

CARBON Team News

**Vol. 1
Dez/2019**



EDITORIAL

“Sabe-se que os oceanos e regiões costeiras vêm apresentando diversas alterações causadas pela interferência humana...”

Término da leitura na
página 3



Estamos muito felizes em lhes apresentar o CARBON Team News! Nesta primeira edição, tivemos o prazer de receber alguns resumos dos trabalhos que foram desenvolvidos no ano de 2019 por discentes do grupo. Dentre os resumos temos trabalhos finais de curso de graduação, de mestrado e de doutorado. Nossos trabalhos abrangem diversas áreas: do estuário da Lagoa dos Patos, ao Oceano Atlântico Sul até a Antártica. Sejam bem-vindos e aproveitem!



UMA CARTA PARA O CARBON TEAM

“O ano de 2019 foi bastante especial...o grupo está se consolidando...”

Término da leitura na
página 5

POR ÁREA DE ESTUDO:

Atlântico Sul, pág. 8

Antártica, pág. 19

Lagoa dos Patos, pág. 35



CARBON Team News

Vol. 1
Dez/2019

Foto: Iole Orselli

Nessa primeira edição da CARBON Team News, você encontra:

- Editorial
- Uma carta para o CARBON Team
- O CARBON Team em ação

Atlântico Sul:

- Relação entre os diferentes grupos fitoplanctônicos e a absorção de CO₂ atmosférico no Oceano Atlântico Sul
- Qual a relação dos vórtices das Agulhas com o estado de acidificação do oceano Atlântico Sul?

Antártica:

- Estrutura das massas de água no estreito de Bransfield, Antártica, durante os verões austrais de 1960 a 2019
- Variabilidade interanual do estado de acidificação e carbono antropogênico no Estreito de Bransfield, norte da Península Antártica
- Variabilidade sazonal dos fluxos líquidos de CO₂ na região costeira da Antártica é revelada: um estudo de caso no NAP

Lagoa dos Patos:

- Primeira investigação dos parâmetros do sistema carbonato no estuário da Lagoa dos Patos: variabilidade espacial

Agradecimentos

p. 3

p. 5

p.6



p. 8

p. 13



p. 19

p. 24

p. 30



p. 35

p. 42





EDITORIAL

Foto: Iole Orselli

Com alegria apresentamos esta primeira edição da revista do grupo de pesquisa CARBON Team! Os artigos apresentados nesta edição abordam todos os ecossistemas marinhos estudados pelo grupo, da Lagoa dos Patos –região local–, ao oceano Austral (Antártica), passando pelo oceano Atlântico Sul. Sabe-se que os oceanos e regiões costeiras vêm apresentando diversas alterações no equilíbrio climático causadas pela interferência humana. O aumento da temperatura, alterações no regime de ventos e a liberação de dióxido de carbono (CO_2) refletem nas características de formação de massas de água e, conseqüentemente, afetam também a taxa absorção de CO_2 pelos oceanos. O aumento dessa taxa pode causar a acidificação das águas e, assim, gerar graves consequências aos organismos e ecossistemas marinhos. Nesse sentido, um dos principais focos de estudo do grupo CARBON Team é quantificar o processo de acidificação das águas oceânicas e costeiras utilizando abordagens interdisciplinares, explorando o background de cada aluno e pesquisador da melhor forma possível.

A doutoranda Andrea Carvalho estuda como diferentes comunidades fitoplanctônicas podem influenciar diferentemente a captura de CO_2 . Segundo seu estudo, "há ainda muita dificuldade em relacionar a dominância de determinado grupo [fitoplanctônico] a mudanças na capacidade de absorção de CO_2 ", sendo de suma importância conhecermos os fatores que influenciam essa interação. Outro trabalho no oceano Atlântico Sul é o da doutoranda Iole Orselli que aborda especificamente o potencial dos vórtices das Agulhas em capturar CO_2 atmosférico e acidificar águas ao longo dos seus trajetos. No seu trabalho, Iole mostra que cerca de os vórtices das Agulhas carregam um excesso de cerca de 22% a mais de carbono antropogênico do que as águas ao redor, chegando a ter até 29% mais de carbono antropogênico do que as mesmas profundidades.

Navegando para águas mais geladas, apresentamos nesta edição três trabalhos no oceano Austral. O graduando em Oceanologia Brendon Damini estuda a estrutura das massas de água na região do estreito de Bransfield. Seus resultados indicaram que há uma grande variabilidade interanual das massas de água dentro do Estreito de Bransfield. Essas variações de massas de água também têm causado variações no estado de acidificação das águas subsuperficiais do mesmo estreito, segundo o trabalho do mestre Juan Torres-Lasso. Essas variações indicam estar diretamente relacionadas ao Modo Anular Sul (SAM em inglês) e aos ventos de oeste. O terceiro estudo no oceano Austral apresentado é do doutorando Thiago Monteiro sobre a variabilidade do fluxo de CO₂ na interface oceano-atmosfera no estreito de Gerlache. Neste estudo é demonstrado uma intensa variabilidade desses fluxos, com padrões variando de forte sumidouro de CO₂ a condições próximas ao equilíbrio.

Finalizamos com o primeiro projeto de estudo dos parâmetros do sistema carbonato na Lagoa dos Patos, liderado pela doutoranda Cintia Albuquerque. Para Cintia, os resultados encontrados fazem acreditar que o estuário da Lagoa dos Patos está sofrendo impactos antropogênicos a longo prazo.

Todos esses trabalhos e os estudos do CARBON Team de uma forma geral são realizados com muita dedicação e esforço de seus integrantes de forma colaborativa. Com isso, esperamos que estejam inspirados e convidamos vocês a darem um mergulho por diversas águas junto com a gente. Boa leitura!



Iole B. M. Orselli



Jannine M. Lencina-Avila



Uma carta para o **CARBON** Team

Olá a todos,

O ano de 2019 foi bastante especial, pois as diversas atividades de ensino, pesquisa e extensão, que estamos desenvolvendo e aprimorando nos últimos sete anos, mostram como o grupo está se consolidando após uma fase inicial de estruturação. A elaboração desta revista demonstra, muito positivamente, que os caminhos escolhidos e seguidos pelo *CARBON Team* estão no rumo certo! A qualidade dos trabalhos e das investigações executadas (e aqui apresentadas) busca sempre a excelência, enquanto a preocupação com a transmissão do conhecimento, seja para os pares ou para os leigos, frutifica a cada dia com as nossas ações.

É bastante satisfatório poder acompanhar o desenvolvimento e crescimento científico dos membros deste grupo, que se dedicam, todos os dias, ao aprendizado e aos avanços das pesquisas científicas. Estas, muitas vezes, são executadas com recursos escassos ou com condições aquém do ideal. Mas, de certa forma, sempre buscamos vencer os obstáculos e vamos passo-a-passo crescendo e evoluindo, tanto pessoal como coletivamente. Muitas das vezes, através de ações e esforços “invisíveis” que são realizados por vários componentes da nossa equipe.

Ao nos permitirmos aprender, estamos não somente ganhando bagagem intelectual sobre um determinado tema ou assunto de nosso interesse, mas também estamos avançando nas nossas relações interpessoais e alcançando nossas conquistas. A Ciência é colaborativa, pois somente em conjunto avançaremos de forma ordenada e direcionada para atingirmos as metas e objetivos que delineamos. Neste contexto, cada um de nós tem um papel único e fundamental na consolidação do grupo e, independente do estágio de formação, somos todos essenciais para o funcionamento da engrenagem do *CARBON Team*! Esta engrenagem continuará em funcionamento enquanto fornecermos combustível, ou seja, elevadas doses de curiosidade, dedicação, entusiasmo e alegria, na execução das atividades que desenvolvemos.

Abraços a todos e boa leitura!

Rodrigo

O CARBON Team em ação



Foto: Rodrigo Kerr



Foto: Rodrigo Kerr



Foto: Rodrigo Kerr

Alunos e pesquisadores do CARBON Team em diversas atividades.

Acima: primeiro workshop do grupo. Ao lado: reunidos durante a visita das professoras Catherine Goyet (UPVD) e Rosane Ito (USP). Abaixo: durante o transporte em atividades na Antártica.



Foto: Felipe Galdino

O CARBON Team em ação: Spring school



Foto: Andrea Carvalho



Foto: Iole Orselli



Foto: Iole Orselli



Foto:
Jannine Avila



Foto: Rodrigo Kerr



Foto: Rodrigo Kerr



Foto: Rodrigo Kerr



Foto: Rodrigo Kerr

Alunos e pesquisadores do CARBON Team em diversas atividades desenvolvidas durante a primeira “spring school”, realizada entre 02 e 06 de dezembro de 2019. Foram realizados cursos de programação básica, de coletas e análises biogeoquímicas em laboratório, e de análise e controle de qualidade de dados biogeoquímicos.

Relação entre os diferentes grupos fitoplanctônicos e a absorção de CO₂ atmosférico no Oceano Atlântico Sul

Andréa da Consolação de O. Carvalho^{1,2}, Rodrigo Kerr^{1,2}, Carlos Rafael B. Mendes^{1,3}, José Luiz L. de Azevedo¹ e Virginia Maria Tavano^{1,3}

¹Centro de Estudos dos Oceanos e do Clima (CEOCEAN), Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Av. Itália km 8, Rio Grande, 96203-900, RS, Brasil.

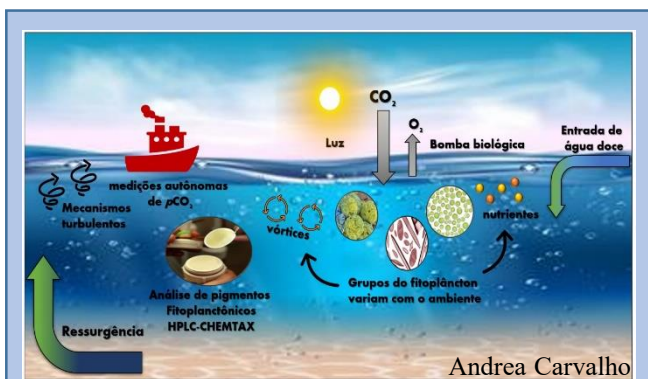
²Brazilian Ocean Acidification Network (BrOA), Av. Itália km 8, Rio Grande, 96203-900, RS, Brasil.

³Laboratório de Fitoplâncton e Micro-organismos Marinhos, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Av. Itália km 8, Rio Grande, 96203-900 RS, Brasil.

Abstract

Phytoplankton is a key mediator of the biological carbon pump converting CO₂ into organic carbon through photosynthesis, yet how phytoplankton variability impacts carbon uptake is poorly understood. This study investigates the South Atlantic Ocean (between 20°S and 35°S) providing an analysis of the carbon dioxide net fluxes (FCO₂) with emphasis on the phytoplankton groups distinguished using HPLC-CHEMTAX approach. We aim to quantify the distribution of major phytoplankton groups and its influence on CO₂ uptake capacity under distinct dynamic systems at the South Atlantic Ocean (western boundary current system, anticyclonic subtropical gyre and eastern boundary upwelling system). To date, few studies have proved the ability of different phytoplankton groups on CO₂ uptake on a natural environment. Such studies are in turn essential to gain insight on the biological effect on pCO₂^{sw} and the ability of the ocean to act as a long-term sink for atmospheric CO₂.

- **Keywords:** air-sea CO₂ net fluxes, biological carbon pump, phytoplankton pigments, HPLC-CHEMTAX, biogeochemical provinces.
- **Palavras-chave:** fluxos líquidos de CO₂ ar-mar, bomba biológica de carbono, pigmentos fitoplanctônicos, HPLC-CHEMTAX, províncias biogeoquímicas



Fixação de CO₂ por diferentes grupos fitoplanctônicos na zona eufótica. Na presença de luz e nutrientes, o fitoplâncton marinho absorve grande parte do CO₂ presente na coluna d'água. Os principais processos que influenciam tanto na dinâmica dos grupos fitoplanctônicos, como na dinâmica do carbono no ambiente marinho (i.e. ressurgência, mecanismos turbulentos, vórtices e entrada de água doce) estão representados no esquema. Neste estudo, medições autônomas da pressão parcial do CO₂ possibilitaram a estimativa dos fluxos líquidos de CO₂ na interface oceano atmosfera e os principais grupos fitoplanctônicos foram quantificados por análise pigmentar usando a ferramenta HPLC-CHEMTAX em regiões dinamicamente distintas do Oceano Atlântico Sul.



