

El CO₂ en el Océano: 2 décadas de estudios en el Atlántico Sudoccidental

Lucía Carolina Kahl^{1,2,*} y Ana P. Osiroff¹,

¹Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval (SHN), Buenos Aires (C1270ABV), Argentina.

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, (UBA), Buenos Aires, Argentina.

*lucia.kahl@defensa.gob.ar

Resumen. El océano, al capturar alrededor del 25% del CO₂ antropogénico emitido a la atmósfera, actúa como mitigador del cambio climático. Sin embargo, la fuerte captura de CO₂ provocaría la acidificación oceánica (AO). De esta problemática, surge el interés en conocer qué papel desempeña el Océano Atlántico Sudoccidental en el ciclo del carbono. En este sentido, desde el año 2000, el Servicio de Hidrografía Naval (SHN), junto con instituciones nacionales e internacionales, ha monitoreado el sistema de los carbonatos en Océano Atlántico Sudoccidental y en el Océano Austral, midiendo pCO₂, alcalinidad total y carbono inorgánico disuelto. Estos estudios han revelado que el Mar Argentino es un gran sumidero de CO₂, capturando 16 TgC por año, y producto de la alta absorción se estima que el pH ha disminuido 0,1 unidades desde el período preindustrial, por lo tanto, es crucial continuar con el monitoreo para ampliar y actualizar estos registros.

Keywords: Dióxido de Carbono, Atlántico Sudoccidental, Cambio climático, Acidificación Oceánica.

1 Introducción

El océano desempeña un importante rol como mitigador del cambio climático al capturar alrededor de 1.8 PgC/año, equivalente al 25% del CO₂ antropogénico que es emitido a la atmósfera [1,2]. Una vez que el CO₂ de la atmósfera ingresa al mar se disuelve formando dióxido de carbono disuelto (CO₂* 1%), que al reaccionar con agua forma el ion bicarbonato (90%) y a su vez este se disocia en la forma de ion carbonato (9%)[3]. La suma de las concentraciones de las tres especies de carbono disuelto forma el denominado carbono inorgánico disuelto o carbono total (CT). La alcalinidad total (AT), se define como el número de iones de hidrógeno equivalentes al exceso de protones aceptores sobre protones dadores en 1 kg de agua de mar [4]. El sistema de los carbonatos (SC) puede ser caracterizado a partir de 2 de los 4 parámetros medibles que son pCO₂ (presión parcial de CO₂), pH, CT y AT, junto con observaciones de temperatura, salinidad, presión y nutrientes [5].

La fuerte captura de CO₂ por parte del océano (Fig.1), provoca cambios sustanciales en la química ácido-base del agua de mar y, lo que es más importante, en la especiación química del gran reservorio de carbono inorgánico disuelto en el agua

con la consecuente disminución del pH (Fig.1) y de la concentración del ión carbonato, fenómeno denominado como acidificación oceánica (AO) [6,7]. La AO tiene consecuencias significativas para los ecosistemas y los servicios que estos proporcionan, principalmente relacionados con la seguridad alimentaria (e.g., recursos pesqueros) del cual dependen las economías locales y regionales y los medios de vida de millones de personas ([8,9,10]).

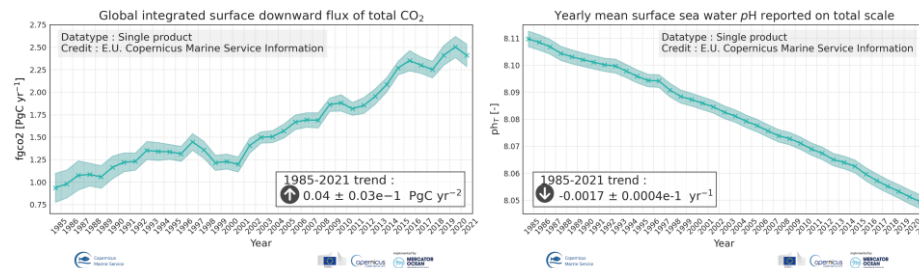


Fig. 1. Las figuras muestran el sumidero neto global anual de CO₂ del océano (Izquierda, <https://doi.org/10.48670/moi-00223>) y Serie temporal y tendencia del pH promedio del agua de mar (Derecha, <https://doi.org/10.48670/moi-00224>), ambos gráficos realizados a partir del reprocesamiento de múltiples observaciones. La disminución del pH en la superficie del océano es una consecuencia directa de la absorción de dióxido de carbono por el océano, conocido como acidificación oceánica. (Fuente: Copernicus Marine Service).

