exemplo, essa é a situação verificada tanto no Oceano Atlântico Norte quanto no Oceano Atlântico Sul.

De maneira geral Takahashi *et al.* (2002) reporta que os oceanos tropicais representam fontes de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera, enquanto que regiões oceânicas de médias e altas latitudes absorvem o  $\text{CO}_2$  atmosférico, sendo considerados sumidouros de  $\text{CO}_2$ . No entanto, as estimativas dos saldos de transferência entre cada bacia oceânica e a atmosfera variam bastante, com grandes incertezas (LeQueré e Metzl, 2003). A redução destas incertezas representará um grande avanço para o estudo de cenários climáticos futuros, particularmente com respeito a projeções de acumulação de  $\text{CO}_2$  na atmosfera.

Segundo LeQueré e Metzl (2003), a região sumidoura de  $\text{CO}_2$  do Oceano Austral é aquela que mais contribui para as incertezas nas predições globais da troca de  $\text{CO}_2$  entre o oceano e atmosfera. Para minimizar esse fato, pesquisas recentes objetivam medir a magnitude do sumidouro de carbono no Oceano Austral (Metzl *et al.*, 2006; Roy *et al.*, 2003). Recentemente, LeQueré *et al.* (2007) mostraram que a capacidade dessa região em absorver o  $\text{CO}_2$  atmosférico vem diminuindo como consequência de menores magnitudes do vento associadas às mudanças climáticas.

Bianchi *et al.* (2009) descrevem o balanço anual e a variabilidade dos fluxos de  $\text{CO}_2$  entre o oceano e a atmosfera na região patagônica do Oceano Atlântico Sudoeste. Os autores utilizaram dados tomados *in situ* a partir de navios entre 2000 e 2006. A relação entre os fluxos e a presença das frentes oceanográficas de quebra de plataforma, assim como com a distribuição de clorofila superficial associada a essas frentes foi também estudada. Os autores reportam que a sua região de estudo no Atlântico Sudoeste representa uma das maiores áreas sumidouros de

CO<sub>2</sub> do oceano global, apresentando uma média anual da  $\Delta p\text{CO}_2$  de -31 matm. A média do fluxo de CO<sub>2</sub> entre o oceano e a atmosfera é de  $-3.7 \times 10^{-3} \text{ mol.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Em termos espaciais e de variabilidade sazonal, entre a primavera e o outono a região próxima à costa age como uma fonte de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Em contraste, na mesma época do ano, a região patagônica mais afastada da costa e de quebra de plataforma atua como sumidouro de CO<sub>2</sub>. A correlação negativa entre  $\Delta p\text{CO}_2$  e a concentração de clorofila estimada por satélite leva a crer que a fotossíntese é o principal mecanismo responsável pelas altas taxas de sequestro de carbono médio na área de estudo.

A variabilidade sazonal e interanual dos blooms fitoplânticos de cocolitoforídeos na região de quebra de plataforma continental argentina entre 38° S e 52° S foi estudada por Signorini *et al.* (2006). Os blooms de cocolitoforídeos dessa região do oceano global, comumente dominados pela espécie *Emiliania huxleyi*, tem impactos importantes na taxa de sequestro de carbono da atmosfera para o oceano, uma vez que suas carapaças de calcita necessitam de carbono inorgânico para serem produzidas. Signorini *et al.* (2006) basearam suas análises em mapas de concentração de clorofila-a, calcita, TSM, hidrografia, dados biológicos tomados *in situ* e outros dados pretéritos. Os autores reportam que as trocas sazonais na estratificação da coluna d'água causam a variabilidade sazonal e a sucessão ecológica dos blooms de cocolitoforídeos na região de estudo. Os impactos da estratificação da coluna d'água são sentidos pela comunidade fitoplântica através da variabilidade da intensidade da luz na água e da disponibilidade de nutrientes na camada fótica.

Garcia *et al.* (2011) também evidenciaram a presença de intensos blooms de *Emiliania huxleyi* nas águas de plataforma continental no sul da Argentina. A esses blooms associam-se altas concentrações de calcita (carbono inorgânico particulado) e relativamente baixas concentrações de clorofila. Por conta das interações desses constituintes da água do mar com a radiação incidente na faixa visível do espectro eletromagnético, os autores chamam a atenção para o fato de que os algoritmos operacionais da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) superestimam as concentrações de clorofila para essa parte do oceano global.

De acordo com Windom *et al.* (2009) não somente a região patagônica, mas as porções próximas às margens continentais do sul do Brasil, Uruguai e norte da Argentina no Oceano Atlântico Sudoeste, são provavelmente as maiores regiões sumidouros de carbono do Oceano Atlântico, estando entre as maiores do oceano global. O importante papel do fitoplâncton em sustentar esse sumidouro de carbono depende da sua grande produção primária que, por sua vez, depende das condições únicas que combinam a disponibilidade de micronutrientes provenientes do Oceano Austral com outras fontes (especialmente de ferro) de várias origens regionais. Esta fonte também inclui a água subter-

rânea que deságua nas regiões costeiras. O carbono líquido sequestrado pela água do mar ao longo das margens continentais parece ser exportado ao oceano aberto ao longo da FST (Windom *et al.*, 2009).

## 6. Desdobramentos Econômicos: A Pesca da Sardinha na Costa Sul-Sudeste Brasileira

A relação entre variáveis oceanográficas e o ciclo de vida da sardinha no litoral brasileiro tem sido investigada desde a década de 1950. Por ser uma espécie confinada à região costeira do Brasil entre os estados do Rio de Janeiro (RJ) e Santa Catarina (SC) e devido a sua grande biomassa, a sardinha verdadeira (*Sardinella brasiliensis*) é um dos recursos vivos mais importantes para a pesca no Brasil. Gigliotti *et al.* (2010), utilizando dados pretéritos coletados entre 1976 e 1993, determinaram os padrões espaciais de ocorrência e distribuição de ovos da sardinha e demonstraram que as maiores concentrações desse recurso vivo estão localizadas entre Paranaguá (PR) e São Sebastião (SP). Casos de expansão e retração de hábitat para a sardinha foram descritos pelos autores, que determinaram uma relação entre esses casos e flutuações nos campos de TSM locais. Em 1993, por exemplo, ocorreu uma expansão do hábitat da sardinha relacionado a anomalias de TSM nulas ou levemente negativas. Em janeiro de 1988 e 1991, por outro lado, ocorreu uma contração do hábitat da espécie para sua posição mais extrema ao sul, sendo as anomalias de TSM positivas por sobre a plataforma continental sudeste do Brasil. Os autores descrevem que a sardinha é capaz de procurar ambientes mais apropriados para a sua desova, e que isso depende de processos oceanográficos ligados ao aporte das águas subsuperficiais da ACAS.

Soares *et al.* (2011) descrevem que existem fortes evidências entre eventos de grande captura da sardinha verdadeira com processos oceanográficos que modulam a interação oceano-atmosfera no Atlântico Sudoeste. Estudos de caso realizados por esses autores revelaram que a captura máxima da sardinha verdadeira na plataforma continental sudeste do Brasil parece ser modulada pelos campos de TSM no ano anterior à captura. Anomalias negativas de TSM nessa região do Oceano Atlântico Sudoeste podem ser uma resposta ao aumento da cobertura de nuvens e à redução da incidência de radiação de ondas curtas. Se essas condições predominarem em um ano anterior à pesca da sardinha, elas podem levar a um máximo de captura. Esta situação pode assumir uma configuração diferente, em anos onde a anomalia de TSM seja positiva um ano antes do período de captura mínima. Segundo Bakun e Parish (1990), a estratégia reprodutiva da sardinha verdadeira favorece uma desova em oceano estável (estratificado) e enriquecido (altas concentrações de nutrientes e oxigênio), o que facilita a retenção e o desenvolvimento das larvas.

Soares *et al.* (2011), pela primeira vez sugerem que a estrutura espacial do habitat de desova da sardinha ver-

dadeira é uma consequência de determinadas interações oceano-atmosfera, ao invés de ser exclusivamente dependente de processos puramente oceanográficos. Os autores argumentam que a produção da sardinha depende de processos físicos e termodinâmicos ligados aos processos de interação oceano-atmosfera, sendo mais complexos do que o sugerido por Bakun e Parish (1990).