Andréa da Consolação de O. Carvalho Doutoranda

Andrea Carvalho
arquivo pessoal

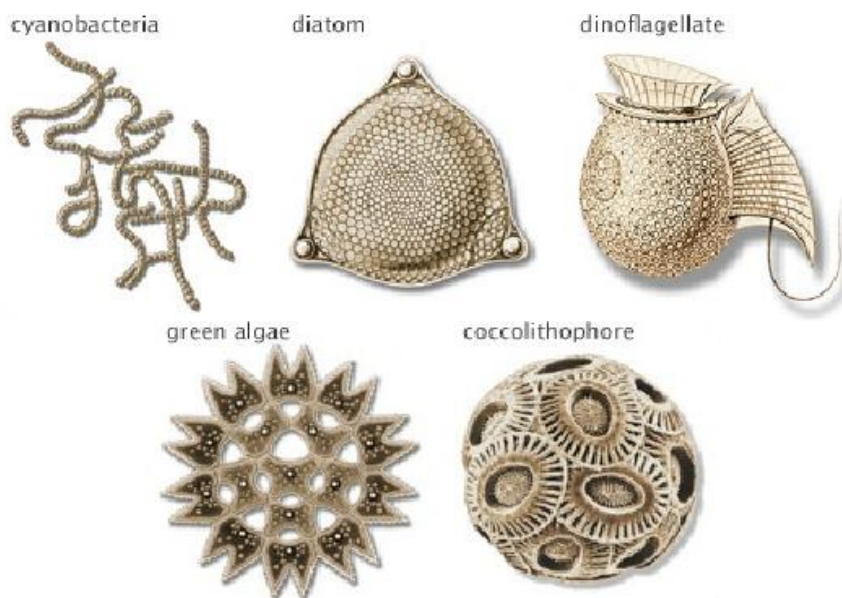
Os ecossistemas marinhos são grandes absorvedores de dióxido de carbono atmosférico (CO_2) ajudando a mitigar os efeitos do aumento das emissões de carbono antropogênico¹. A transferência líquida de CO_2 entre a atmosfera, os oceanos e os sedimentos ocorre, basicamente, pela ação dos mecanismos conhecidos como bomba de solubilidade e bomba biológica². O fitoplâncton marinho atua diretamente no ciclo biogeoquímico do carbono como mediador chave da bomba biológica³, através da fotossíntese. No entanto, variações nas características das comunidades fitoplanctônicas ocorrem em função das variáveis ambientais⁴ e resultam em efeitos biológicos diferenciados na pressão parcial da água do mar ($p\text{CO}_2^{\text{sw}}$) local^{5,6}. Portanto, o papel do fitoplâncton na dinâmica do carbono requer nossa habilidade de explicar a distribuição dos grupos fitoplanctônicos dominantes em relação às condições bióticas e abióticas do ambiente⁷.

O oceano Atlântico Sul, mais especificamente entre 20°S e 35°S, pode ser subdividido em três ambientes biogeoquimicamente distintos⁸: a província do Brasil (BRAZ), dominada por corrente de contorno oeste, influenciada por sistemas de ressurgência e pelo sistema frontal da confluência Brasil-Malvinas e ainda, por eventos de mesoescala e descarga fluvial^{9,10}; a província do Giro do Atlântico Sul (SATL), regulada pela circulação anticiclônica do giro subtropical, e influenciada principalmente pela liberação de vórtices provenientes da corrente das Agulhas¹¹ e, por fim, a Província Africana (AFR) que, neste trabalho, é representada junção das províncias do Leste Africano (EAFR) e de Benguela (BENG), que são dominadas por corrente de contorno leste, e caracterizada pela presença de intensos sistemas de ressurgência^{12,13}.

Estas áreas do oceano Atlântico Sul foram investigadas entre os meses de setembro a dezembro (primavera) de 2009 e 2011 e, durante um cruzeiro entre junho/julho de 2015^{14,15}. Foram coletados dados em 311 estações hidrográficas. Os parâmetros físico-químicos foram obtidos por medições de perfis de condutividade-temperatura-pressão (CTD). As determinações da pressão parcial do CO₂ no oceano ($p\text{CO}_2^{\text{sw}}$) foram feitas usando sistemas autônomos contínuos e rotinas de redução de dados¹⁶. Para alguns cruzeiros, foi necessário modelar a $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ usando algoritmos desenvolvidos para a região de estudo¹⁴ e a pressão parcial do CO₂ na atmosfera ($p\text{CO}_2^{\text{atm}}$) foi obtida através do portal NOAA-ESRL (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/data/>). Os fluxos líquidos de CO₂ (FCO₂) calculados pelo produto da diferença de $p\text{CO}_2$ mar-ar ($\Delta p\text{CO}_2$) e os coeficientes de solubilidade do CO₂¹⁷ e de transferência gasosa¹⁸.

As análises de pigmentos fitoplanctônicos foram feitas por cromatografia líquida de alta performance (CLAP)^{19,20}. A contribuição relativa dos grupos algais para a biomassa total foi calculada usando o software quimio-taxonômico CHEMTAX v1.95²¹.

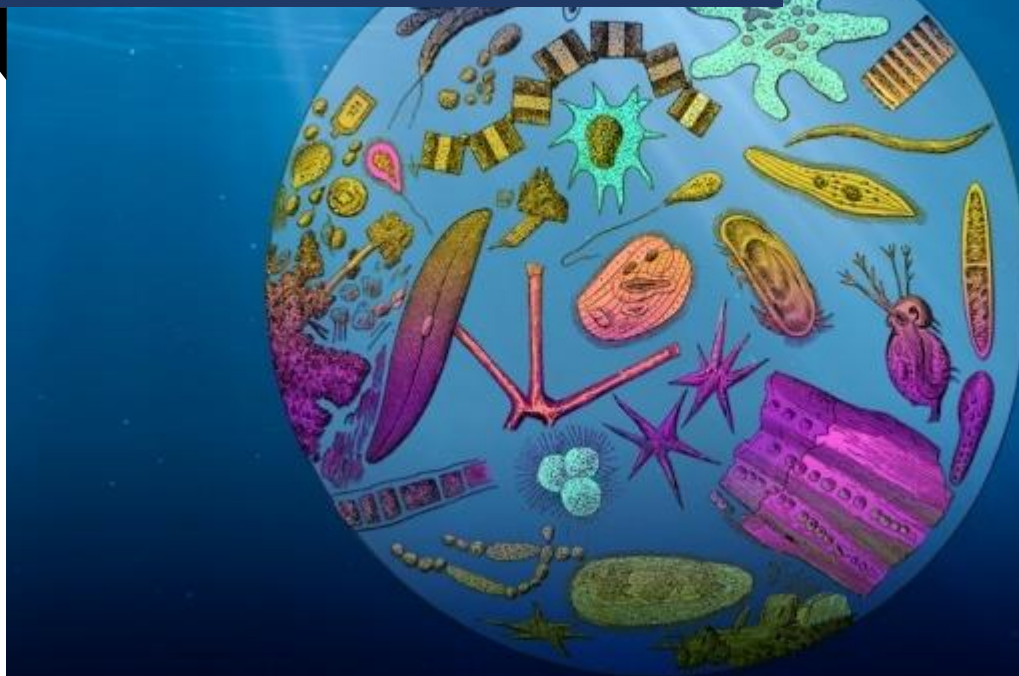
As províncias apresentaram em média comportamentos de absorção de CO₂ atmosférico, mas com intensidades distintas. Na BRAZ, ocorreram os maiores valores de $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$, sendo medido, em algumas estações, um FCO₂ positivo, porém os FCO₂ foram em média de absorção ($-7,1 \pm 10,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Essa região é marcada por alta variabilidade espacial em relação aos FCO₂, o que já foi apontado em estudos prévios^{22,23}. Na região central do giro subtropical, na SATL, o comportamento dos FCO₂ foi de absorção, sendo mais homogêneo entre 20°S e 30°S, no entanto, em 35°S as taxas de absorção triplicaram. Na região leste da bacia, na AFR, temos as mais altas taxas de absorção de CO₂, principalmente à 30°S, onde a média dos FCO₂ atinge a magnitude de $-49,0 \pm 15,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.



Exemplos de organismos fitoplanctônicos encontrados no oceano Atlântico Sul.

Science For The Public

" Há ainda muita dificuldade em relacionar a dominância de determinado grupo [fitoplanctônico] a mudanças na capacidade de absorção de CO₂."



MIT News

Em relação aos grupos de fitoplâncton dominantes, *Prochlorococcus* e *Synechococcus* foram os grupos dominantes entre 20°S e 30°S na BRAZ. Todavia, com o aumento da latitude, foi observado um aumento na biomassa de diatomáceas, conjuntamente com um aumento na capacidade dessa região de absorver CO₂. Na SATL, ocorreu um aumento do grupo haptófitas com o aumento da latitude em detrimento dos *Prochlorococcus* e *Synechococcus*, concomitantemente com um incremento de até três vezes na absorção de CO₂. A AFR foi dominada por haptófitas, atingindo os maiores fluxos de absorção em média em 30°S. Em 35°S, as diatomáceas aumentam o seu percentual e os FCO₂ ficam em torno de $-15,7 \pm 9,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Há ainda muita dificuldade em relacionar a dominância de determinado grupo a mudanças na capacidade de absorção de CO₂ em determinada região, uma vez que o fitoplâncton é afetado pela temperatura, competição por luz e disponibilidade de nutrientes e tudo isso é afetado pelo aumento dos níveis de CO₂ atmosféricos. A quantidade de processos relevantes em diferentes escalas ocorrendo simultaneamente e a resposta da composição das comunidades fitoplanctônicas às variações ambientais é bastante complexa, sendo difícil observar potenciais mudanças em escala global a partir de medições *in situ*²⁴. Os efeitos concomitantes de mudanças em diversos parâmetros que regulam a bomba biológica do carbono precisam ser melhor avaliados para que possamos entender como a mesma pode enfraquecer ou ser reforçada com as mudanças no sistema carbonato dos oceanos.

Referências

1. Sabine, C. L. *et al.* The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* (80-.). **305**, 367–371 (2004).
2. Sarmiento, J. L. & Gruber, N. Sinks for anthropogenic carbon. *Phys. Today* **55**, 30 (2002).
3. Basu, S. & Mackey, K. R. M. Phytoplankton as Key Mediators of the Biological Carbon Pump : Their Responses to a Changing Climate. (2018). doi:10.3390/su10030869
4. Cullen, J. O. H. N. J. C. *Chapter 8 . PHYSICAL INFLUENCES ON MARINE ECOSYSTEM DYNAMICS*. **12**, (John Wiley & Sons, Inc., 2002).
5. Schloss, I. R. *et al.* Role of plankton communities in sea-air variations in pCO₂ in the SW Atlantic Ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **332**, 93–106 (2007).
6. Litchman, E. *et al.* Global biogeochemical impacts of phytoplankton: A trait-based perspective. *J. Ecol.* **103**, 1384–1396 (2015).
7. Arrigo, K. R. *et al.* Phytoplankton Community Structure and the Drawdown of Nutrients and C O 2 in the Southern Ocean. 1–3 (1999).
8. Longhurst, A. R. Ecological Geography of the sea. in *Academic, San Diego, Calif* 398 pp. (Academic Press, 2006). doi:10.1016/B978-0-12-455521-1.50010-3
9. Piola, A. R., Matano, R. P., Palma, E. D. & Mo, O. O. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic Shelf The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. 1–5 (2005). doi:10.1029/2004GL021638
10. Garcia, V. M. T. *et al.* Environmental factors controlling the phytoplankton blooms at the Patagonia shelf-break in spring. *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* **55**, 1150–1166 (2008).
11. Lutjeharms, J. R. E. Three decades of research on the greater Agulhas Current To cite this version : Three decades of research on the greater Agulhas Current. *Ocean Sci.* **3**, 129–147 (2007).
12. Rae, C. M. D. A demonstration of the hydrographic partition of the Benguela upwelling ecosystem at 26 ° 40 ' S. **27**, 617–628 (2005).
13. Capone, D. G. & Hutchins, D. A. Microbial biogeochemistry of coastal upwelling regimes in a changing ocean. *Nat. Geosci.* **6**, 711–717 (2013).
14. Orselli, I. *et al.* Progress in Oceanography The sea-air CO 2 net fluxes in the South Atlantic Ocean and the role played by Agulhas eddies. *Prog. Oceanogr.* **170**, 40–52 (2019).
15. Carvalho, A. C. O. *et al.* The impact of mesoscale eddies on the phytoplankton community in the South Atlantic Ocean : HPLC-CHEMTAX approach. *Mar. Environ. Res.* **144**, 154–165 (2019).
16. Pierrot, D. *et al.* Deep-Sea Research II Recommendations for autonomous underway p CO 2 measuring systems and data-reduction routines. **56**, 512–522 (2009).
17. Weiss, R. F. No Title. **2**, 203–215 (1974).
18. Wanninkhof, R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnol. Oceanogr. Methods* **12**, 351–362 (2014).
19. Zapata, M., Rpdíguez, F. & Garrido, J. L. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton : a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine- containing mobile phases. **195**, 29–45 (2000).
20. Mendes, C. R., Cartaxana, P. & Brotas, V. OCEANOGRAPHY : METHODS HPLC determination of phytoplankton and microphytobenthos pigments : comparing resolution and sensitivity of a C 18 and a C 8. (2007). doi:10.4319/lom.2007.5.363
21. Mackey, M. D., Mackey, D. J., Higgins, H. W. & Wright, S. W. CHEMTAX - A program for estimating class abundances from chemical markers: Application to HPLC measurements of phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **144**, 265–283 (1996).
22. Ito, R. G., Schneider, B. & Thomas, H. Distribution of surface fCO₂ and air-sea fluxes in the Southwestern subtropical Atlantic and adjacent continental shelf. *J. Mar. Syst.* **56**, 227–242 (2005).
23. Ito, R. G., Tavano, V. M., Mendes, C. R. B. & Garcia, C. A. E. Sea-air CO₂ fluxes and pCO₂ variability in the Northern Antarctic Peninsula during three summer periods (2008-2010). *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* (2017). doi:10.1016/j.dsr2.2017.09.004
24. Alvain, S. *et al.* Remote Sensing of Environment Rapid climatic driven shifts of diatoms at high latitudes. *Remote Sens. Environ.* **132**, 195–201 (2013).

Qual a relação dos vórtices das Agulhas com o estado de acidificação do oceano Atlântico Sul?

What is the Agulhas eddies role on the South Atlantic Ocean acidification state?

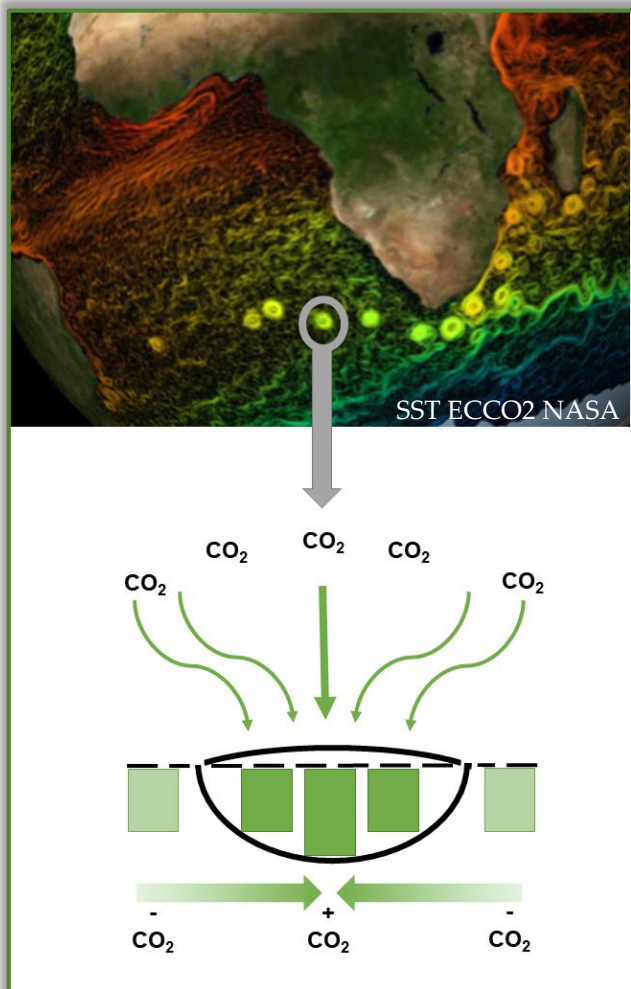
Iole B. M. Orselli^{1,2,3,4},
Rodrigo Kerr^{1,2}, Catherine
Goyet^{3,4}, José L. L. de
Azevedo¹.

¹Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Av. Itália km 8, s/n, Rio Grande, 96203-900, RS, Brasil.

²Brazilian Ocean Acidification Network (BrOA), Av. Itália km 8, Rio Grande, 96203-900, RS, Brasil.

³IMAGES_ESPACE-DEV, Université de Perpignan Via Domitia (UPVD), 52 ave. Paul Alduy, 66860, Perpignan, França.

⁴ESPACE-DEV UMR UG UA UM IRD, Maison de la télédétection, 500 rue Jean-François Breton, 34093, Montpellier Cedex 5, França.



Abstract

The Agulhas eddies influence the Atlantic Meridional Overturning Circulation, mainly because the amount of heat and salt they transport. Agulhas eddies also influence ocean-atmosphere interactions. Even admitting that these mesoscale eddies play a vital role on ocean-atmosphere interactions, their impact on the changes of the marine carbonate system are not yet constrained. Thus, the development of this PhD thesis focused on characterize the CO₂ uptake/transport by the Agulhas eddies and the CO₂ system behaviour inside these eddies during their propagation through the South Atlantic Ocean. We used *in situ* data from oceanographic cruises to develop some carbonate system models. We observed that Agulhas eddies play a significant role on atmospheric CO₂ uptake and contain more anthropogenic carbon than their surrounding waters. Because 30% of the Agulhas eddies interact with the Brazil Current, we consider that they are capable to strength the acidification of the South Atlantic Central Water.

• **Palavras-chave:** Vórtices das Agulhas, Fluxos de CO₂; Sistema carbonato; Carbono antropogênico; Oceano Atlântico Sul.

• **Keywords:** Agulhas eddies; CO₂ fluxes; Carbonate system; Anthropogenic carbon; South Atlantic Ocean.



Iole Orselli
Doutoranda

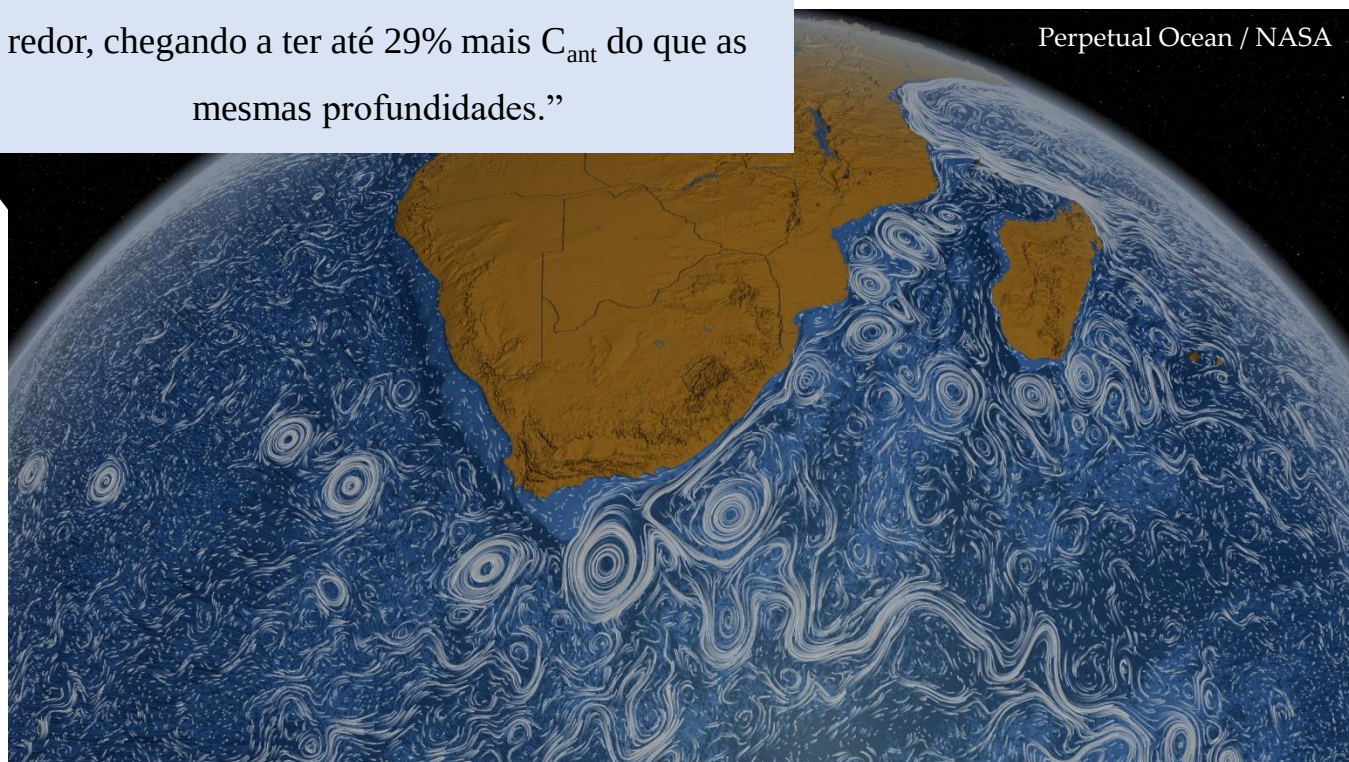
Atividades humanas vêm liberando grandes quantidades de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera desde a Revolução Industrial (~1750). Parte desse excesso de CO_2 é capturado pelos diferentes oceanos, que reagem a essas variações de formas diferentes. Esse excesso de CO_2 , junto com o excesso de calor, vêm causando perturbações e alterações nas correntes superficiais, hidrodinâmica costeira e no ciclo do sistema carbonato (Campos et al., 2015).

Hoje em dia já se sabe que essas perturbações no sistema carbonato alteram o estado de acidificação dos oceanos, o que é chamado ‘o outro problema do CO_2 ’ (Doney et al., 2009).

Por conta desses impactos que vêm sendo observados no ambiente marinho, diversos estudos estão sendo direcionados a melhor compreender os processos de captura do CO_2 atmosférico, bem como as consequências causadas por esse excesso de CO_2 , afim de melhorar as projeções climáticas futuras e fornecer dados para o desenvolvimento de políticas públicas (Le Quéré et al., 2013).

Sabe-se bem que o CO_2 é capturado pelos oceanos por meio de processos físicos (solubilidade) e biológicos (fotossíntese), porém o sistema carbonato funciona basicamente como um ciclo fechado, em que o CO_2 capturado é devolvido à atmosfera também pelos processos físicos (ressurgência) e biológicos (formação de carapaças calcárias). Dessa forma, esse excesso de CO_2 liberado por atividade humana, conhecido como carbono antropogênico (C_{ant}) é capturado basicamente por processos físico-químicos (Howes et al., 2015). Assim, estudos voltados ao entendimento de captura de CO_2 e seu transporte para camadas profundas dos oceanos por processos físicos vêm sendo encorajados.

“Os vórtices das Agulhas carregam um excesso de cerca de 22% a mais de C_{ant} do que as águas ao redor, chegando a ter até 29% mais C_{ant} do que as mesmas profundidades.”



No oceano Atlântico Sul observa-se os vórtices das Agulhas, que estão entre as maiores estruturas de mesoescala dos oceanos (Biaستoch et al., 2008). Estes atingem até 300 km de raio e profundidades da ordem de 2500 m, chegando até a 4000 m (Biaستoch & Krauss, 1999; Beal, 2009).

Além disso, os vórtices das Agulhas apresentam um tempo de vida que chega a mais de 2 anos (Lutjeharms, 2006). Por serem estruturas anticiclônicas, estes vórtices estão associados às regiões em que o oceano perde calor para a atmosfera (Villas Bôas et al., 2015), porém seu papel em relação ao sistema carbonato ainda é pouco estudado. Dessa forma, o objetivo principal dessa pesquisa de doutorado foi investigar a relação dos vórtices das Agulhas com a captura e transporte de CO_2/C_{ant} ao longo de suas vidas e qual o papel dessas estruturas no estado de acidificação no oceano Atlântico Sul.

Em um estudo dedicado à observação desses vórtices, foram coletados dados *in situ* de 6 dessas estruturas em diversos estágios de vida. Este cruzeiro oceanográfico foi denominado “*Following Ocean Rings in the South Atlantic*” (FORSA), coordenado pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL) e foi realizado em cooperação de diversas instituições brasileiras (FURG, UFPE, UERJ, INPE). Usando dados do sistema de monitoramento contínuo da fração molar de CO_2 na água e no ar (Pierrot et al., 2009), pudemos calcular a pressão parcial de CO_2 no oceano e na atmosfera e os fluxos líquidos desse gás entre esses reservatórios. Dessa forma, pudemos concluir que eles conseguem capturar mais CO_2 da atmosfera do que as águas adjacentes (Orselli et al., 2019a).

Para investigar o sistema carbonato ao longo da coluna d'água, foram usados outros 3 cruzeiros oceanográficos além do FORSA: 2 campanhas realizadas na linha de repetição A10 CLIVAR/WOCE, de 2003 e 2011, e as duas pernas do cruzeiro Trans-Atlântico II, realizado em 2011. Como só havia dados do sistema carbonato para os cruzeiros A10, foram desenvolvidos modelos para reconstrução desses dados a partir de dados de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido. Assim, foi possível calcular a concentração de C_{ant} em todas essas seções do Oceano Atlântico Sul. Como resultado principal, pudemos observar que os vórtices das Agulhas carregam um excesso de cerca de 22% a mais de C_{ant} do que as águas ao redor, chegando a ter até 29% mais C_{ant} do que as mesmas profundidades (Orselli et al., 2019b).



Fotos do equipamento utilizado para a coleta de dados contínuos de fração molar de CO_2 na água do mar, ao longo dos cruzeiros, instalado no Navio Polar Almirante Maximiano, em um cruzeiro para o Norte da Península Antártica.

Fotos: Iole Orselli

Como conclusão principal dessa tese, pudemos demonstrar que os vórtices das Agulhas são capazes não só de capturar mais CO_2 do que as águas ao seu redor, como também de transferir para o interior da coluna d'água, podendo carregar mais C_{ant} ao longo de suas trajetórias. Como estudos mostram que 30% dessas estruturas liberadas no vazamento das Agulhas atingem a costa Oeste do Oceano Atlântico Sul e chegam a interagir com a Corrente do Brasil (Guerra et al. 2018; Laxenaire et al. 2018), podemos indica-los como um dos gatilhos que podem estar intensificando a acidificação observada para as camadas centrais dessa região. A acidificação da *South Atlantic Central Water* foi estudada em estudos pretéritos e foi observada maior do que as águas das camadas acima e abaixo dela (*Tropical Water* e *Antarctic Intermediate Water*, respectivamente; Salt et al., 2015; Carvalho-Borges et al., 2018; Orselli et al., 2018; Gruber et al., 2019). Além disso, estudos demonstraram que o lado Oeste do Oceano Atlântico Sul está experimentando uma acidificação maior que o lado Leste, devido aos processos de ventilação mais intensos ou trocas de carbono através da plataforma continental (Ríos et al, 2003; Carvalho-Borges et al., 2018), mas pode ser também pela chegada dos vórtices das Agulhas a essa região.

Devido às alterações no sistema de ventos no Atlântico Sul, i.e., intensificação dos ventos de oeste, mais vórtices das Agulhas podem estar sendo liberados (Biaostoch et al., 2009). Assim, mais C_{ant} pode vir a ser transportado até a costa Oeste do Oceano Atlântico Sul. Esse excesso de CO_2 chegando à costa Brasileira pode impactar ecossistemas marinhos sensíveis (recifes de corais, rodolitos, áreas costeiras) que têm uma grande importância ecológica e econômica e são consideradas fontes não renováveis (Campos et al., 2015, Kerr et al., 2016; Carvalho-Borges et al., 2018).