Nessa mesma linha de estudo, Dias *et al.* (2014) mostraram que a sardinha verdadeira é capaz de explorar áreas adequadas para a sua desova, adaptando-se à variabilidade interanual do clima oceânico. Os autores investigaram a influência da temperatura da coluna d'água, da presença da ressurgência de Cabo Frio (RJ) e da circulação oceânica superficial sobre o processo de desova. A ressurgência de Cabo Frio, um fenômeno determinado pela prevalência dos ventos de norte-nordeste sobre a costa dessa região típica dos meses de verão (Valentin, 2001), desempenha um papel importante na modulação das zonas de desova sardinha por causar um decréscimo da temperatura da coluna d'água para baixo da média por conta da intrusão de ACAS em regiões de águas rasas. Isso tem uma influência direta na sobrevivência das larvas e sobre a variabilidade interanual do processo de desova da sardinha verdadeira. As condições hidrodinâmicas e termodinâmicas oceânicas que dependem também da ação e interação com a atmosfera são cruciais na determinação do local mais adequado para a desova e consequente sobrevivência das larvas dessa espécie.

Pinaya *et al.* (2015) analisaram a influência da variabilidade ambiental marinha nas capturas da sardinha verdadeira na costa sul-sudeste do Brasil entre 1985 e 2006. Usando dados de satélites e reanálises para compor séries mensais de anomalias de TSM e Transporte de Ekman, além de séries de tempo de índices climáticos como o Índice de Oscilação Antártica (OA), o Índice Multivariado de El Niño (MEI) e o Índice do Gradiente Inter-Hemisférico de TSM (GITA), os autores relacionaram esses parâmetros físicos com dados de Captura por Unidade de Esforço (CPUE) obtidos para as regiões de desembarque em Santos (SP) e Itajaí (SC). Anomalias negativas (positivas) das componentes zonal e meridional do vento, assim como do Transporte de Ekman tendem a causar uma diminuição (aumento) da CPUE da sardinha verdadeira. Por outro lado, anomalias negativas (positivas) da TSM tendem a causar um aumento (diminuição) da CPUE. O estudo de Pinaya *et al.* (2015) corrobora trabalhos anteriores, como por exemplo Soares *et al.* (2011) e Dias *et al.* (2014). Todos eles mostram a importância da variabilidade climática marinha na dinâmica pesqueira da sardinha e atestam a importância desse conhecimento para a economia brasileira e para o manejo sustentável desse importante recurso vivo.

## 7. Considerações Finais

Ainda há muito o que se pesquisar para melhor compreender o papel do Oceano Atlântico Sul no tempo e no

clima do Brasil. Questões mais agudas dizem respeito ao papel da variabilidade climática marinha e da mesoescala oceânica, especialmente expressa através da TSM, na modulação espaço-temporal da CLAM e no tempo meteorológico das regiões costeiras do país, cuja linha de costa tem cerca de 7370 km de extensão. Lembrando que dados (em geral parametrizados) de fluxos de calor entre a atmosfera e o oceano são variáveis imprescindíveis para a previsão do tempo e clima, o estabelecimento de programas de observação para suprir essa demanda é não somente necessário, mas imperativo. Vale-se lembrar que os mecanismos forçantes da variabilidade espaço-temporal da TSM e de suas anomalias dependem, entre outras coisas, das características oceanográficas locais e que o Brasil, ao longo de sua costa desde a região tropical no norte-nordeste até as subtropicais ao sul do país, tem regimes oceanográficos muito distintos e muitas vezes pouco conhecidos.

Outra questão importante ainda em aberto diz respeito ao balanço de CO<sub>2</sub> entre o oceano e a atmosfera e também entre os ecossistemas costeiros e a atmosfera. Nos dias de hoje, existe no Brasil ainda uma completa falta de informação sobre a variabilidade dos fluxos de carbono em ambientes costeiros vulneráveis como os estuários, manguezais, pântanos salgados, pradarias submersas e outros. Segundo Twilley *et al.* (1992), além de terem importância primária para a manutenção da produtividade costeira (interferindo na produção pesqueira e economia associada, conforme discutido na sessão 6 desse trabalho), as margens continentais têm grande impacto no fluxo global de carbono. Twilley *et al.* (1992) descrevem que cerca de 50% de todo o material terrígeno descarregado ao oceano global tem origem em apenas 21 grandes sistemas fluviais do planeta. A importância das regiões tropicais da biosfera, segundo os autores, é ainda mais acentuada pois as áreas costeiras dessas regiões são as mais ativas do ponto de vista biogeoquímico e representam importantes regiões sumidoras de carbono da biosfera.

No Brasil, os únicos programas operacionais de observação da interface oceano-atmosfera são atualmente conduzidos sob o guarda-chuva do Programa GOOS-Brasil (*Global Ocean Observing System*, Brasil - [www.goosbrasil.org](http://www.goosbrasil.org)). Esse programa, dirigido ao oceano profundo, por sua vez faz parte da rede OCEATLAN (Aliança Regional para a Oceanografia no Atlântico Sudoeste Superior e Tropical) que mantém os programas operacionais PIRATA (*Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*) e PNBoia (Programa Nacional de Boias).

O PIRATA é um programa que existe desde 1997 para a observação de parâmetros oceanográficos e meteorológicos no Oceano Atlântico Tropical utilizando boias ancoradas. O programa é mantido por uma parceria entre o Brasil, a França e os Estados Unidos, tendo uma concepção semelhante àquela do programa TAO (*Tropical Atmosphere Ocean*) para o Oceano Pacífico Tropical (Servain *et*



al., 1998). Atualmente existem 8 boias funcionando, nas posições 15° N, 38° W, 12° N, 38° W, 08° N, 38° W, 04° N, 38° W, 0.35° W, 08° S, 30° W, 14° S, 32° W, 19° S, 34° W.

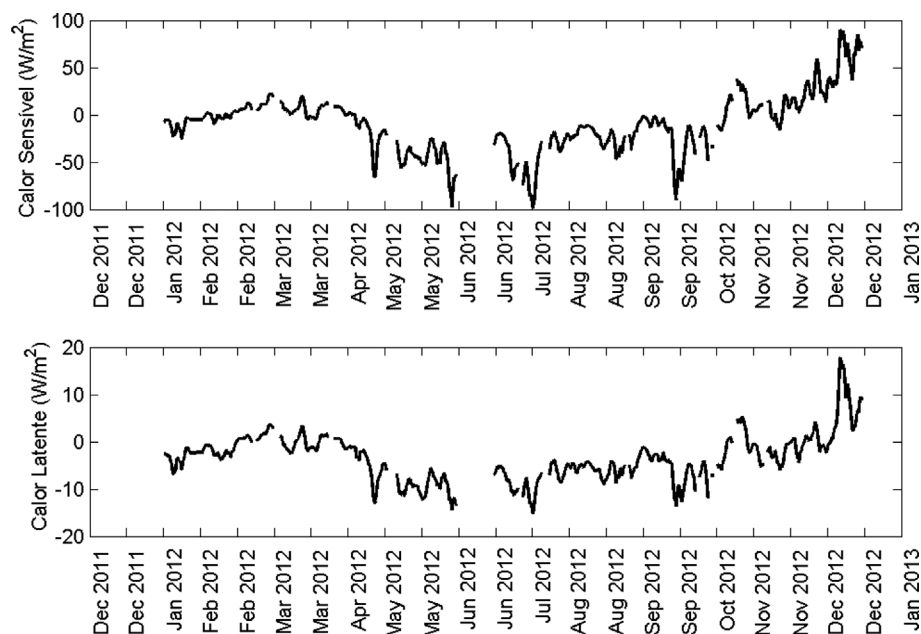
Já o PNBoia, é um programa que visa suprir a conhecida carência de dados oceanográficos e meteorológicos no Oceano Atlântico Sul baseado na coleta operacional de dados através de boias de deriva e fixas. As boias de deriva coletam dados de TSM e eventualmente possuem um barômetro para a coleta de dados de pressão atmosférica ao longo de seu deslocamento. Normalmente essas boias de deriva são lançadas sobre o núcleo da Corrente do Brasil, em profundidades superiores a 200 m em várias faixas de latitude. As boias fixas do PNBoia, embora não totalmente implementadas, oferecem dados meteorológicos e oceanográficos importantes que podem ser usados para estudos de interação oceano-atmosfera na plataforma continental brasileira.