Foto: Iole Orselli

Referências

- Beal, L. M., 2009. A Time Series of Agulhas Undercurrent Transport. *Journal of Physical Oceanography*, 39, 2436-2450
- Biaostoch, A. & Krauss, W., 1999. The role of mesoscale eddies in the source regions of the Agulhas current. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 2303-2317
- Biaostoch, A., Böning, C.W. & Lutjeharms, J. R. E., 2008. Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation. *Nature*, 456, 489–492, <http://doi.org/10.1038/nature07426>
- Biaostoch, A., Böning, C. W., Schwarzkopf, F. U., Lutjeharms, J. R. E., 2009. Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of southern hemisphere westerlies. *Nature*, Vol. 462/26. <http://doi.org/10.1038/nature08519>
- Campos, E.J.D., França, C.A.S, Rodrigues, R.R., Muelbert, J.H., 2015. Inter-relações entre o Atlântico Sul, plataforma continental e regiões costeiras do sul e do sudeste do Brasil. In: *Ciência das mudanças climáticas e sua interdisciplinaridade*; Ambrizzi, T., Jacobi, P.R. & Dutra, L.M.M., Eds. ISBN: 978-85-391-0714-8.
- Carvalho-Borges, M., Orselli, I. B. M., Ferreira, M. L. de C. & Kerr, R., 2018. Seawater acidification and anthropogenic carbon distribution on continental shelf and slope of the western South Atlantic Ocean. *J Marine Syst*, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.06.008>
- Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A., Kleypas, J.A., 2009. Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Ann Rev Mar Sci* 1:169-1923
- Gruber, N., Clement, D., Carter, B.R., et al., 2019. The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007. *Science*, 363, 1193–1199.
- Guerra, L.A.A., Paiva, A.M. & Chassignet, E.P., 2018. On the translation of Agulhas rings to the western South Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res I*, 139, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2018.08.005>
- Howes, E. L., Joos, F., Eakin, M., Gattuso, J.-P., 2015. The Oceans 2015 Initiative, Part I: An updated synthesis of the observed and projected impacts of climate change on physical and biological processes in the oceans, Studies N°02/15, IDDRI, Paris, France, 52 pp.
- Kerr, R., Cunha, L. C., Kikuchi, R. K. P., et al., 2016. The western South Atlantic Ocean in a high-CO₂ world: current measurement capabilities and perspectives. *Environ Manage*, Vol. 57, pp. 740–752. <http://doi.org/10.1007/s00267-015-0630-x>
- Laxenaire, R., Speich, S., Blanke, B., Chaigneau, A., Pegliasco, C., Stegner, A., 2018. Anticyclonic eddies connecting the western boundaries of Indian and Atlantic oceans. *J Geophys Res Oceans*, <http://doi.org/10.1029/2018JC014270>
- Le Quéré, C., Peters, G. P., Andres, et al., 2013. Global Carbon Budget 2013. *Earth System Science Data*, Vol. 6, 689-760
- Lutjeharms, J. R. E. (2006). *The Agulhas Current*. Springer. Berlin Heidelberg. <http://doi.org/10.1007/3-540-37212-1>
- Orselli, I.B.M., Kerr, R., Ito, R.G., Tavano, V. M., Mendes, C. R. B. & Garcia, C. A. E., 2018. How fast is the Patagonian shelf-break acidifying? *J Marine Syst*, 178, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.10.007>
- Orselli, I.B.M., Kerr, R., Azevedo, J.L.L., Galdino, F., Araujo, M. & Garcia C.A.E., 2019a. The sea-air CO₂ net fluxes in the South Atlantic Ocean and the role played by Agulhas eddies. *Prog Oceanogr*, 2019, 170, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.10.006>
- Orselli, I.B.M., Goyet, C., Kerr, R., Azevedo, J.L.L., Araujo, M., Galdino, F., Touratier, F. & Garcia C.A.E., 2019b. The Effect of Agulhas Eddies on Absorption and Transport of Anthropogenic Carbon in the South Atlantic Ocean. *Climate*, 7, 84; doi:10.3390/cli7060084
- Pierrot, D., Neil, C., Sullivan, K., Castle, R., Wanninkhof, R., Lüger, H., et al., 2009. Recommendations for autonomous underway pCO₂ measuring systems and data-reduction routines. *Deep-Sea Research II*, 56, 512–522
- Ríos, A. F., Álvarez-Salgado, X. A., Pérez, F. F., Bingler, L. S., Arístegui, J. & Mémary, L., 2003. Carbon dioxide along WOCE line A14: Water masses characterization and anthropogenic entry. *Journal of Geophysical Research*, 108(C4), 3123. <http://doi.org/10.1029/2000JC000366>.
- Salt, L. A., van Heuven, S. M. A. C., Claus, M. E., et al., 2015. Rapid acidification of mode and intermediate waters in the southwestern Atlantic Ocean. *Biogeosciences*, 12, 1387–1401. <http://doi.org/10.5194/bg-12-1387-2015>
- Villas Bôas, A.B, Sato, O. T., Chaigneau, A. & Castelão, G.P., 2015. The signature of mesoscale eddies on the air-sea turbulent heat fluxes in the South Atlantic Ocean. *Geophys Res Lett*, 42(6), 1856–1862, <http://doi.org/10.1002/2015GL063105>

Estrutura das massas de água no estreito de Bransfield, Antártica, durante os verões austrais de 1960 a 2019

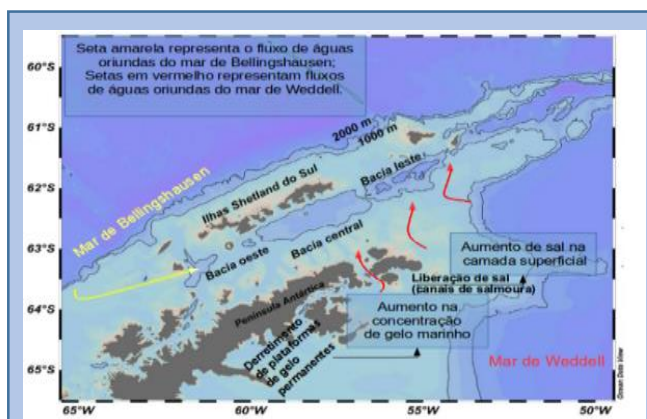
Brendon Yuri Damini¹, Rodrigo Kerr¹, Tiago S. Dotto¹

¹Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Av. Itália km 8, s/n, Rio Grande, 96203-900, RS, Brasil.

Abstract

The Bransfield Strait receives influence from dense shelf waters recently ventiled on Weddell Sea continental shelf. This dense water sinks and remains restrict in the Bransfield deep basins due to its thermohaline properties and strait topographic and bathymetric configuration, respectively. Thus, this region is referenced as a proxy area for temporal variability study of shelf water masses sourced in the Weddell Sea. The optimum multiparameter analysis (OMP) method was applied to determine the percentage of source water mass per relative water volume. Measured parameters from 1960 to 2019 demonstrated a negative trend in Bransfield Strait central basin. Whereas, In the eastern basin it was observed positive for conservative temperature and negative for absolute salinity and neutral density. The results indicates a strong interannual variability of Bransfield Strait water masses composition, which may be related to wind patterns changes and an increased sea ice concentration in the northwestern Weddell Sea.

- **Keywords:** Temporal variability; Thermodynamic Equation of Sea Water; Optimum Multiparameter analysis; Southern Ocean; Weddell Sea.
- **Palavras-chave:** Variabilidade temporal; Equação termodinâmica da água do mar; Análise Otimizada de Múltiplos Parâmetros; oceano Austral; mar de Weddell.



O aumento do derretimento de gelo continental recente gera um aumento do fluxo de água doce para a superfície oceânica no noroeste do mar de Weddell. A diminuição da salinidade das águas oceânicas superficiais favorece uma maior taxa de congelamento da água do mar, facilitando a formação de gelo marinho. Durante o processo de formação de gelo marinho, os sais dissolvidos que até então estavam presentes na água do mar são liberados para a água subsuperficial de plataforma, a qual pode ficar mais salina e mais densa. Essa água é então exportada do mar de Weddell para o SB dependendo do padrão de ventos predominantes e da circulação oceânica. Ao chegar nas bacias profundas do SB, essa água fica mais isolada das águas adjacentes e conserva as características térmicas e salinas da sua região de formação.

Brendon Yuri Damini Graduando



Brendon Damini
arquivo pessoal

O mar de Weddell, localizado no setor Atlântico do oceano Austral, se caracteriza por possuir águas com baixa temperatura e elevada salinidade. Destacando-se como uma das principais regiões formadora e exportadora de massas de água densas (Gill, 1973; Carmarck & Foster, 1975; Orsi et al., 1999; Gordon et al., 2001; Dotto et al., 2016; van Caspel et al., 2018). Adicionalmente, as massas de água densas de plataformas formadas no mar de Weddell são precursoras da Água de Fundo Antártica (AABW¹), que desempenha papel relevante na circulação meridional do Atlântico (AMOC). A AMOC, por sua vez, é responsável pelo transporte de grandes quantidades de água, calor, sais, gases dissolvidos, nutrientes e outras substâncias entre os oceanos globais (Carmarck & Foster, 1975; Foldvik et al. 1985; Nicholls et al. 2009). Assim, mudanças nas massas de água densas de plataforma podem impactar na produção de AABW e, portanto, causar impactos na ventilação e renovação das águas de fundo dos oceanos (Azaneu et al., 2013).

O estreito de Bransfield (SB), localizado entre as ilhas Shetland do Sul e o norte da Península Antártica, recebe aporte de águas densas de plataforma recentemente ventiladas no mar de Weddell. Estas águas, por razão das propriedades termohalinas, afundam para o leito oceânico e permanecem restringidas nas bacias profundas da região devido as configurações topográficas e batimétricas do EB. Assim, o SB é considerado uma região proxy para o estudo da variabilidade temporal destas massas de águas oriundas do mar de Weddell (Dotto et al. 2016).

Este trabalho possui como finalidade: (i) estender a série temporal analisada por Dotto et al. (2016); e (ii) de uma maneira mais acurada, atualizar a análise de mistura de massas de água regionais através da utilização da nova Equação Termodinâmica de Estado da Água do Mar (TEOS-10). Com isso, o estudo ajudará no caráter de monitorar os aspectos termohalinos encontrados na região, e assim, atualizar as tendências dos parâmetros físicos das massas de água profundas para o SB até o ano de 2019. Para isto, serão utilizados um conjunto de dados coletados apenas no período de verão austral devido subamostragem nos períodos de inverno e à variabilidade sazonal das águas da região. Três fontes distintas de dados foram investigadas, a saber: dados históricos do Word Ocean Database 2013, dados do instituto alemão Alfred Wegener Institute e dados de alta resolução de CTD (sigla derivada do inglês: conductivity, temperature and depth) adquiridos pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL).

As estações oceanográficas foram separadas por batimetria e bacias (i.e., Leste, Oeste, Central). Neste estudo, somente as estações das bacias Leste e Central foram utilizadas, pois possuem maiores profundidades e uma maior contribuição de águas de plataforma oriundas do mar de Weddell (Dotto et al.,2016). A quantificação da contribuição da mistura das águas tipo fonte presentes nas duas bacias foi realizada através da utilização do método de Análise Otimizada de Parâmetros Múltiplos descrito por Tomczak e Large (1989).

“ Os resultados indicaram que há uma grande variabilidade interanual das massas de água dentro do Estreito de Bransfield.”



Foto: Iole Orselli

As séries temporais de anomalias dos parâmetros físicos (temperatura conservativa, salinidade absoluta e densidade neutra) e as respectivas tendências foram analisadas apenas nos estratos mais profundos da coluna d'água, ou seja, profundidades maiores ou igual do que 800 m e densidade neutra $\gamma^n > 28,27 \text{ kg m}^{-3}$.



Foto: Iole Orselli



Foto: Iole Orselli

Desse modo, restringe-se as massas de água com as propriedades termohalinas originais mais conservadas e as isola de efeitos dos processos de mistura com outras massas de águas menos densas (Dotto et al., 2016).

Os resultados indicaram que há uma grande variabilidade interanual das massas de água dentro do SB. Essa variabilidade das massas de água está possivelmente relacionada com as mudanças nos padrões de ventos. Dependendo da direção predominante poderá haver uma entrada maior de massas de água oriundas do mar de Wedell para dentro do SB. E, além disso, observou-se um aumento da intrusão de uma Água de Plataforma de Alta Salinidade (HSSW) oriunda do mar de Weddell nas últimas duas décadas. De acordo com Dotto (2015), essa maior concentração de HSSW pode estar relacionada com o aumento na concentração de gelo marinho no noroeste do mar de Weddell, em conjunto com padrões de ventos que permitiram a maior entrada destas águas no SB.

Além disso, o estudo evidenciou sinais de uma tendência negativa para temperatura conservativa, salinidade absoluta e densidade neutra na bacia Central, enquanto para a bacia Leste uma tendência positiva foi observada para a temperatura conservativa e negativa para os demais parâmetros.

Referências

- Azaneu, M., Kerr, R., Mata, M. M., & Garcia, C. A. (2013). Trends in the deep Southern Ocean (1958–2010): Implications for Antarctic Bottom Water properties and volume export. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(9), 4213-4227.
- Carmack, E. C., & Foster, T. D. (1975a). On the flow of water out of the Weddell Sea. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. Vol. 22, No. 11, pp. 711-724.
- Caspel, van M., Hellmer, H. H. & Mata, M. M. (2018). On the ventilation of Bransfield Strait deep basins. *Deep-Sea Research Part II, Topical Studies in Oceanography*, 149, 25–30.
- Dotto, T. S. (2015). Variabilidade e tendência de longo período das massas de água do estreito de Bransfield, Antártica. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Dotto, T. S., Kerr, R., Mata, M. M., & Garcia, C. A. (2016). Multidecadal freshening and lightening in the deep waters of the Bransfield Strait, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(6), 3741-3756.
- Foldvik, A., Gammelsrød, T., & Tørresen, T. (1985). Circulation and water masses on the southern Weddell Sea shelf. *Oceanology of the Antarctic continental shelf*, 5-20.
- Gill, A. E. (1973). Circulation and bottom water production in the Weddell Sea. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. Vol. 20, No. 2, pp. 111-140.
- Gordon, A., Visbeck, M., & Huber, B. (2001). Export of Weddell Sea deep and bottom water. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 106, 9005-9017.
- Nicholls, K. W., Østerhus, S., Makinson, K., Gammelsrød, T., & Fahrbach, E. (2009). Ice-ocean processes over the continental shelf of the southern Weddell Sea, Antarctica: A review. *Reviews of Geophysics*, 47(3).
- Orsi, A. H., Johnson, G. C., & Bullister, J. L. (1999). Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water. *Progress in Oceanography*, 43(1), 55-109.
- Tomczak, M., & Large, D. G. (1989). Optimum multiparameter analysis of mixing in the thermocline of the eastern Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C1), 16141-16149.

Variabilidade interanual do estado de acidificação e carbono antropogênico no Estreito de Bransfield, norte da Península Antártica

Interannual variability of the ocean acidification state and anthropogenic CO₂ in the Bransfield Strait, northern Antarctica Peninsula

Juan Camilo Torres-Lasso^{1,2},
Rodrigo Kerr^{1,2}, Jannine
Marquez Lencina-Avila^{1,2}, Iole
Beatriz Marques Orselli^{1,2,3,4},
Mariah de Carvalho-Borges^{1,2},
Catherine Goyet^{3,4}, Mauricio M.
Mata¹

¹Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Av. Itália km 8, s/n, Rio Grande, 96203-900, RS, Brasil.

²Brazilian Ocean Acidification Network (BrOA), Av. Itália km 8, Rio Grande, 96203-900, RS, Brasil.

³IMAGES ESPACE-DEV, Université de Perpignan Via Domitia (UPVD), 52 ave. Paul Alduy, 66860, Perpignan, França.

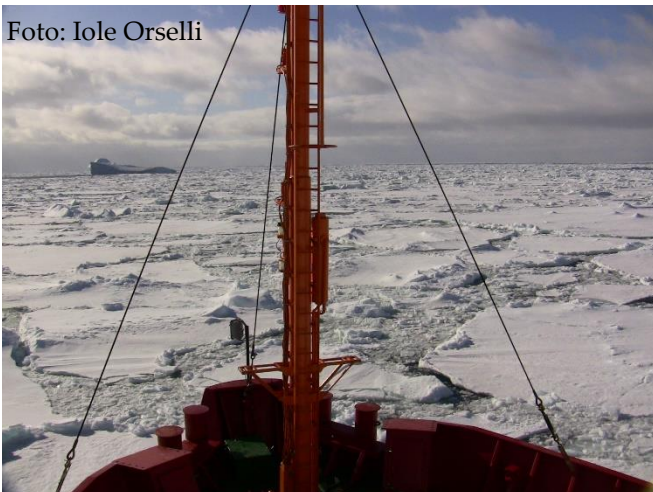
⁴ESPACE-DEV UMR UG UA UM IRD, Maison de la télédétection, 500 rue Jean-François Breton, 34093, Montpellier Cedex 5, França.

Abstract

We analyzed the hydrographic and chemical properties of the water masses in the Bransfield Strait, northern Antarctic Peninsula, quantifying the anthropogenic carbon dioxide dissolved in them and determining the ocean acidification state in the region. Based on the *Tracer combining Oxygen, inorganic Carbon, and total Alkalinity* (TrOCA) approach, we estimated an averaged C_{ant} concentration of $51 \mu\text{mol kg}^{-1}$, which is slightly higher in the central basin ($53 \mu\text{mol kg}^{-1}$) than in the eastern basin ($49 \mu\text{mol kg}^{-1}$). The averaged depth of the aragonite saturation horizon is ~ 200 m shallower in the central than the eastern basin of the strait. The results indicated that recent ventilation of the Bransfield Strait deep basins resulted in considerable amounts of C_{ant} , mainly through the advection of High Salinity Shelf Water from the Weddell Sea continental shelf.

- **Keywords:** Southern Ocean; Acidification state; Carbon dioxide.
- **Palavras-chave:** Oceano austral; Estado de acidificação; Dióxido de carbono.

Foto: Iole Orselli



Lucas Almeida, Julia Mansur, Juan Torres e Brendon Damini durante a expedição antártica de 2019



Desde a revolução industrial, o nível do CO_2 na atmosfera aumentou drasticamente devido às atividades humanas e principalmente pelo consumo de carvão, petróleo e uso do solo, alterando o comportamento do ciclo do carbono (Le Quéré *et al.* 2018) atingindo valores de ~ 414 ppmv no presente (2019). Esse excesso de CO_2 na atmosfera, que é posteriormente armazenado nas camadas dos oceanos, é chamado de carbono antropogênico (C_{ant}) (Sarmiento & Gruber 2002). Nas altas latitudes, a absorção de C_{ant} aumenta devido a baixa temperatura da água, sendo regiões mais susceptíveis aos efeitos associados ao câmbio climático.

No mar de Weddell, leste da península Antártica, processos de convecção profunda associadas a formação da Água de Fundo Antártico (McNeil *et al.* 2001, van Heuven *et al.* 2014) permitem absorber e acumular uma alta quantidade de C_{ant} (Tanhua *et al.* 2017), sendo armazenado em níveis profundos por longos períodos de tempo antes que essas massas de água retornem à superfície e interajam novamente com o volume de CO_2 atmosférico (Matear & Lenton 2008).

O estreito de Bransfield, ao norte da península Antártica, é uma região de grande importância devido a sua localização e aos processos dinâmicos que permitem monitorar as massas de água profundas ventiladas no mar de Weddell numa região mais acessível. Nele, variações interanuais nos modos climáticos (El Niño Oscilação do Sul e o Modo Anular do Sul) influenciam a percentagem de mistura das massas de água que enchem as bacias central e leste (Dotto *et al.* 2016, van Caspel *et al.* 2018), além dos volumes advectados desde a bacia oeste ou desde o mar de Weddell (Sangrà *et al.* 2011, Ruiz Barlett *et al.* 2018).

O objetivo geral deste estudo foi quantificar o C_{ant} nas águas das bacias central e leste do estreito de Bransfield e associar com as variações interanuais no seu estado de acidificação, investigando acerca do estado de saturação de CaCO_3 . (Ω_{Calcita} e $\Omega_{\text{Aragonita}} < 1$) e distribuição do pH, determinando as variações interanuais nesses parâmetros.

Esta pesquisa foi desenvolvida pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL) no âmbito do projeto NAUTILUS como parte do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), com os dados hidrográficos e biogeoquímicos obtidos no Navio Polar Almirante Maximiano durante os verões consecutivos entre 2015 e 2018. A partir dos dados obtidos com o sistema CTD 911/Carrossel Sea-Bird de 24 garrafas Niskin, foram feitas as medições químicas de oxigênio dissolvido (pelo método Winkler), alcalinidade total e carbono inorgânico dissolvido total (titulador automatizado Methrom® Titrand 808), nutrientes inorgânicos dissolvidos (Fluorímetro Trilogy e Analisador FIAstar™ 5000) e pH (pHmetro potenciométrico Metrohm® 827).

O TrOCA (*Tracer combining Oxygen, inorganic Carbon, and total Alkalinity*) (Touratier & Goyet 2004b, Touratier *et al.* 2007) foi o método de determinação do teor de CO_2 antropogênico (C_{ant}) aplicado neste estudo, com um erro determinado de $\pm 13 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

Foi descrito o estado de acidificação ao longo das bacias central e leste do estreito de Bransfield com base na distribuição de C_{ant} , pH_{total} , Ω_{Calcita} e $\Omega_{\text{Aragonita}}$ nos verões de 2015 até 2018. Nele, as massas de água de diferentes origens controlam o estado de acidificação da água do mar de acordo aos modos climáticos.





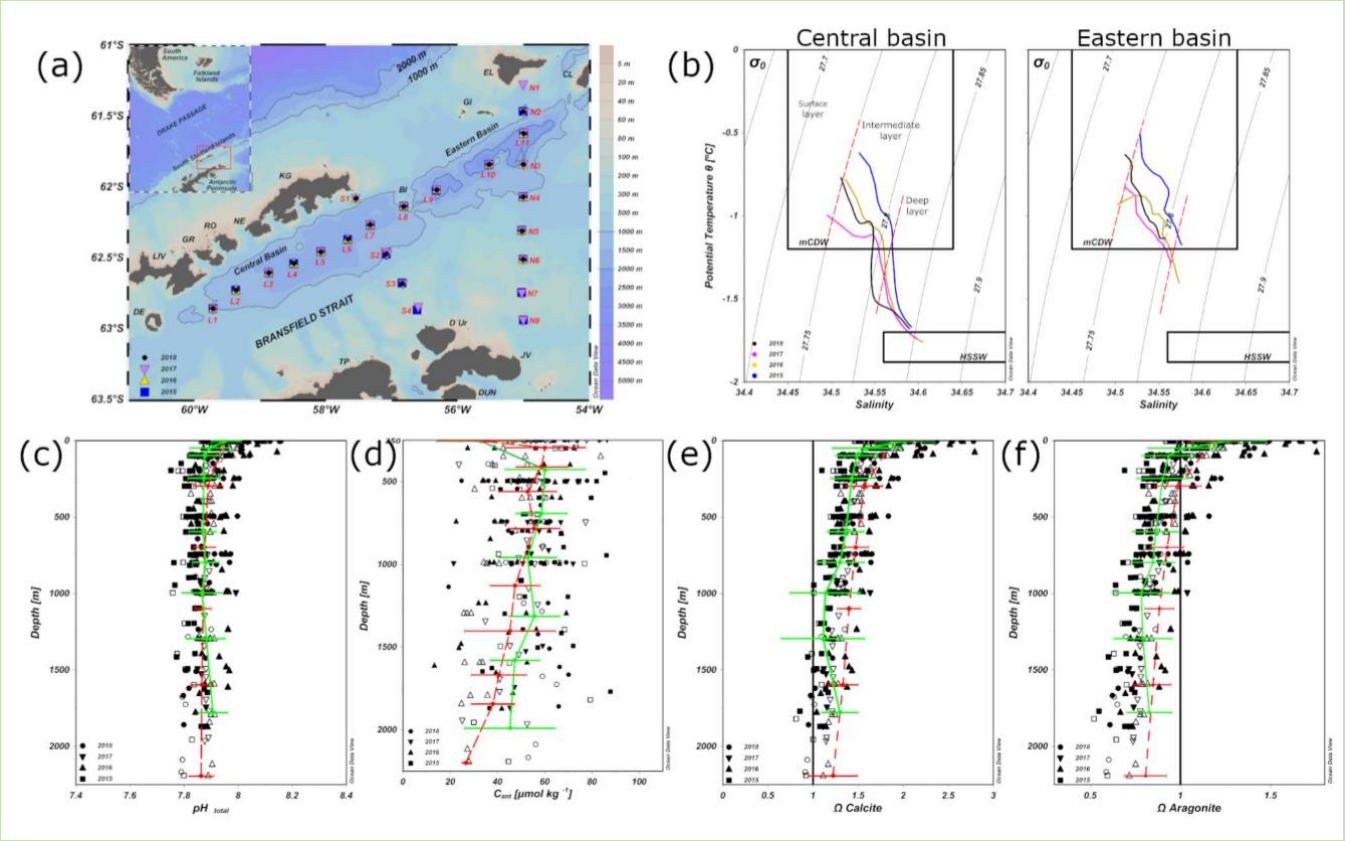
“Variações no estado de acidificação estão influenciadas pelas mudanças do SAM e nos ventos de oeste.”

Foto: Iole Orselli

A camada superficial das bacias central e leste do estreito de Bransfield está associada com à água do mar de Bellingshausen que foi misturada com Água Circumpolar Profunda antes de entrar na bacia oeste do estreito (Sangrà *et al.* 2011, Ruiz Barlett *et al.* 2018), mudando a porcentagem de mistura de acordo com a fase do El Niño Oscilação do Sul (Conrad & Lovenduski 2015) e gerando uma água com maior C_T do que as águas do mar de Bellingshausen (Gordon & Nowlin 1978). Na camada superficial foram observados os maiores valores de pH ($7,91 \pm 0,07$ na bacia central e $7,9 \pm 0,05$ na bacia leste), diminuindo para a camada intermediária e mantendo um valor médio nas duas bacias ($7,87 \pm 0,03$). De acordo com as entradas da Água Circumpolar Profunda modificada, a profundidade do horizonte de saturação varia nos anos de 2016 e 2018 (~ 800 m), tendo uma profundidade média do horizonte de saturação da aragonita de ~ 60 m na bacia central e ~ 270 m na bacia leste do estreito de Bransfield.