Conhecendo a presente carência de dados observacionais na região costeira do Brasil, uma iniciativa do Ministério do Meio Ambiente através do Fundo Clima, implantou a partir de 2012 o Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta). Esse sistema objetiva, a partir de boias fixas e de uma rede maregráfica, oferecer dados para suportar um monitoramento das propriedades físicas, químicas e biológicas da água do mar e da atmosfera em regiões costeiras do Brasil (<http://www.simcosta.furg.br/portal>). O sistema encontra-se, no presente, na sua fase de implementação onde atenderá inicialmente os estados de SP, PR, SC e RS.

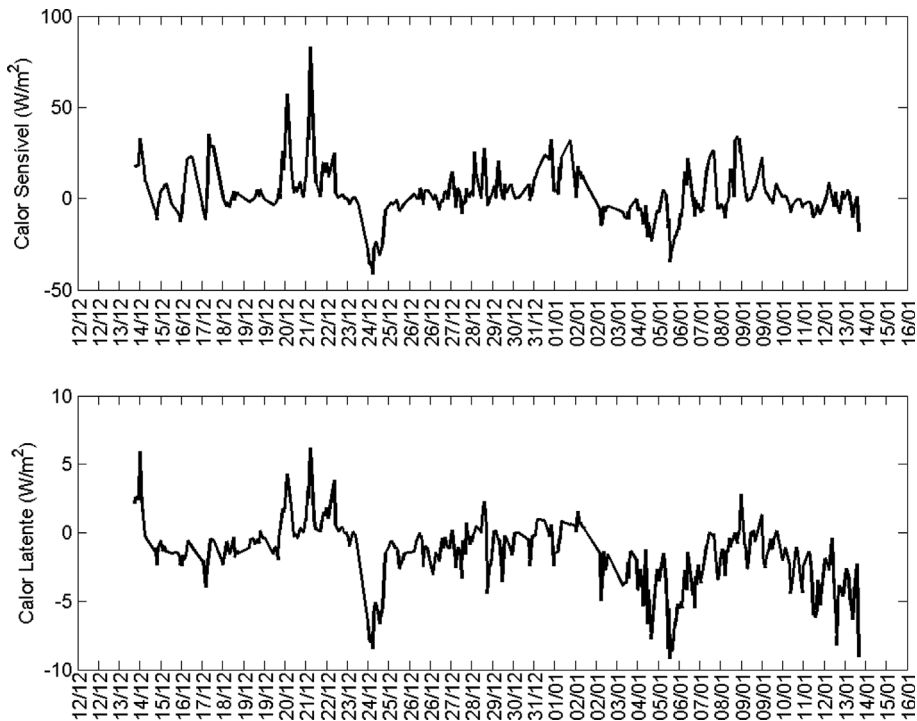
As Figs. 5 e 6 são exemplos de séries de tempo de calor sensível e calor latente estimados a partir dos dados coletados por duas boias fixas dos projetos PNBoia e

SiMCosta no litoral do estado de São Paulo ao largo das cidades de Santos e São Sebastião, respectivamente. A boia do PNBoia apresenta dados entre abril de 2011 e fevereiro de 2013, com uma falha de aquisição entre agosto e dezembro de 2011. Essa boia foi ancorada em profundidade próxima a 200 m na quebra de plataforma continental na posição 25°17' S, 44°56' W. A boia do SiMCosta apresenta apenas um mês de dados, entre dezembro de 2014 e janeiro de 2015. Essa boia foi ancorada águas rasas, próxima ao Centro de Biologia Marinha da Universidade de São Paulo (CEBIMar/USP), na posição 23°49'50,1 S, 45°25'19,8 W. As duas figuras exemplificam a robustez e a importância das medidas realizadas por esses instrumentos para estudos de variabilidade climática na interface oceano-atmosfera. Os dados apresentados aqui nessas figuras são inéditos na literatura científica. Embora não completamente tratados para esse trabalho, os dados comprovam o fato de que, nos dois casos, o calor sensível é cerca de uma ordem de magnitude maior do que o calor latente nas escalas diurna e sazonal.

O INPE participa do GOOS-Brasil e do SiMCosta, mas também mantém em curso algumas iniciativas de pesquisa na área observacional de interação oceano-atmosfera. O Programa INTERCONF (Interação Oceano-Atmosfera na região da Confluência Brasil-Malvinas) é o guarda-chuva que fomenta a coleta observacional de dados na interface oceano-atmosfera pelo PROANTAR que tem sido realizada desde 2004 na região da CBM. Os dados observacionais do INTERCONF foram e estão sendo tomados a bordo do Navio de Apoio Oceanográfico (NApOc.) Ary Rongel e do Navio Polar (NPo.) Almirante Maximiano, ambos da Marinha do Brasil. Os resultados mais signi-



**Figura 5** - Séries temporais de fluxos de calor sensível e calor latente calculados a partir dos dados coletados pela boia fixa do projeto PNBoia em Santos-SP.

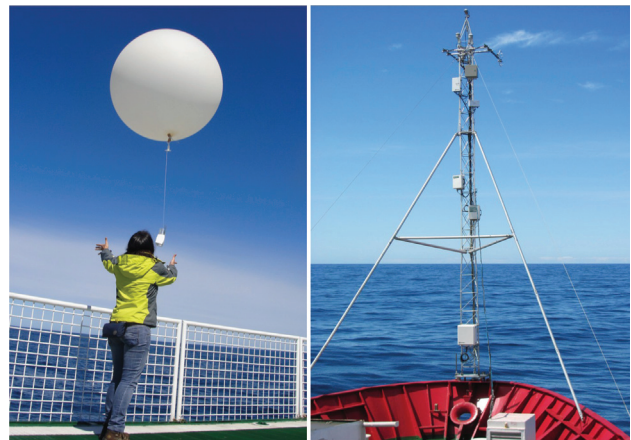


**Figura 6** - Séries temporais de fluxos de calor sensível e calor latente calculados a partir dos dados coletados pela boia fixa do projeto SiMCosta em São Sebastião-SP.

ficativos do INTERCONF, já descritos aqui, estão expostos em Pezzi *et al.* (2005, 2009), Acevedo *et al.* (2010) e Camargo *et al.* (2013), por exemplo.

O projeto Atlantic Carbon Experiment (ACEx), que é descrito com detalhes em Pezzi *et al.* (2016), foca no estudo dos fluxos de momentum, calor e  $\text{CO}_2$  valendo-se de técnicas convencionais (radiossondagens) e inovadoras para realizar medidas in situ, em alta frequência temporal, tomadas sobre o oceano a partir de uma torre micrometeorológica instalada na proa de diversos navios de pesquisa (Fig. 7). Até o presente, o ACEx realizou experimentos a bordo do Navio Hidroceanográfico (NHo.) *Cruzeiro do Sul* (Marinha do Brasil), do NPo. Almirante Maximiano e do Navio Oceanográfico (NOc.) *Alpha Crucis* (Universidade de São Paulo) em várias regiões do Oceano Atlântico Sul a partir de 2012. Farias (2014), Farias *et al.* (2015) e Pezzi *et al.* (2016) foram os primeiros autores a descreverem o acoplamento sinótico entre o oceano e atmosfera na região costeira sul do Brasil durante o inverno, quando as águas quentes da Corrente do Brasil e as águas frias da Corrente Costeira do Brasil (Souza e Robinson, 2004), também chamada de “Pluma do Rio da Prata”, se encontram na região da quebra de plataforma da região sul do Brasil produzindo intensos contrastes horizontais termais semelhantes àqueles encontrados na região da CBM.