Nas camadas intermediária e profunda do estreito de Bransfield, as variações no estado de acidificação estão influenciadas pelas mudanças do SAM e nos ventos de oeste que controlam o giro de Weddell (Naveira Garabato *et al.* 2016), influenciando a absorção de C_{ant} e os processos advectivos para o estreito (Lenton & Matear 2007). Nestas camadas o C_{ant} foi, em média, maior durante 2015 em comparação com os outros anos, tendo uma concentração média estimada em $58 \mu\text{mol kg}^{-1} C_{ant}$, ligeiramente maior que os valores de $\sim 54 \mu\text{mol kg}^{-1} C_{ant}$ observados para 2017 e 2018.

A bacia central do estreito de Bransfield é predominantemente influenciada por uma Água de Plataforma de Alta Salinidade recentemente ventilada na Plataforma de gelo Larsen, com uma menor temperatura na água que induz a diminuição dos estados de saturação e pH, preservando além maiores concentrações de C_{ant} . Enquanto a bacia leste é mais influenciada pela Água de Plataforma de Baixa Salinidade associada à Plataforma de gelo Filchner-Ronne, a qual no processo de advecção é mais exposta a mistura diminuindo a concentração final de C_{ant} .



(a) Map of the Bransfield Strait showing the geographical settings and the oceanographic stations that were sampled between 2015 and 2018. Blue squares, yellow triangles, magenta inverted triangles and black dots show the positions of the CTD oceanographic stations during the NAUTILUS cruises for the years 2015, 2016, 2017 and 2018, respectively. (b) θ -S depth-averaged diagrams for the CTD stations of the central (left side) and eastern (right side) basins of the Bransfield Strait. Blue, yellow, magenta and black lines show the interannual behavior for the years 2015, 2016, 2017 and 2018, respectively. (c) Vertical distribution of pH_{total} in the Bransfield Strait. The symbols depict each year in which the samples were taken (squares, triangles, inverted triangles and dots for the years 2015, 2016, 2017 and 2018, respectively), while the symbols indicate the data per basin (solid symbols for the central basin and open for the eastern basin). The lines indicate the averaged concentration of all years with standard deviations (green lines for the central basin and red lines for the eastern basin). (d) Vertical concentration (in $\mu mol\ kg^{-1}$) of C_{ant} in the Bransfield Strait below 250 m. (e) Vertical distribution of $\Omega_{Calcite}$ and $\Omega_{Aragonite}$ (f) in the Bransfield Strait.

Referências

- Conrad CJ, Lovenduski NS, 2015 Climate-driven variability in the Southern Ocean carbonate system. *J. Clim.* 28, 5335–5350. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00481.1>
- Dotto TS, Kerr R, Mata MM, Eiras Garcia CA, 2016 Multidecadal freshening and lightening in the deep waters of the Bransfield Strait, Antarctica. *J. Geophys. Res. Ocean.* 3741–3756. <https://doi.org/10.1002/2015JC011228>. Received
- Gordon AL, Nowlin WD, 1978 The Basin Waters of the Bransfield Strait. *J. Phys. Oceanogr.* 8, 258–264. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1978\)008<0258:TBWOTB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1978)008<0258:TBWOTB>2.0.CO;2)
- Le Quéré C, Andrew RM, Friedlingstein P, Sitch S, Hauck J, Pongratz J, Pickers PA, Korsbakken JI, Peters GP, Canadell JG, Arneeth A, Arora VK, Barbero L, Bastos A, Bopp L, Chevallier F, Chini LP, Ciais P, Doney SC, Gkritzalis T, Goll DS, Harris I, Haverd V, Hoffman FM, Hoppema M, Houghton RA, Hurtt G, Ilyina T, Jain AK, Johannessen T, Jones CD, Kato E, Keeling RF, Goldewijk KK, Landschützer P, Lefèvre N, Lienert S, Liu Z, Lombardozzi D, Metzl N, Munro DR, Nabel JEMS, Nakaoka S-I, Neill C, Olsen A, Ono T, Patra P, Peregon A, Peters W, Peylin P, Pfeil B, Pierrot D, Poulter B, Rehder G, Resplandy L, Robertson E, Rocher M, Rödenbeck C, Schuster U, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Steinhoff T, Sutton AJ, Tans PP, Tian H, Tilbrook B, Tubiello FN, van der Laan-Luijckx IT, van der Werf GR, Viovy N, Walker AP, Wiltshire AJ, Wright R, Zaehle S, Zheng B, 2018 Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 2141–2194. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>
- Lenton A, Matear RJ, 2007 Role of the Southern Annular Mode (SAM) in Southern Ocean CO₂ uptake. *Global Biogeochem. Cycles* 21, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2006GB002714>
- Matear RJ, Lenton A, 2008 Impact of Historical Climate Change on the Southern Ocean Carbon Cycle. *J. Clim.* 21, 5820–5834. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2194.1>
- McNeil BI, Tilbrook B, Matear RJ, 2001 Accumulation and uptake of anthropogenic CO₂ in the Southern Ocean, south of Australia between 1968 and 1996. *J. Geophys. Res. Ocean.* 106, 31431–31445. <https://doi.org/10.1029/2000JC000331>
- Naveira Garabato AC, Zika JD, Jullion L, Brown PJ, Holland PR, Meredith MP, Bacon S, 2016 The thermodynamic balance of the Weddell Gyre. *Geophys. Res. Lett.* 43, 317–325. <https://doi.org/10.1002/2015GL066658>
- Ruiz Barlett EM, Tosonotto G V., Piola AR, Sierra ME, Mata MM, 2018 On the temporal variability of intermediate and deep waters in the Western Basin of the Bransfield Strait. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 149, 31–46. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.12.010>
- Sangrà P, Gordo C, Hernández-Arencibia M, Marrero-Díaz Á, Rodríguez-Santana A, Stegner A, Martínez-Marrero A, Pelegrí JL, Pichon T, 2011 The Bransfield current system. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 58, 390–402. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.01.011>
- Sarmiento JL, Gruber N, 2002 Sinks for Anthropogenic Carbon. *Am. Inst. Phys.*
- Tanhua T, Hoppema M, Jones EM, Stöven T, Hauck J, Dávila MG, Santana-Casiano JM, Álvarez M, Strass VH, 2017 Temporal changes in ventilation and the carbonate system in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 138, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.10.004>
- Touratier F, Azouzi L, Goyet C, 2007 CFC-11, ¹⁴C and ³H tracers as a means to assess anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean. *Tellus B* 59, 318–325. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00247.x>
- Touratier F, Goyet C, 2004 Definition, properties, and Atlantic Ocean distribution of the new tracer TrOCA. *J. Mar. Syst.* 46, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2003.11.016>
- van Caspel M, Hellmer HH, Mata MM, 2018 On the ventilation of Bransfield Strait deep basins. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 149, 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.006>
- van Heuven SMAC, Hoppema M, Jones EM, de Baar HJW, 2014 Rapid invasion of anthropogenic CO₂ into the deep circulation of the Weddell Gyre. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 372, 20130056–20130056. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0056>

Variabilidade sazonal dos fluxos líquidos de CO₂ na região costeira da Antártica é revelada: um estudo de caso no NAP

Antarctic coastal net sea-air CO₂ fluxes seasonal variability is revealed: a case study in the NAP

Thiago Monteiro^{1,2,3} e Rodrigo Kerr^{1,2,3}

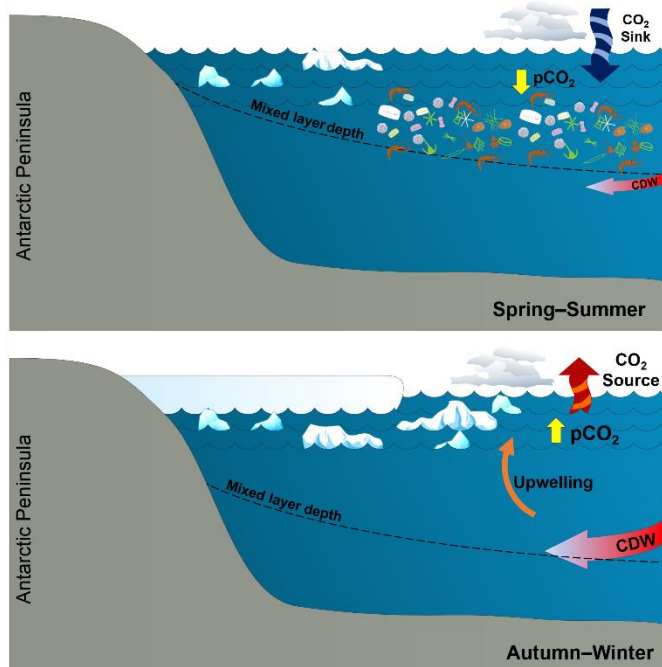
¹Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Av. Itália km 8, Rio Grande, 96203-900, RS, Brazil.

²Grupo de Estudos do Oceano Austral e Gelo Marinho, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera (INCT-CRIOSFERA), Rio Grande, 96203-900, RS, Brazil.

³Brazilian Ocean Acidification Network (BrOA), Rio Grande, 96203-900, RS, Brazil

Abstract

We show an annual overview of the net sea-air CO₂ flux in the Gerlache Strait, an important region in the Northern Antarctic Peninsula (NAP). In autumn and winter the respiration coupled with episodic upwelling events increases remineralized carbon on the sea surface, making the region a moderate/strong CO₂ source to the atmosphere. During summer and late spring, photosynthesis decreases the CO₂ partial pressure in surface seawater, favouring the intense ocean CO₂ uptake. This leads to a compensated net CO₂ flux behaviour among the seasons, marked by a 4-month intense CO₂ sink during summer/spring. This overview demonstrates the importance of coastal regions for CO₂ sink and likely advection to adjacent areas. In addition, the annual near-equilibrium CO₂ flux reveals the sensitivity of the carbon cycle in these regions.



- **Keywords:** Biogeochemistry; Carbon cycle; Southern Ocean.
- **Palavras-chave:** Biogeoquímica; Ciclo do carbono; Oceano Austral.

Thiago Monteiro Doutorando



Foto: Felipe Galdino

As regiões costeiras da Antártica têm sido negligenciadas por muito tempo quanto aos fluxos líquidos de CO_2 entre o oceano e a atmosfera (FCO_2). Isso se deve principalmente ao seu difícil acesso, especialmente de abril a novembro, quando elas estão quase/ou completamente cobertas por gelo (Legge et al., 2015). Vários estudos têm sido realizados no verão austral (e.g., Kerr et al., 2018; Brown et al., 2019, Monteiro et al., 2019), no entanto, o balanço anual do FCO_2 ainda é pouco compreendido (Legge et al., 2015). É amplamente conhecido que essas regiões costeiras se comportam como fortes sumidouros de CO_2 durante o verão (Takahashi et al. 2012, 2014; Monteiro et al., 2019). Em verdade, isso não ocorre rigorosamente em todos os anos, pois a intensidade dessa absorção de CO_2 parece oscilar entre situações de forte sumidouro e quase-equilíbrio em escalas interanuais (Monteiro et al., 2019). Contudo, ainda não está claro se esse comportamento permanece durante todo o ano ou é balanceado em outras estações. Pouco se sabe, também, sobre os controladores das variações do FCO_2 ao longo do ano. Por isso, realizamos este estudo no estreito de Gerlache, uma importante região costeira do norte da Península Antártica (Kerr et al., 2018) para investigar o balanço anual do FCO_2 e seus principais controladores.

Utilizamos dados disponíveis no *Surface Ocean CO_2 Atlas* – SOCATv6 (Bakker et al., 2016) para construir uma série temporal (2002-2016) de temperatura, salinidade e pressão parcial do CO_2 ($\text{pCO}_2^{\text{mar}}$) na superfície (5 m) do estreito de Gerlache. Além disso, utilizamos medições de alcalinidade total (AT) e carbono inorgânico total dissolvido (CT) do Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes – GOAL (Mata et al., 2018) e do o *World Data Center PANGAEA* (Hellmer et al., 2010) para estimar AT a partir de salinidade, para o banco de dados do SOCATv6.

Esses dados foram coletados nos verões austrais de 1995/96 (PANGAEA) e de 2015-2016 (GOAL). Por meio da AT estimada e da $p\text{CO}_2^{\text{mar}}$ medida diretamente (SOCATv6), calculamos CT através do programa CO2SYS v2.1 (Lewis et al., 1998; Pierrot et al., 2006). Fizemos isso para estimar os principais controladores das mudanças de $p\text{CO}_2^{\text{mar}}$, a partir da decomposição deste parâmetro em variações de temperatura, salinidade, AT e CT (Lenton et al., 2012).

Finalmente, calculamos o FCO_2 através da equação: $\text{FCO}_2 = K_t \times K_s \times (p\text{CO}_2^{\text{mar}} - p\text{CO}_2^{\text{ar}})$. K_t é o coeficiente de transferência gasosa, em função do vento (Wanninkhof, 2014), e K_s é o coeficiente de solubilidade do gás, em função de temperatura e salinidade (Weiss, 1974). Utilizamos os dados de pressão parcial de CO_2 atmosférico ($p\text{CO}_2^{\text{ar}}$) e de velocidade do vento (m s^{-1}) da estação americana de Palmer, localizada nas proximidades do estreito de Gerlache (Dlugokencky et al., 2015). Trataremos aqui da variabilidade sazonal destes parâmetros. Portanto, as estações do ano foram definidas como: (i) verão: janeiro a março; (ii) outono: abril a junho; (iii) inverno: julho a setembro; (iv) primavera: outubro a dezembro.