O presente trabalho não considerou os esforços do Brasil relacionados à modelagem acoplada de oceano-atmosfera, que são muitos e merecem uma revisão à parte desse texto. Dos inúmeros trabalhos pretéritos e recentes



**Figura 7** - (esq.) Lançamento de radiossondas realizado a partir de um navio oceanográfico. (dir.) Torre micrometeorológica com diversos sensores instalada na proa do NPo. Almirante Maximiano durante a Operação Antártica 33 (OPERANTAR XXXIII) em novembro de 2014.

nessa área incluem-se, por exemplo, Delworth *et al.* (2007), Nobre *et al.* (2010), Nobre *et al.* (2013) e Machado *et al.* (2014). Em conclusão, apesar dos esforços operacionais restritos e de programas de pesquisa mantidos há algum tempo pelo Brasil, até o presente momento o Oceano Atlântico Sul não foi extensivamente amostrado nem estudado. Seus efeitos no tempo e clima do Brasil e da América do Sul ainda não são totalmente compreendidos. Há especial interesse nos efeitos da variabilidade dos parâmetros meteo-

rológicos e oceanográficos sobre as densamente populosas regiões costeiras do sul e sudeste do Brasil.

O Oceano Atlântico Sul é uma região caracterizada pelo surgimento e passagem de sistemas transientes que, eventualmente, atingem o sul e sudeste da América do Sul. A melhor compreensão da física envolvida nos processos de interação oceano-atmosfera que ocorrem nesta região e que podem ser observados *in situ* através de navios, boias de deriva, boias fixas ou qualquer outro meio, em caráter operacional, contribuirá para a melhoria das simulações e previsões de tempo e clima para o Brasil e outros países sul-americanos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem os seguintes projetos que tem financiado as pesquisas sobre Interação Oceano-Atmosfera no Oceano Atlântico Sudoeste e Austral: INCT Criosfera (CNPq-704222/2009), *Atlantic Carbon Experiment* (ACEX-CNPq-558108/2009-1) e Estudos Avançados em Oceanografia de Médias e Altas Latitudes (CAPES - 1992/2014). O CNPq financia as bolsas PQ de L. P. Pezzi (304633/2012-7) e R. B. Souza (308646/2013-4). Os autores agradecem também a Srta. Leilane G. Passos pelo auxílio com a editoração final do texto. Um agradecimento especial aos dois revisores anônimos que fizeram excelentes críticas e sugestões construtivas que ajudaram a elevar a qualidade científica do artigo.

## Referências

- ACEVEDO, O.C.; PEZZI, L.P.; SOUZA, R.B.; ANABOR, V.; DEGRAZIA G. A. Atmospheric boundary layer adjustment to the synoptic cycle at the Brazil-Malvinas Confluence, South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, D22107, doi:10.1029/2009JD013785, 2010.
- ARSEGO, D.A.; ACEVEDO, O.C.; SOUZA, R.B.; CUSTODIO, D.M. Energia calorífica liberada para a atmosfera por um vórtice quente no Atlântico Sudoeste. **Ciência e Natura**, Ed. Suplementar Micrometeorologia, p. 379-382, ISSN 2179-460X, 2011.
- BAKUN, A.; PARRISH, R.H. Comparative studies of coastal pelagic fish reproductive habitats: the Brazilian sardine (*Sardinella aurita*). **J. Cons. Int. Explor. Mer.**, v. 46, n. 3, p. 269-283, 1990.
- BANERJEE, S.; MACINTYRE, S. **The air-water interface: Turbulence and scalar Exchange**. In: Liu, P. L. F. (Ed.): *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, p. 181-237, World Sci., Hackensack, N. J., 2004.
- BARRÉ, N.; PROVOST, C.; SARACENO, M. Spatial and temporal scales of the Brazil-Malvinas Current confluence documented by simultaneous MODIS Aqua 1.1-km resolution SST and color images. **Advances in Space Research**, v. 37, n. 4, p. 770-786, doi:10.1016/j.asr.2005.09.026, 2006.
- BIANCHI, A.A.; HERNÁN, D.R.P.; PERLENDER, G.I.; OSIROFF, A.P.; SEGURA, V.; LUTZ, V.; CLARA, M.L.; BALESTRINI, C.F.; PIOLA, A.R. Annual balance and seasonal variability of sea-air CO<sub>2</sub> fluxes in the Patagonia Sea: Their relationship with fronts and chlorophyll distribution. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, C03018, doi:10.1029/2008JC004854, 2009.
- BLACKMON, M.L.; WALLACE, J. M.; LAU, N.C.; MULLEN, S. L. An observational study of the northern hemisphere wintertime circulation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 34, n. 7, p. 1040-1053, 1977.
- BOMBARDI, R.J.; CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; REBOITA, M. S. Precipitation over eastern South America and the South Atlantic sea surface temperature during neutral ENSO periods. **Climate Dynamics**, n. 42, p. 1553-1568, doi:10.1007/s00382-013-1832-7, 2014.
- CALADO, L.; GANGOPADHYAY, A.; SILVEIRA, I.C.A. A parametric model for the Brazil Current meanders and eddies off southeastern Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 33, p. L112602, 2006.
- CAMARGO, R.; TODESCO, E.; PEZZI, L.P.; SOUZA, R.B. Modulation mechanisms of marine atmospheric boundary layer at the Brazil-Malvinas Confluence region. **Journal Of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 12, p. 6266-6280, doi:10.1002/jgrd.50492, 2013.
- CAMPOS, E.J.D. O papel do oceano nas mudanças climáticas globais. In: Dossiê Clima, **Revista USP**, v. 103, p. 57-66, 2014.
- CAMPOS, E.J.D.; LENTINI, C.D.; MILLER, J.L.; PIOLA, A. R. Interannual variability of the sea surface temperature in the South Brazil Bight. **Geophysical Research Letters**, v. 26, p. 2061-2064, 1999.
- CANADELL, J.G.; QUÉRÉ, C.; RAUPACH, M.R.; FIELD, C.B.; BUITENHUIS, E.T.; CIAIS, P.; CONWAY, T.J.; GILLET, N.P.; HOUGHTON, R. A.; MARLAND, G. Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 104, p. 18870-18886, 2007.
- CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Persistence, intensity, form, extreme precipitation, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88-108, 2004.
- CASARIN, D.P.; KOUSKY, V.E. Precipitation anomalies in the southern part of Brazil and variations of the atmospheric circulation. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.1, p. 83-90, 1986.
- CASTRO, B.M.; MIRANDA, L.B. Physical oceanography of the Western Atlantic continental shelf located between 4° N and 34° S, coastal segment (4,W). In: Robinson, A.R.; Brink, K.H. (Eds.), **The Sea**, v. 11, John Wiley and Sons, New York, 1998.
- CAVALCANTI, F.A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M.A.F.; JUSTI, M.G.A. **Tempo e Clima no Brasil**, 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, p. 463, ISBN 978-85-86238-92-5, 2009.
- CHANG, P.; SARAVANAN, R.; Ji, L.; HEGERL, G.C. The effect of local sea surface temperatures on atmospheric circulation over the tropical Atlantic sector. **Journal of Climate**, v. 13, p. 2195-2216, 2000.
- CHAVES, R.R.; SATYAMURTY, P. Estudo das condições regionais associadas a um evento de forte ZCAS em janeiro de



2003. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 1, p. 134-140, 2006.
- CHAVES, R.R.; NOBRE, P. Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 31, L03204, doi:10.1029/2003GL018647, 2004
- CHELTON, D. B.; XIE, S. P. Coupled ocean-atmosphere interaction at oceanic mesoscales. **Oceanography Magazine**, v. 23, p. 52-69, 2010.
- CHELTON, D.B.; SCHLAX, M.G.; WITTER, D.L.; RICHMANN, J. G. GEOSAT altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 877-903, 1990.
- CIOTTI, A.M.; ODEBRECHT, C.; FILLMANN, G.; MOLLER Jr., O.O. Freshwater outflow and Subtropical Convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. **Continental Shelf Research**, v. 15(14), p. 1737-1756, 1995.
- CLOWES, A.J. Influence of the Pacific on the circulation in the South-West Atlantic Ocean. **Nature**, v. 131, p. 189-191, 1933.
- DA ROCHA, R.P.; SUGAHARA, S.; SILVEIRA, R.B. Sea waves generated by extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and validation against altimeter data. **Weather and Forecasting**, v. 19, p. 398-410, 2004.
- DAVIS, C.; BOSART, L.F. The TT problem. **Bulletin Of the American Meteorological Society**, v. 85, p. 1657-1662, 2004.
- DELWORTH, T.L.; ZHANG, R.; MANN, M.E. Decadal to centennial variability of the Atlantic from observations and models. In: Schimttner, A., Chiang, J.C.H., Hemming, S.R., (Eds.): **Ocean Circulation: Mechanisms and Impacts - Past and Future Changes of Meridional Overturning**, American Geophysical union, Washington, D.C. doi: 10.1029/173GM10, 2007.
- DESER, C.; MAGNUSDOTTIR, G.; SARAVANAN, R.; PHILLIPS, A. The effects of North Atlantic SST and sea ice anomalies on the winter circulation in CCM3. Part II: Direct and indirect components of the response. **Journal of Climate**, v. 17, p. 877-889, 2004.
- DIAS, D.F.; PEZZI, L.P.; GHERARDI, D.F.M.; CAMARGO, R. Modeling the spawning strategies and larval survival of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*). **Progress in Oceanography**, v. 123, p. 38-53, 2014.
- DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. A.; MECHOSO, C. R. Relationships between Precipitation Anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, p. 251-271, 1998.
- DONELAN, M. A.; DRENNAN, W. M.; SALTZMAN, E. S.; WANNINKHOF, R. Gas transfer at water surfaces, **Geophysical Monograph Series**, v. 127, p. 1-10, AGU, Washington, D. C, 2002.
- DOURADO, M. S.; SOUZA, R. B.; GARCIA, C. A. E.; MATA, M. M.; SATO, O. T. Estudo dos fluxos turbulentos na região da Confluência Brasil-Malvinas. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, Brasil, 2006.
- FAIRALL, C.W.; BRADLEY, E.F.; ROGERS, D.P.; EDSON, J.B.; YOUNG, G.S. Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, p. 3747- 3764, 1996
- FARIAS, P.C. Fluxos de calor e dióxido de carbono entre o oceano e a atmosfera na região costeira e oceânica ao sul do Brasil. **PPGMet**, UFSM, p. 91, 2014.
- FARIAS, P.C.; SOUZA, R.B.; PEZZI, L.P.; DIAS, F.G.; ROSATO, F.; ALVES, R.C.M. Análise do acoplamento oceano-atmosfera em escala sinótica ao longo de 33° S nos dias 19 e 20 de junho de 2012. **Ciência e Natura**, v. 37, Ed. Especial SIC, p. 39-45. doi:10.5902/217946, 2015.
- FERREIRA, N.J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M.A.F. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n.1, p. 89-98, 2004.
- FETTER, A.F.H.; MATANO, R.P. On the origins of the variability of the Malvinas Current in a global, eddy permitting numerical simulation, **Journal Of Geophysical Research**, v. 113, C11018, doi:10.1029/2008JC004875, 2008.
- FIGUEROA, S.N.; NOBRE, C.A. Precipitation distribution over central and western tropical South America. **Climanálise**, v. 5, p. 36-45, 1990.
- FREITAS, R.A.P. Avaliação da intensidade e trajetórias dos ciclones extra-tropicais no hemisfério sul sob condições climáticas atuais e de aquecimento global. **Dissertação**. Universidade Federal de Viçosa, 2011.
- FRANCISCO, C.P.F.; SILVEIRA, I.C.A.; CAMPOS, E.J.D. Dynamics of the Brazil-Malvinas Confluence: Energy Conversions. **Journal of Physics. Conference Series (Online)**, v. 285, p. 012045, 2011.
- GAN, M.A.; KOUSKY, V.E.; ROPELEWSKI, C.F. The South America Monsoon Circulation and Its Relationship to Rainfall over West-Central Brazil. **Journal of Climate**, v. 17, p. 47-66, 2004.
- GAN, M.A.; RODRIGUES, L.R.; RAO, V.B. Monção na América do Sul. **Tempo e Clima no Brasil**, Oficina de Textos, São Paulo, p. 297-316, 2009.
- GARCIA, C. A. E. Physical Oceanography. In: Chapter 6.2, Seeliger, U.; Odebrecht, C.; Castello, J.P. (Eds.) **Subtropical Convergence Environments: The coast and sea in the Southwestern Atlantic**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1997.
- GARCIA, C.A.E.; SARMA, Y.V.B.; MATA, M.M.; GARCIA, V.M.T. Chlorophyll variability and eddies in the Brazil-Malvinas Confluence region. **Deep-Sea Research**, v. 51, p. 159-172, 2004.
- GARCIA, C.A.E.; GARCIA, V.M.T.; DOGLIOTTI, A.I.; FERREIRA, A.; ROMERO, S.I.; MANNINO, A.; SOUZA, M.S.; MATA, M.M. Environmental conditions and bio-optical signature of a coccolithophorid bloom in the Patagonian shelf. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, C03025, doi:10.1029/2010JC006595, 2011.
- GARFIELD, N. The Brazil Current at subtropical latitudes. **Tese de Doutorado**, University of Rhode Island, 1990.
- GARZOLI, S.; GARRAFFO, Z. Transports, frontal motions and eddies at the Brazil-Malvinas Currents Confluence. **Deep-Sea Research**, v. 36, n. 5, p.681-703, 1989.
- GARZOLI, S. L.; GIULIVI, C. What forces the variability of the southwestern Atlantic boundary currents? **Deep-Sea Research**, v. 41, p. 1527-1550, 1994.

- GARZOLI, S.L.; MATANO, R.P. The South Atlantic and the Atlantic Meridional Overturning Circulation. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 58, n. 17-18, p. 1837-1847, doi:10.1016/j.dsr2.2010.10.063, 2011.
- GARZOLI, S.; SIMIONATO, C. Baroclinic instabilities and forced oscillations in the Brazil/Malvinas confluence front. **Deep-Sea Research**, v. 37, n. 6, p. 1053-1074, 1990.
- GARREAUD, R.D. Cold air incursions over subtropical South America: Mean structure and dynamics. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 2544-2559, 2000.
- GIGLIOTTI, E.S.; GHERARDI, D.F.M.; PAES, E.T.; SOUZA, R.B.; KATSURAGAWA, M. Spatial analysis of egg distribution and geographic changes in the spawning habitat of the Brazilian sardine *Sardinella brasiliensis*. **Journal of Fish Biology**, v. 77, p. 2248-2267, 2010.
- GONZALEZ-SILVEIRA, A.; SANTAMARIA-DEL-ANGEL, E.; MILLAN-NUNEZ, R. Spatial and temporal variability of the Brazil-Malvinas Confluence and the La Plata Plume as seen by SeaWiFS and AVHRR imagery. **Journal of Geophysical Research - Oceans**, v. 111, p. 1-17, 2006.
- GORDON, A.L. Brazil-Malvinas Confluence - 1984. **Deep-Sea Research**, v. 36, p. 359-384, 1989.
- GRIMM, A.M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, n. 4, p. 537-554, DOI: 10.1007/s00477-010-0420-1, 2011.
- GRIMM, A.M. The El Niño Impact on the Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes vs. Remote Influences. **Journal of Climate**, v. 16, p. 263-280, 2013.
- GRIMM, A.M.; SILVA DIAS, P.L. Analysis of tropical-extra-tropical interactions with influence functions of a barotropic model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, p. 3538-3555, 1995.
- GRIMM, A.M.; ZILLI, M.T. Interannual variability and seasonal evolution of summer monsoon rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 22, p. 2257-2275, 2009.
- GRIMM, A.M.; PAL, J.; GIORGI, F. Connection between spring conditions and peak summer monsoon rainfall in South America: Role of soil moisture, surface temperature, and topography in eastern Brazil. **Journal of Climate**, v. 20, p. 5929-5945, 2007.
- GUERRERO, R.A.; PIOLA, A.R.; FENCO, H.; MATANO, R.P.; COMBES, V. et. al. The salinity signature of the cross-shelf exchanges in the Southwestern Atlantic Ocean: Satellite observations. **Journal Of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, doi:10.1002/2014JC010113, 2014.
- HAYLOCK, M.R.; PETERSON, T. C; ALVES, L.M; AMBRIZZI, T.; ANUNCIAÇÃO, Y. M. T. et al. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, n. 8, p. 1490-1512, 2006.
- HOSKINS, B.J.; HODGES, K.I.A. New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks. **Journal of Climate**, v. 18, p. 4108-4129, 2005.
- HURRELL, J.W.; VISBECK, M.; BUSALACCHI, A.; CLARKE, R. A.; DELWORTH, T. L. et al. Atlantic climate variability and predictability: A CLIVAR perspective. **Journal of Climate**, v. 19, p. 5100-5121, 2006.
- IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- JIANG, L.; CAI, W.; WANG, Y. A comparative study of carbon dioxide degassing in river and marine-dominated estuaries. **Limnology Oceanography**, v. 53, n. 6, p. 2603-2615 2008.
- JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. Active and break phases in the South American Monsoon System. **Journal of Climate**, v. 15, p. 905-914, 2002.
- JONES, C.; HOREL, J.D. A circulação da Alta da Bolívia e a atividade convectiva sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 5, p. 379-387, 1990.
- JORGETTI, T.; DIAS, P.L.S.; FREITAS, E.D. The relationship between South Atlantic SST and SACZ intensity and positioning. **Climate Dynamics**, v. 42, p. 3077-3086, 2014.
- JULLION, L.; HEYWOOD, K.J.; GARABATO, A.C.N; STEVENS, D.P. Circulation and Water Mass Modification in the Brazil-Malvinas Confluence. **Journal of Physical Oceanography**, v. 40, p. 845-864, doi: http://dx.doi.org/10.1175/2009JPO4174.1, 2010.
- JUSTINO, F. The influence of boundary conditions on the last glacial maximum. **Tese**, Institute of Marine Research, Leibniz, Germany, 2004.
- KAUFMANN, T.; ANABOR, V. Padrões sinóticos associados a um evento de advecção de nebulosidade rasa ocorrido em 11 de dezembro de 2005 sobre o Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, v. 33, n. 2, p. 181-196, 2011.
- KAUFMANN, T.; ANABOR, V. Análise de quatro casos de advecção de nebulosidade rasa no Sul do Brasil por atuação de Anticiclones Transientes na região CBM. In: **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Belém, Brasil, 2010.
- KAYANO, M.T.; ANDREOLI, R.V.; SOUZA, R. Evolving anomalous SST patterns leading to ENSO extremes: relations between the tropical Pacific and Atlantic Oceans and the influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 31, p. 1119-1134, doi:10.1002/joc.2135, 2011.
- KAYANO, M.T.; ANDREOLI, R.V.; SOUZA, R. Relations between ENSO and the South Atlantic SST modes and their effects on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, doi:10.1002/joc.3569, 2012.
- KODAMA, Y. Large-scale common features of Sub-tropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: characteristics of Subtropical Frontal Zones. **Journal of Meteorological Society of Japan**, v. 70, n. 4, p. 813-835, 1992.
- KODAMA, Y. Large-scale common features of Sub-tropical Convergence Zones (The Baiu Frontal Zone, The SPCZ, and the SACZ). Part II: conditions of the circulation for generating the STCZs. **Journal of Meteorological Society of Japan**, v. 71, n. 5, p. 581-610, 1993.
- KODAMA, Y.M.; SUZUKI, T.; TAKEUCHI, Y. Cloud clusters over the South Pacific, the South America and South Atlantic. **Proceeding of Spring Assembly at Tsukuba, Meteorological Society of Japan**, p. 329, 1997.