Nós identificamos uma situação de quase-equilíbrio no balanço anual do FCO_2 no estreito de Gerlache. Essa é uma condição contrastante com o esperado para regiões costeiras da Antártica, onde espera-se um comportamento de sumidouro de CO_2 (e.g., Gibson and Trull, 1999; Lenton et al., 2006; Arrigo et al., 2008), principalmente no verão e na primavera (Karl et al., 1991; Ito et al., 2018). De fato, no final da primavera (dezembro) e durante o verão (janeiro-março), a região se comporta, em média, como um moderado a forte sumidouro de CO_2 . Durante esses 4 meses, a intensidade da absorção de CO_2 atmosférico é capaz de compensar os 8 meses em que a região se comporta como fonte moderada a forte de CO_2 .



Fotos: Iole Orselli

Durante o verão (2002-2016), o estreito de Gerlache se comportou como um intenso sumidouro de CO_2 , com um FCO_2 médio de $-13 \pm 15 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. No entanto, há uma intensa variabilidade nesses fluxos, caracterizando a região em anos com forte sumidouro de CO_2 ($\text{FCO}_2 < -12 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e próxima ao equilíbrio ($\text{FCO}_2 \approx 0$). Essa variabilidade é de aproximadamente 2 e 4 anos e parece estar associada à intensa fotossíntese e ressurgência/respiração (Monteiro et al., 2019). No outono esse comportamento muda, pois a região passa a se tornar um moderado emissor de CO_2 , com um FCO_2 médio de $6 \pm 8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Depois ela se comporta como uma forte fonte, com FCO_2 médio de $22 \pm 12 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ no inverno. Na primavera este fluxo é próximo ao equilíbrio ($-2 \pm 19 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), com o mês de dezembro caracterizando o início do período de sumidouro da região.

Os principais controladores da $\text{pCO}_2^{\text{mar}}$ são CT e AT, enquanto temperatura e salinidade têm uma influência menor. O verão é a única estação em que há uma diminuição considerável de $\text{pCO}_2^{\text{mar}}$, devida principalmente à redução de CT. Essa diminuição é compensada pelo aumento de AT e de temperatura. Isso se deve ao processo de fotossíntese, que é intenso no verão e consome CT à medida que aumenta AT (Lenton et al., 2012; Brown et al., 2019). Nas outras estações, principalmente no outono e no inverno, ocorre exatamente o contrário, pois há um aumento de $\text{pCO}_2^{\text{mar}}$ devido ao aumento de CT e uma compensação pela diminuição de AT e de temperatura. Essa dinâmica nos parâmetros pode ser explicada pela intensa atividade heterotrófica no inverno (Zeeb et al., 2012), mas tem sido mais associada à mistura vertical e a intrusões da Água Profunda Circumpolar na porção oeste da península antártica (Takahashi et al., 2012; Legge et al., 2015). Essa mistura leva águas ricas em carbono remineralizado de maiores profundidades para a superfície das regiões costeiras, aumentando drasticamente o CT e, consequentemente, a $\text{pCO}_2^{\text{mar}}$.

“Há uma intensa variabilidade nesses fluxos [de CO_2], caracterizando a região em anos com forte sumidouro de CO_2 e [em outros] próxima ao equilíbrio.”

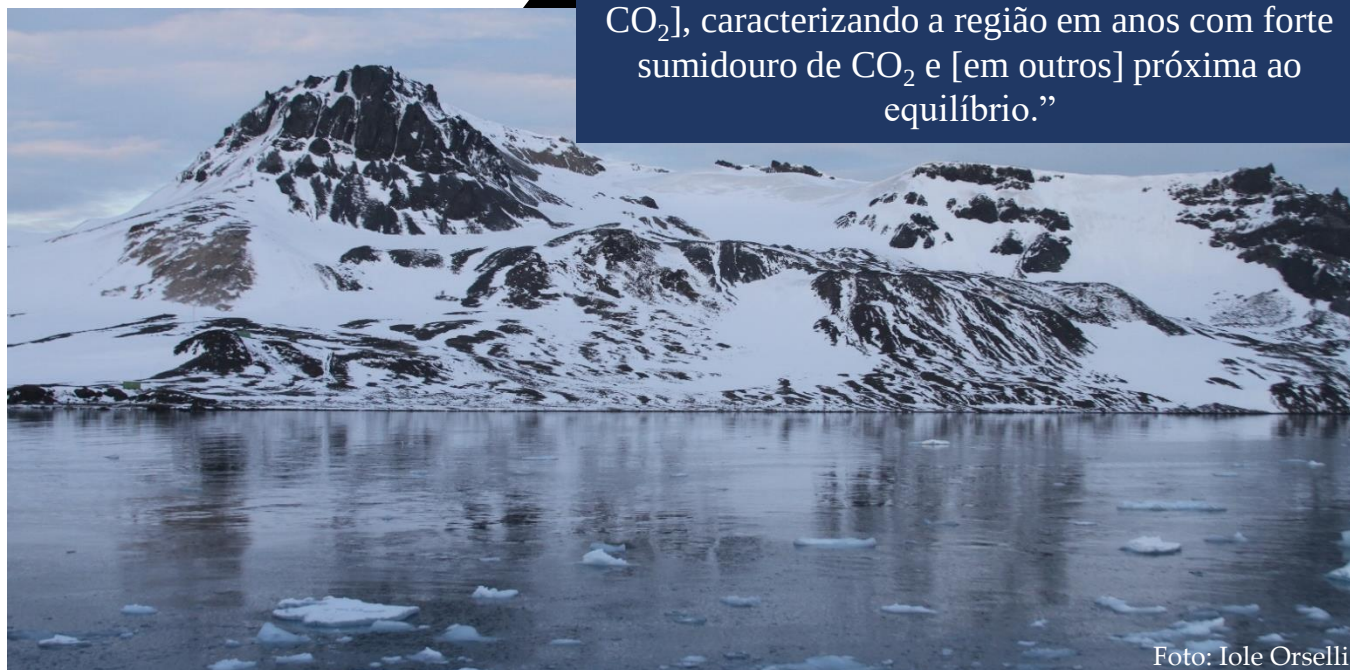


Foto: Iole Orselli

Referências

- Arrigo, K. R., van Dijken, G., Long, M. 2008. Coastal Southern Ocean: A strong anthropogenic CO₂ sink. *Geophys. Res. Lett.* 35, 1–6.
- Bakker, D. C. E. et al. 2016. A multi-decade record of high-quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth Syst. Sci. Data.* 8, 383–413.
- Brown, M. S. et al. 2019. Enhanced oceanic CO₂ uptake along the rapidly changing West Antarctic Peninsula. *Nat. Clim. Change.* 9, 678–683.
- Dlugokencky, E. J., Lang, P. M., Masarie, K. A., Crotwell, A. M., Crotwell, M. J. 2015. Atmospheric Carbon Dioxide Dry Air Mole Fractions from the NOAA ESRL Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network, 1968–2014, Version: 2015-09-08, ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/data/trace_gases/co2/flask/surface.
- Gibson, J. A. E. and Trull, T. W. 1999. Annual cycle of fCO₂ under sea-ice and in open water in Prydz Bay, East Antarctica. *Mar. Chem.* 66, 187–200.
- Hellmer, H. H., Rohardt, G. 2010. Physical oceanography during Ary Rongel cruise AR01. Alfred Wegener Institute, Helmholtz Center for Polar and Marine Research, Bremerhaven, PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.735276>.
- Ito, R. G., Tavano, V. M., Mendes, C. R. B., Garcia, C. A. E. 2018. Sea-air CO₂ fluxes and pCO₂ variability in the Northern Antarctic Peninsula during 3 summer periods (2008–2010). *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 149, 84–98.
- Karl, D. M., Tilbrook, B. D. and Tien, G. 1991. Seasonal coupling of organic matter production and particle flux in the western Bransfield Strait, Antarctica, *Deep-Sea Res.*, 38, 1097–1126.
- Kerr, R., Mata, M. M., Mendes, C. R. B., Secchi, E. R. 2018a. Northern Antarctic Peninsula: a marine climate hotspot of rapid changes on ecosystems and ocean dynamics. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 149, 4–9.
- Legge, O. J. et al. 2015. The seasonal cycle of ocean-atmosphere CO₂ flux in Ryder Bay, West Antarctic Peninsula. *Geophys. Res. Lett.* 42, 2934–2942.
- Lenton, A., Matear, R. J., Tilbrook, B. 2006. Design of an observational strategy for quantifying the Southern Ocean uptake of CO₂. *Global Biogeochem Cy.* 20, GB4010.
- Lenton, A. et al. 2012. The observed evolution of oceanic pCO₂ and its drivers over the last two decades. *Global Biogeochem. Cycles.* 26, 1–14.
- Lewis, E., Wallace, D. Allison, L. J. 1998. Program developed for CO₂ system calculations. Carbon Dioxide Information Analysis Center, USA, 38.
- Mata, M. M., Tavano, V. M., Garcia, C. A. E. 15 years sailing with the Brazilian High Latitude Oceanography Group (GOAL). *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 149, 1–3.
- Monteiro, T., Kerr, R., Orselli, I. B. M., Lencina-Avila, J. M. 2019. Towards an intensified summer CO₂ sink behaviour in the Southern Ocean coastal regions. *Progress in Oceanography. In press.*
- Pierrot, D., Lewis, E., Wallace, D. W. R. 2006. MS Excel Program Developed for CO₂ System Calculations, ORNL/CDIAC-105a. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee.
- Takahashi, T. et al. 2012. The changing carbon cycle in the Southern Ocean. *Oceanography.* 25, 26–37.
- Takahashi, T. et al. 2014. Climatological distributions of pH, pCO₂, total CO₂, alkalinity, and CaCO₃ saturation in the global surface ocean, and temporal changes at selected locations. *Mar. Chem.* 164, 95–125.
- Wanninkhof, R. 2014. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnol. Oceanogr. Methods.* 12, 351–362.
- Weiss, R. F. 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Mar. Chem.* 2, 203–215.
- Zeeb, R. E. 2012. History of seawater carbonate Chemistry, atmospheric CO₂ and ocean acidification. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 40, 141–165.

Primeira investigação dos parâmetros do sistema carbonato no estuário da Lagoa dos Patos: variabilidade espacial

First investigation of the carbonate system parameters in the Patos Lagoon estuary: spatial variability issues

Cíntia de Albuquerque Wanderley Coelho^{1,2}, Rodrigo Kerr^{1,2}, Júlia Kalid Mansur^{1,2}, Iole Beatriz Marques Orselli^{1,2}, Mariah de Carvalho-Borges^{1,2}, Thiago Monteiro^{1,2}

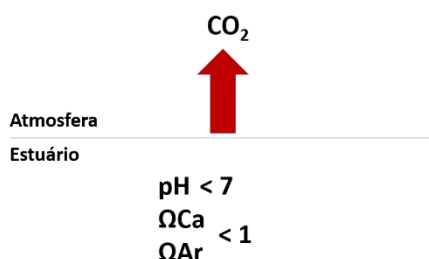
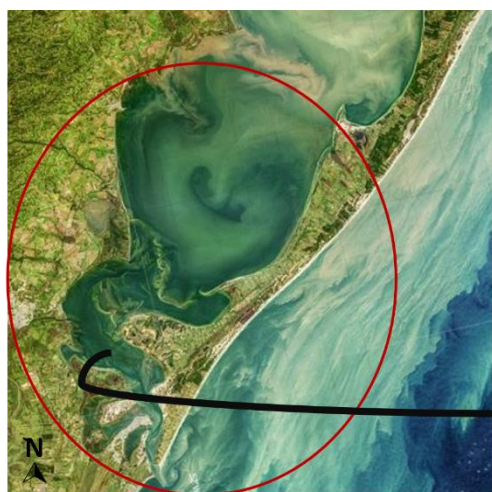
¹Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Av. Itália km 8, s/n, Rio Grande, 96203-900, RS, Brazil.

²Brazilian Ocean Acidification Network (BrOA), Av. Itália km 8, Rio Grande, 96203-900, RS, Brazil.

Abstract

An exact model defining the systems behavior as a CO₂ source to the atmosphere or water sink is still a challenge in coastal ecosystems. Estuarine waters behaved as an important source of CO₂ to the atmosphere, with partial pressures of CO₂ ($p\text{CO}_2$) ranging from 350 to 10,000 μatm globally. The Patos Lagoon estuary (PLE) is a nursery for several species of fish and crustaceans, due to their different temperate habitats and has a different hydrodynamics of its waters dominated by freshwater discharge and wind. Evaluating 40 years of carbonate system data reconstruction in this particular estuary, it is noted that $p\text{CO}_2$ remained well above the globally observed values, with pH below 7 and saturation states of calcite and aragonite below 1. This show that the PLE are acidic and unsaturated in these minerals. Although likely adapted, changes on these water properties can be extremely harmful to the biota.

- **Keywords:** acidification; estuarine waters; CO₂.
- **Palavras-chave:** acidificação; águas estuarinas; CO₂.





Cíntia Albuquerque Doutoranda

promovem uma forte variabilidade nesses ecossistemas (Evans et al., 2013; Mayer & Eyre, 2012).

É amplamente reconhecido que a informação de estudos de longo prazo em ambientes subtropicais e tropicais, especificamente, é precária no hemisfério sul e limita a realização de uma síntese global sobre a variabilidade biológica e dinâmica dos ecossistemas, particularmente na região de estudo (e.g. Odebrecht et al., 2017). Além disso, é notório que os impactos induzidos pelo homem desempenharam um papel importante na alteração da estrutura e dinâmica desse ambiente.