- KUSHNIR, R.; SEAGER, J.M.; CHIANG, J.C.H. A simple coupled model of tropical Atlantic decadal climate variability. **Geophysical Research Letters**, v. 29, p. 2133, doi:10.1029/2002GL015874, 2002.
- LAU, N.C. Variability of the observed mid latitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 45, p. 2718-2743, 1988.
- LEGECKIS, R.; GORDON, A.L. Satellite observations of the Brazil and Falkland currents - 1975 to 1976 and 1978. **Deep-Sea Research**, v. 29, p. 375-401, 1982.
- LENTINI, C.A.D.; OLSON, D.B.; PODESTÁ, G. Statistics of Brazil Current rings observed from AVHRR: 1993 to 1998. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 16, p. 58-1-58-4, 2002.
- LENTINI, C.A.D.; PODESTÁ, G.G.; CAMPOS, E.J.D.; OLSON, D.B. Sea surface temperature anomalies on the Western South Atlantic from 1982 to 1994. *Continental Shelf Research*, v. 21, p. 89-112, 2001.
- LENTINI, C.A.D.; SOUZA, R.B. Eddies e vórtices de mesoescala no Oceano Atlântico Sudoeste medidos através de satélites. In: Souza, R. B. (Org.). *Oceanografia por Satélites*. 2a Edição Atualizada e Ampliada. São Paulo: Oficina de Textos, p. 185-198, 2009.
- LE QUÉRÉ, C.; METZL, N. Natural processes regulating the oceanic uptake of CO<sub>2</sub>. In **The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World**, (C.B. Field and M.R. Raupach, Eds.) SCOPE 62, Island Press, Washington D.C., p. 243-255, 2003.
- LE QUÉRÉ, C.; RÖDENBECK, C.; BUITENHUIS, E.T.; CONWAY, T.J.; LANGENFELDS, R. *et al.* Saturation of the Southern Ocean CO<sub>2</sub> sink due to recent climate change. **Science**, v. 316, p. 1735-1738, 2007.
- LIMA, I.D.; GARCIA, C.A.E.; MOLLER Jr., O.O. Ocean surface processes on the southern Brazilian shelf: characterization and seasonal variability. **Continental Shelf Research**, v. 16, n.10, p. 1307-1317, 1996.
- LINDZEN, R.S.; NIGAM, S. On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 44, n. 17, p. 2418-2436, doi:10.1175/1520-0469, 1987.
- LONGHURST, A.R. *Ecological Geography of the Sea*, 1. ed. New York: Elsevier, 1998.
- MACHADO, J.P.; JUSTINO, F.; PEZZI, L.P. Efeitos do aumento da tensão de cisalhamento do vento no clima do Hemisfério Sul obtido do modelo acoplado SPEEDO. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, p. 597-612, 2014.
- MARENGO, J.A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V.E.; FILIZOLA, N.P.; WAINER, I.C. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin. **Journal of Climate**, v. 14, p. 833-852, 2001.
- MARENGO, J.A. The characteristics and variability of the atmospheric water balance in the Amazon basin: Spatial and temporal variability. **Climate Dynamics**, v. 24, p. 11-22, 2005.
- MARSHALL, G.J. Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalyses. **Journal of Climate**, v. 16, p. 4134-4143, 2003.
- MARTON, E. Oscilações intrazonais associadas a Zona de Convergência do Atlântico Sul no Sudeste Brasileiro. *Tese*, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- MATANO, R.P. On the separation of the Brazil Current from the coast. **Journal of Physical Oceanography**, v. 23, p. 79-90, 1993.
- MATANO, R.P.; COMBES, V.; PIOLA, A.R.; GUERRERO, R.; PALMA, E.D. *et al.* The salinity signature of the cross-shelf exchanges in the southwestern Atlantic Ocean: numerical simulations. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, n. 119, doi: 10.1002/2014JC010116, 2014.
- McTAGGART-COWAN, R.; BOSART, L.F.; DAVIS, C.A.; ATALLAH, E.H.; GYAKUM, J.R.; EMANUEL, K.A. Analyses of hurricane Catarina. **Monthly Weather Review**, v. 134, p. 3029-3053, 2006.
- METZL, N.; BRUNET, C.; JABAUD-JAN, A.; POISSON, A.; SCHAUER, B. Summer and winter air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the Southern Ocean. **Deep Sea Research Part II**, v. 53, p. 1548-1563, 2006.
- MIRANDA, L.B. Propriedades e variáveis físicas das águas da plataforma continental do Rio Grande do Sul. *Tese*, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1972.
- MORAN, J.M.; MORGAN, M.D. **Meteorology: The atmosphere and the Science of weather**. Mineapolis: Burgess Publishing, 1986.
- MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 7, p. 2653-2675, 1981.
- MOURA, R.; SOUZA, R.B.; MARONE, E. Estudo do campo de velocidade de correntes superficiais no Oceano atlântico Sul a partir de dados de boias de deriva. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 6, n. 3, <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.757>, 2011.
- NOBRE, C.A. Ainda sobre a Zona de Convergência do Atlântico Sul: A importância do Oceano Atlântico. **Climanálise**, v. 3, n. 4, p. 30-33, 1988.
- NOBRE, C.; BRASSEUR, G.P.; MELVYN, A.S.; MYANNA, L.; BRUNET, G. *et al.* Addressing the complexity of the Earth system. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 91, p. 1389-1396, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3012.1>, 2010.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 10, n. 4, p. 2464-2479, 1996.
- NOBRE, P.; SIQUEIRA, L.S.P.; ALMEIDA, R.A.F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E. *et al.* Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, p. 6716-6732, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00580.1>, 2013.
- NOBRE, P.; ALMEIDA, R.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E. Coupled Ocean-Atmosphere Variations over the South Atlantic Ocean. **Journal of Climate**, v. 25, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00444.1, 2012.
- NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, E.K.C. Alternating wet and dry conditions over the South America during summer. **Monthly Weather Review**, n. 125, p. 279-291, 1997.
- OLIVEIRA, L.R.; PIOLA, A. R.; MATA, M.M.; SOARES, I.D. Brazil current surface circulation and energetics observed