A Lagoa dos Patos, localizada na planície costeira do Rio Grande do Sul, é classificada como estrangulada. Possui uma bacia de drenagem rasa de aproximadamente 200,000 km², com 75% da área total com profundidade menor que 2 m, e é considerada a maior lagoa costeira do tipo estrangulado do mundo (Kjerve, 1986). A região estuarina, onde a variação da salinidade é mais pronunciada, está localizada na região sul e cobre uma área de 900 km² (Abreu et al., 2016). A entrada de água salgada é maior durante o verão, devido a passagem de sistemas frontais com ventos de quadrante sul, propiciando a enchente e a salinização da água. Quando os ventos são de quadrante norte, no final do inverno e na primavera, há o favorecimento da vazante. Os ventos de quadrante norte e sul formam estruturas verticais de salinidade que podem variar de uma cunha salina à um gradiente bem misturado (Möller et al., 2001; Möller & Fernandes, 2010).

A plataforma continental é conhecida por absorver CO₂ da atmosfera. Entretanto, os estuários, que possuem uma área superficial de apenas cerca de 4% da plataforma continental, apresentam, em geral, um elevado fluxo de CO₂ para o ar (Borges et al., 2004 e Joesoef et al., 2015). Sendo assim, Joesoef et al. (2015) confirmaram que, em sua maioria, as águas estuarinas são uma importante fonte de CO₂ para a atmosfera, com pressões parciais de CO₂ (pCO₂) variando de 350 a 10,000 µatm e fluxos de CO₂ na interface ar-água variando de -5 a 80 mol C m⁻² ano⁻¹ globalmente. Os estuários são áreas de intensa fixação de carbono e respiração e essas características, combinadas com aspectos hidrodinâmicos específicos,

O estuário da Lagoa de Patos (ELP) é um berçário para várias espécies de peixes e crustáceos, devido seus diferentes habitats temperados (e.g., marismas e gramas marinhas) (Tagliani et al., 2003). Os altos níveis de produção primária garantem o fornecimento de alimentos para diversas espécies de organismos que apresentam importância econômica (Abreu et al., 2016). A conexão com o oceano na parte sul da lagoa influencia o crescimento e a distribuição de toda biota, desde produtores primários até os predadores de topo de cadeia (Odebrecht et al., 2015).

A primeira investigação do ELP começou nos anos 70. Ao longo dos anos, a evolução da oceanografia e sua diversidade, produtividade e atividades portuárias deram maior importância ao ELP. Desde o início do século XIX, o interesse nesse estuário tem gerado maiores registros climatológicos, hidrológicos e biológicos (Seelinger & Odebrecht, 2010).

Arquivo CARBON Team



Com isso, foram utilizados diversos bancos de dados, incluindo dados da Pesquisa Ecológica de Longa Duração (PELD) para um primeiro entendimento do sistema carbonato na região e comparação com dados pretéritos (de 1975 a 1978). Dados recentes também foram adicionados entre 2012 e 2017. Todos os bancos de dados continham essencialmente dados de temperatura e salinidade que foram utilizados para as reconstruções.



A Rede Brasileira de Acidificação dos Oceanos (Rede BrOA) começou a monitorar mensalmente dois pontos específicos no ELP (cais do Museu Oceanográfico FURG e nas estações Barra - BrOA 1 e BrOA 2, respectivamente) a partir de outubro de 2015. O monitoramento recebeu auxílio logístico do Grupo de Sistemas de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta; www.simcosta.furg.br) para obter amostras de oportunidade em campo, o que permitiu aumentar a distribuição espacial das amostras químicas ao longo do ELP em determinadas situações. Além da amostragem de alcalinidade total (A_T) e carbono inorgânico dissolvido (C_T), a temperatura e a salinidade também foram medidos.

Para a reconstrução da A_T e do C_T aplicamos o processo de rede neural. 70% dos dados foram separados para treinamento, 15% para validação e os outros 15% foram usados para teste. Então r para A_T foi de 0,98 e para C_T foi de 0,76. O A_T foi determinado apenas por salinidade e apresentou um erro médio quadrático (RMSE) de $1,3 \mu\text{mol kg}^{-1}$, enquanto o C_T foi estimado a partir de temperatura e salinidade, e um RMSE de $3,6 \mu\text{mol kg}^{-1}$. Os parâmetros do sistema de carbonato não medidos diretamente (pH, $p\text{CO}_2$, estado de saturação da calcita - Ω_{Ca} - e da aragonita - Ω_{Ar}) foram determinados pelo software CO2Sys v.2.1 desenvolvido por Lewis e Wallace (1998) e modificado por Pierrot et al. (2006).

A química do carbonato nas águas costeiras, em geral, é governada por uma série de processos físicos e biogeoquímicos, que podem ter efeitos diferentes em seus constituintes. A química estuarina é fortemente influenciada pela heterogeneidade espacial e na mistura entre os membros finais de água doce e oceânica, que causam grandes variações nas concentrações de A_T , C_T , pH e $p\text{CO}_2$ e são afetados por entradas antropogênicas (e.g., Baur et al., 2013, Carstensen et al., 2018).

A_T tem uma distribuição semelhante à salinidade, o que é esperado. Em geral, as áreas com maior salinidade são aquelas com as maiores concentrações de A_T , sua concentração aumenta e diminui proporcionalmente à salinidade (e.g., Fry et al., 2015). Esses valores de A_T encontrados no PLE corroboram a literatura de outros ambientes e mostram grande variação (e.g., Koné et al., 2009; Evans et al., 2013), variando de 344 a 2385,1 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ associado à salinidade baixa e alta, respectivamente.

As concentrações de C_T são amplamente influenciadas por vários processos estuarinos porque o carbono participa de vários processos orgânicos e inorgânicos, como produtividade biológica, oxidação / degradação do carbono orgânico e dissolução e precipitação de calcita, não apenas pela troca de CO_2 com a atmosfera. Portanto, os estuários são áreas críticas para a ciclagem de carbono nos rios e têm impactos importantes na biogeoquímica e nos ecossistemas costeiros (Cai, 2011). Por esse motivo, os estuários variam amplamente na concentração de C_T , como no A_T . Nosso estudo corrobora essa afirmação, principalmente no período de 2012 a 2017, que apresentou a maior amplitude, mostrando que existe um grande conjunto de processos que atuam na variação do carbono. Essa maior amplitude e variação nas concentrações nos dois períodos pode estar relacionada à maior vazão média, uma vez que os rios são responsáveis por transportar uma alta concentração de matéria orgânica para os estuários.



Fotos do equipamento utilizado para as análises de Alcalinidade Total e Carbono Inorgânico Dissolvido Total nas amostras de água do mar, quando feitas em laboratório.

Fotos: Iole Orselli

As médias e as variações máximas e mínimas de $p\text{CO}_2$ apresentadas neste trabalho são superiores aos valores relatados pela literatura em outras regiões estuarinas do globo (por exemplo Borges, 2005; Borges et al., 2005; Cai, 2011; Joesoef et al., 2015).

Como o ELP recebe uma alta vazão do rio (Möller et al., 2001), é provável que contenha muita matéria orgânica que, quando degradada, aumenta os níveis de $p\text{CO}_2$, principalmente no alto do estuário, onde é mais influenciado pela descarga do rio. Por estes motivos também temos médias de pH abaixo de 7 para ambos os períodos, categorizando o ELP como um estuário relativamente ácido e também insaturado em calcita e aragonita para ambos os períodos. Isso nos faz acreditar que esse estuário está sofrendo impactos antropogênicos a longo prazo.

Nestes quase 40 anos, a grande influência antrópica, a importância da sazonalidade e os fenômenos climáticos na região já discutida por Seeliger e Odebrecht (2010) também podem ser confirmados pela biogeoquímica de carbono. Estudar a acidificação estuarina ajuda a entender os processos que afetam a estrutura e o funcionamento ecológico, importantes para a conservação e o manejo costeiro. Como o ELP é um berçário para muitas espécies, há uma necessidade ainda maior de estudos adicionais nessa área para compreensão da variabilidade espacial e temporal dos parâmetros do sistema carbonato.

“Isso nos faz acreditar que esse estuário está sofrendo impactos antropogênicos a longo prazo.”



Arquivo CARBON Team

Referências

- Abreu, P. C.; Marangoni, J.; Odebrecht, C. 2016. So close, so far: differences in long-term chlorophyll a variability in three nearby estuarine-coastal stations. *Marine Biology Research*, doi: 10.1080/17451000.2016.1189081.
- Bauer, J.E., Cai, W.J., Raymond, P.A., Bianchi, T.S., Hopkinson, C.S. & Regnier, P.A.G., 2013. The Changing Carbon Cycle of the Coastal Ocean. *Nature*, 504: 61-70, doi: 10.1038/nature12857.
- Borges, A. V.; Delille, B.; Schiettecatte, L.; Gazeau, F.; Abril, G.; Frankignoulle, M. 2004. Gas transfer velocities of CO₂ in three European estuaries (Randers Fjord, Scheldt, and Thames). *Limnology and Oceanography*, 49, 1630-1641.
- Borges, A. 2005. Do We Have Enough Pieces of the Jigsaw to Integrate CO₂ Fluxes in the Coastal Ocean? *Estuaries*, 28: 3-27.
- Cai, W.J. 2011. Estuarine and Coastal Ocean Carbon Paradox: CO₂ Sinks or Sites of Terrestrial Carbon Incineration? *Annual Review of Marine Science*, 3: 123-145, doi: 10.1146/annurev-marine-120709-142723.
- Carstensen, J.; Chierici, M.; Gustafsson, B.G.; Gustafsson, E. 2018. Long-term and seasonal trends in estuarine and coastal carbonate systems. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(3): 497-513, doi: 10.1002/2017GB005781.
- Evans, W.; Hales, B.; Strutton, P. G. 2013. pCO₂ distributions and air-water CO₂ fluxes in the Columbia River estuary. *Estuarine, coastal and shelf science*, 117, 260-272.
- Fry, C. H.; Tyrell, T.; Achterberg, E. P. 2015. Analysis of longitudinal variations in North Pacific alkalinity to improve predictive algorithms. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 30, doi:10.1002/2016GB005398.
- Joesoef, A.; Huang, W. -J.; Gao, Y.; Cai, W. -J. 2015. Air-water fluxes and sources of carbon dioxide in the Delaware Estuary: spatial and seasonal variability. *Biogeosciences*, 12, 6085-6101.
- Kjerfve, B. 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: *Estuarine variability*. Academic Press, 32 p.
- Koné, Y.J.M.; Abril, G.; Kouadio, K.N.; Delille, B.; Borges, A.V. 2009. Seasonal variability of carbon dioxide in the rivers and lagoons of Ivory Coast (West Africa). *Estuaries and Coasts*, 32(2): 246-260, doi: 10.1007/s12237-008-9121-0.
- Lewis, E.; Wallace, D. 1998. Program developed for CO₂ system calculations. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Tennessee, 42 p.
- Maher, D. T.; Eyre, B. D. 2012. Carbon budgets for three autotrophic Australian estuaries: Implications for global estimates of the coastal air-water CO₂ flux. *Global biogeochemical cycles*, 26, doi/10.1029/2011GB004075.
- Möller, O.O.; Castaing, P.; Salomon, J.C.; Lazure, P. 2001. The influence of local and non local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, 24, 275-289.
- Möller, O.O.; Fernandes, E. L. Hidrologia e Hidrodinâmica. 2010. In: *O Estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações*. FURG/ECONOMIDA, p. 17-27.
- Odebrecht, C.; Abreu, P. C.; Carstensen, J. 2015. Retention time generates short-term phytoplankton blooms in a shallow microtidal subtropical estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 162, 35-44.
- Odebrecht, C.; Secchi, E. R.; Abreu, P. C.; Muelbert, J. H.; Uiblein, F. 2017. Biota of the Patos Lagoon estuary and adjacent marine coast: long-term changes induced by natural and human-related factors. *Marine Biology Research*, 13:1, 3-8, doi: 10.1080/17451000.2016.1258714.
- Pierrot, D., Lewis, E., Wallace, D.W.R., 2006. MS Excel Program Developed for CO₂ System Calculations. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Tennessee. doi: 10.3334/CDIAC/otg.CO2SYS_XLS_CDIAC105a
- Tagliani, P. R. A.; Landazuri, H.; Reis, E. G.; Tagliani, C. R.; Asmus, M. L.; Sánchez-Arcilla, A. 2003. Integrated coastal zone management in the Patos Lagoon estuary: perspectives in context of developing country. *Ocean & Coastal Management*, 46, 807-822.
- Seeliger, U.; Odebrecht, C. 2010. *O Estuário da Lagoa dos Patos: Um Século de Transformações*. Rio Grande, FURG. 180 p.



Agradecimentos

Estes estudos foram financiados e/ou apoiados por diversas agências de fomento, instituições e projetos, sendo eles:

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)
Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)
Estudos Avançados de Médias e Altas Latitudes (CAPES/CMAR2)
INCT da Criosfera
Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR)
Marinha do Brasil
Sistema de Monitoramento da Costa do Brasil (SiMCosta)
Programa Ecológico de Longa Duração - Estuário da lagoa dos patos e adjacências (PELD-ELPA)
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC)

Contato

CARBON Team:

Prof. Dr. Rodrigo Kerr
rodrigokerr@furg.br

Revista CARBON Team, Volume 1
Dezembro de 2019, págs. 42
Edição: Iole Orselli e Jannine
Lencina-Avila

Fotos com fonte não
identificada:
Capa: arquivo CARBON Team e
Iole Orselli



Foto: Iole Orselli