- from drifting buoys. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, C10006. doi: 10.1029/2008JC004900, 2009.
- OLSON, D.B.; PODESTÁ, G.P.; EVANS, R.H.; BROWN, O.B. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas currents. **Deep-Sea Research**, v. 35, p. 1971-1990, 1988.
- PARISE, C.K. Sensitivity and memory of the current mean climate to increased Antarctic sea ice: The role of sea ice dynamics. **Tese**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014.
- PARISE, C.K.; CALLIARI, L.J.; KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57, p. 175-188, 2009.
- PARISE, C.K.; PEZZI, L.P.; HODGES, K.I.; JUSTINO, F. The Influence of Sea Ice Dynamics on the Climate Sensitivity and Memory to Increased Antarctic Sea Ice. **Journal of Climate**, v. 28, p. 9642-9668, 2015 DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00748.1.
- PETERSON, R.G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, p. 1-73, 1991.
- PEZZA, A.B.; SIMMONDS, I. The first South Atlantic hurricane unprecedented blocking, low shear and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 15, p. 1-5, 2005.
- PEZZI, L. P.; CAVALCANTI, I.F.A. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: A numerical study. **Climate Dynamics**, v. 17, p 205-212, 2001.
- PEZZI, L.P.; RICHARDS, K.J. Effects of lateral mixing on the mean state and eddy activity of an equatorial ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. C12, p. 3371, doi:10.1029/2003JC001834, 2003.
- PEZZI, L.P.; VIALARD, J.; RICHARDS, K.J.; MENKES, C.; ANDERSON D. Influence of ocean atmosphere coupling on the properties of tropical instability waves, **Geophysical Research Letters**, v. 31, 2004, L16306, doi:10.1029/2004GL019995.
- PEZZI, L.P.; SOUZA, R.B.; ACEVEDO, O.; WAINER, I.; MATA, M.M.; GARCIA, C.A.E.; CAMARGO, R. Multi-year measurements of the Oceanic and Atmospheric Boundary Layers at the Brazil-Malvinas Confluence Region. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. D19103, doi:10.1029/2008JD011379, 2009.
- PEZZI, L.P.; SOUZA, R.B.; DOURADO, M.S.; GARCIA, C.A.E.; MATA, M.M.; SILVA-DIAS, M.A.F. Ocean-atmosphere *in situ* observations at the Brazil-Malvinas Confluence region. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 22, L22603, doi:10.1029/2005GL023866, 2005.
- PEZZI, L.P.; SOUZA, R.B. Variabilidade de meso-escala e interação Oceano-Atmosfera no Atlântico Sudoeste. In: Iracema F. A. Cavalcanti; Nelson J. Ferreira; Maria Assunção F. Dias; Maria Gertrudes A. Justi. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**, 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, p. 385-405, 2009.
- PEZZI, L.P.; SOUZA, R.B.; FARIAS, P.C., ACEVEDO, O.; MILLER, A.J. Air-sea interaction at the Southern Brazilian Continental Shelf: In situ observations, **J. Geophys. Res. Oceans**, V. 121, doi:10.1002/2016JC011774, 2016.
- PINAYA, W.H.D.; SOUZA, R.B.; CARBEIRO, M.H.; SILVA, A.O.A.; GHERARDI, D. F. M. Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis* - Steindachner, 1878) and its relationship with the marine environmental variability. **Fisheries Research** (submetido), 2015.
- PUTRASAHAN, D.A.; MILLER, A.J.; SEO, H. Isolating meso-scale coupled ocean-atmosphere interactions in the Kuroshio Extension region. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 63, p. 60-78, 2013.
- PUTRASAHAN, D.A.; MILLER A.J.; SEO H. Regional coupled ocean-atmosphere downscaling in the Southeast Pacific: impacts on upwelling, mesoscale air-sea fluxes, and ocean eddies. **Ocean Dynamics**, v. 63, p. 463-488, doi:10.1007/s10236-013-0608-2, 2013
- QUADRO, M.F.L.; SILVA DIAS, M.A.F.; HERDIES, D.L.; GONCALVES, L.G.G. Análise Climatológica da Precipitação e do Transporte de Umidade na Região da ZCAS Através da Nova Geração de Reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 152-162, 2012.
- ROBERTSON, A.W.; MECHOSO, C.R. Interannual and inter-decadal variability of the South Atlantic convergence zone. **Monthly Weather Review**, n. 128, p. 2947-2957, 2000.
- ROCHA, C.B.; SILVEIRA, I.C.A.; CASTRO, B.M.; LIMA, J.A. M. Vertical structure, energetics, and dynamics of the Brazil Current System at 22S-28S. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, n. 119, p. 52-69, doi:10.1002/2013JC009143, 2014.
- RODRIGUES, R.R.; CAMPOS, E.J.D.; HAARSMA, H. The Impact of ENSO on the South Atlantic Subtropical Dipole Mode. **Journal of Climate**, v. 28, p. 2691-2705, 2015.
- ROPELEWSKI, C.F.; HALPERT M.S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, p. 1606-1626, 1987.
- ROPELEWSKI, C.F.; HALPERT, M.S. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 2, p. 268-284, 1989.
- ROY, T.; RAYNER, P.J.; MATEAR, R.J.; FRANCEY, R. Southern Hemi-sphere ocean CO<sub>2</sub> uptake: Reconciling atmospheric and oceanic estimates. **Tellus Series B**, v. 55, p. 701-710, 2003.
- RUSO, L.; PEZZI, L.P.; SOUZA, R.B. Análise de observações in-situ na região da Confluência Brasil x Malvinas. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, Brasil, 2008.
- RUSO, L. Interação Oceano-Atmosfera sobre o Atlântico Sudoeste na Região da Confluência Brasil-Malvinas. Dissertação, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Brasil, 2009.
- SABINE, C.L.; FEELY, R.A.; GRUBER, N.; KEY, R.M.; LEE, K. *et al.* The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>. **Science**, v. 305, P. 367-371, 2004.
- SARACENO, M.; PROVOST, C. On the relationship between satellite-retrieved surface temperature fronts and chlorophyll a in the western South Atlantic. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, C11016, doi:10.1029/2004JC002736, 2005.
- SARAVANA, R.; CHANG, P. Thermodynamic coupling and predictability of tropical sea surface temperature. In:

- Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction**, v. 147, Wiley, p. 171-180, 2004.
- SERVAIN, J. M.; BUSALACCHI, A. J.; McPHADEN, M. J.; MOURA, A. D.; REVERDIN, G.; VIANNA, M.; ZEBIAK, S. A pilot research moored array in the tropical Atlantic, **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, p. 2019-2031, 1998.
- SEVEROV, D.N.; NAGY, G.J.; PSHENNIKOV, V. SeaWiFS fronts of the Rio de la Plata estuarine system. **Geophysical Research Letters**, v. 5, p. 01914, 2003.
- SIGNORINI, S.R.; GARCIA, V.M.T.; PIOLA, A.R.; GARCIA, C.A.E.; MATA, M.M.; MCCLAIN, C.R. Seasonal and interannual variability of calcite in the vicinity of the Patagonian shelf break (38° S-52° S). **Geophysical Research Letters**, v. 33, L16610, doi:10.1029/2006GL026592, 2006.
- SILVA, A. E. Variabilidade da Circulação e Umidade no Regime de Monção da América do Sul. **Tese**, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- SILVEIRA, I.C.A.; SCHMIDT, A.C.K.; CAMPOS, E.J.D.; GODOI, S.S.; IKEDA, Y. A Corrente do Brasil ao Largo do Sudeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171-183, 2001.
- SILVEIRA, I.C.A.; CALADO, L.; CASTRO, B.M.; CIRANO, M.; LIMA, J.A.M.; MASCARENHAS, A.D.S. On the baroclinic structure of the Brazil Current intermediate western boundary current system at 22°-23°S. **Geophysical Research Letters**, n. 31, L14308, doi:10.1029/2004GL020036, 2004.
- SILVEIRA, I.C.A.; LIMA, J.A.M.; SCHMIDT, A.C.K.; CEC-COPIERI, W.; SARTORI, A. et al. Is the meander growth in the Brazil Current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability?, **Dynamics of Atmosphere and Oceans**, v. 45(3-4), p. 187-207, 2008, doi:10.1016/j.dynatmoce.2008.01.002.
- SILVEIRA, I.P.; PEZZI, L.P. Sea surface temperature anomalies driven by oceanic local forcing in the Brazil-Malvinas Confluence. **Ocean Dynamics**, doi: 10.1007/s10236-014-0699-4, 2014.
- SILVEIRA, I.P.; PEZZI, L.P.; SOUZA, R.B. Dois casos de ATSM analisados através do balanço de calor parcial para o Atlântico sudoeste. **Ciência e Natura**, Ed. Suplementar Micrometeorologia, p. 375-377, ISSN 2179-460X, 2011.
- SMALL, R.J.; DE SZOEKE, S.P.; XIE S.P.; O'NEILL, L.; SEO, H. et al. Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. **Dynamics of Atmosphere and Oceans**, v. 45, p. 274-319, doi:10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001, 2008.
- SOARES, H.C.; PEZZI, L.P.; GHERARDI, D.F.M.; PAES, E.T. Oceanic and atmospheric patterns during spawning periods prior to extreme catches of the Brazilian Sardine (*Sardinella brasiliensis*) in the Southwest Atlantic. *Scientia Marina*, v. 75, p. 665-677, 2011.
- SOPPA, M.A.; SOUZA, R.B.; PEZZI, L.P. Variabilidade das anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico Sudoeste e sua relação com o fenômeno El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, p. 347-363, 2011.
- SOUTELINO, R.G.; SILVEIRA, I.C.A.; GANGOPADHYAY, A.; MIRANDA, J.A. Is the Brazil Current eddy-dominated to the north of 20° S?. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 3, 2011.
- SOUZA, R.B.; MATA, M.M.; GARCIA, C.A.E.; KAMPEL, M.; OLIVEIRA, E.N.; LORENZZETTI, J. A. Multi-sensor satellite and in situ measurements of a warm core eddy south of the Brazil- Malvinas Confluence region. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 52-66, 2006, doi:10.1016/j.rse.2005.09.018.
- SOUZA, R.B.; PEZZI, L.P.; CASAGRANDE, F.; ARSEGO, D.A. Interação oceano-atmosfera sobre estruturas oceânicas de mesoescala no Oceano Atlântico Sudoeste. In: III Congresso Brasileiro de Oceanografia, Rio Grande, Brasil, p. 1470-1474, 2010.
- SOUZA, R.B.; ROBINSON, I.S. Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. **Continental Shelf Research**, v. 24, p. 241-262, 2004.
- STRAMMA, L.; IKEDA, Y.; PETERSON, R.G. Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20° S. **Deep-Sea Research**, v. 37, p. 1875-1886, 1990.
- STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 20863-20883, 1999.
- SUMMERHAYES, C. The Antarctic environment in the Global System: In: Turner, J.; Bindshadler, R.; Convey, P.; di Prisco, G.; Fahrbach, E.; Gutt, J.; Hodgson, D.; Mayewski, P.; C. Summerhayes (Eds.): Chapter 1, Antarctic Climate Change and the environment: a contribution to the International Polar Year 2007-2008. Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), Victoire Press, Cambridge, 2009.
- SUTTON, R.T.; JEWSON, S.P.; ROWELL, D.P. The elements of climate variability in the tropical Atlantic region. **Journal of Climate**, v. 13, p. 3261-3284, 2000.
- TAKAHASHI, T.; SUTHERLAND, S.C.; SWEENEY, C.; POISSON, A.; METZL, N. et al. Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub>, and seasonal biological and temperature effects. **Deep-Sea Research II**, v. 49, p. 1601-1622, 2002.
- TAKAHASHI, T.; SUTHERLAND, S.C.; WANNINKHOF, R.; SWEENEY, C.; FEELY, R.A. et al. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans. **Deep-Sea Research II**, v. 56, p. 554-577, 2009.
- THOMPSON, D. W. J.; SOLOMON, S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. **Science**, v. 296, p. 895-899, 2002.
- TOKINAGA, H.; TANIMOTO, Y.; XIE, S. P. SST-induced wind variations over Brazil/Malvinas Confluence: Satellite and in-situ observations. **Journal of Climate**, v. 18, p. 3470-3482, 2005.
- TRENBERTH, K.E.; HURRELL, J.W.; STEPANIAK, D.P. **The Asian monsoon: global perspectives** B. Wang (Ed.), The Asian Monsoon, Springer, Berlin, p. 67-87, 2006.
- TURNER, J. The instrumental period. In: Turner, J., Bindshadler, R.; Convey, P.; di Prisco, G.; Fahrbach, E.; Gutt, J.; Hodgson, D.; Mayewski, P.; C. Summerhayes (Eds.): Chapter 1, Antarctic Climate Change and the environment: a contribution to the International Polar Year 2007-2008. Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), Victoire Press, Cambridge, 2009.
- TWILLEY, R.R.; CHEN, R.H.; HARGIS, T. Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropi-

- cal coastal ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 64(1-2), p. 265-288, 1992.
- UVO, C.R.B.; REPELLI C.A.; ZEBIAK, S.E.; KUSHINIR, Y. The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation. ***Journal of Climate***, v. 11, n. 4, p. 551-562, 1998.
- VALENTIN, J.L. The Cabo Frio Upwelling System, Brazil. In: Seeliger, U. and Kjerfve, B. (Eds.): ***Coastal Marine Ecosystems of Latin America, Ecological Studies***, Springer, v. 144, p. 97-105, , 2001.
- VIANNA, M.L.; MENEZES, V.V.; PEZZA, A.B.; SIMMONDS, I. Interactions between Hurricane Catarina (2004) and warm core rings in the South Atlantic Ocean. ***Journal of Geophysical Research***, v. 115, C07002, 2010. doi:10.1029/2009JC005974.
- WAINER, I.; GENT, P.; GONI, P. Annual cycle of the Brazil-Malvinas Confluence region in the National Center for Atmospheric Research climate system model. ***Journal of Geophysical Research***, v. 105, p. 26167-26177, 2000.
- WAINER, I; TASCHETTO, A.; SOARES, J.; OLIVEIRA, A.P.; OTTO-BLIESNER, B.; BRADY, E. Intercomparison of Heat Fluxes in the South Atlantic. Part I: The Seasonal Cycle. ***Journal of Climate***, v. 16, p. 706-714, 2003.
- WEBSTER, P.J.; MAGAÑA, V.O.; PALMER, T.N.; SHUKLA, J.; TOMAS, R.A. *et al.* Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *Journal of Geophysical Research*, v. 103(C7), p. 14451-14510, 1998, doi:10.1029/97JC02719.
- WHITE, W.B.; PETERSON, R.G. An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature, and sea ice extent. ***Nature***, v. 380, p. 699-702, 1996.
- WHITE, W.B.; CHEN, S.C.; ALLAN, R.J.; STONE, R.C. Positive feedbacks between the Antarctic Circumpolar Wave and the global El Niño - Southern Oscillation wave. ***Journal of Geophysical Research***, v. 107, p. 3165, 2002, doi:10.1029/2000JC000581.
- WINDOM, H.; PIOLA, A.; McKEE, B. Carbon and nutrient cycling in the Southwestern Atlantic Ocean. ***EOS, Transactions American Geophysical Union***, v. 90, n. 11, p. 93-94, 2009, doi:10.1029/2009EO110014.
- ZHANG S.P.; WANG, B. Global monsoon summer rainy seasons. ***International Journal of Climatology***, n. 28, p. 1563-1578, 2008.