La plataforma del Atlántico Sudoccidental (ASO) y el talud adyacente son unas de las zonas más productivas del océano mundial [11]. Estas regiones tienen un impacto significativo en el balance de CO₂ en la atmósfera, por lo que los procesos que ocurren en ambas regiones impactan el clima. Debido a la importancia ecológica del Mar Argentino y áreas circundantes, surgió la pregunta de cuál sería el papel que cumple esta región en el ciclo del carbono. Es así que uno de los principales objetivos del grupo de trabajo fue monitorear el sistema de los carbonatos, principalmente en el Mar Argentino, mediante la obtención de datos de alta calidad, comparables con los obtenidos por los distintos países de la región. Varias campañas oceanográficas se han realizado como parte de diferentes proyectos en las cuales se realizaron determinaciones de los parámetros del SC. El objetivo de este trabajo es presentar las actividades más relevantes que viene realizando la Sección Dinámica Oceánica - Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval (SHN) - desde hace más de 2 décadas con el fin de comprender el rol del Océano Atlántico Sudoccidental frente al balance del CO₂ y sus posibles impactos.

2 Grandes proyectos

En el año 2000, el SHN, junto a otras instituciones nacionales e internacionales, comenzó a monitorear el SC en el marco de 2 proyectos de colaboración entre Argentina y Francia. El objetivo principal era describir los patrones espaciales y los cambios a largo plazo de los flujos netos de CO₂ entre el aire y el mar (FCO₂), y los parámetros del SC. Se utilizaron instrumentos diseñados y construidos por el

Laboratoire de Biogéochimie et Chimie Marines de la Université Pierre et Marie Curie de París (hoy LOCEAN), luego donados al SHN al finalizar el proyecto GEF.

La pCO₂ superficial (del mar y del aire), junto con otras variables asociadas, fueron determinadas con un sistema continuo y automatizado, montado con un analizador infrarrojo (IR), el cual se alimentaba mediante un flujo de agua bombeado desde una toma ubicada en el casco del buque. Las muestras para evaluar la pCO₂ del aire se obtuvieron en la proa con el propósito de evitar que las mediciones fueran afectadas por las emisiones del buque. El sistema utilizado para la determinación de AT y CT en el agua de mar, consiste en un método potenciométrico en celda cerrada [12]. La precisión de las medidas de AT y CT se determina mediante la medición de los Materiales de Referencia Certificados (CRM), provistos por el Dr. A. Dickson (https://www.nodc.noaa.gov/ocads/oceans/Dickson_CRM). El control de calidad de estas determinaciones fueron realizadas posteriormente en los laboratorios del SHN.

El proyecto ARGAU (*Proyecto Cooperación Franco – Argentino (Atlántico-Austral)*), tuvo como objetivo estudiar el rol de los procesos físicos y biológicos en el Atlántico Sur y Mar de Weddell. Las campañas llevadas a cabo en el marco de ARGAU se realizaron desde Buenos Aires hasta el mar de Weddell a bordo del “Rompehielos Almirante Irizar” (RHAI), entre los años 2000 y 2005 (Tabla 1, Fig.2). En estas campañas se realizó un muestreo continuo y automatizado de temperatura superficial del mar (TSM), salinidad superficial del mar (SSM), pCO₂ de la superficie del mar y el aire, entre otros. Adicionalmente se realizaron muestreos discretos, de los que se obtuvieron mediciones de oxígeno disuelto (O₂) y concentración de clorofila a (Chl-a), entre otras variables. A partir de la campaña ARGAU 2 (año 2002) se determinaron además la AT y el CT.

Tabla 1: Datos del sistema de los carbonatos obtenidos en el marco de los distintos proyectos.

Campaña/proyecto	Fecha	Parámetros medidos del SC	Cantidad de datos
ARGAU0	Marzo a Mayo 2000	pCO ₂	4418
ARGAU1	Enero a Abril 2001	pCO ₂	4519
ARGAU1	Agosto 2001	pCO ₂	875
Invierno			
ARGAU2	Enero a Mayo 2002	pCO ₂ , AT, CT	6121, 175, 175
ARGAU3	Febrero a Mayo 2003	pCO ₂ , AT, CT	6314, 2495, 2495
ARGAU4	Enero a Abril 2004	pCO ₂ , AT, CT	5410, 1847, 1847
ARGAU5	Dic 2004 a Abril 2005	pCO ₂ , AT, CT	7952, 455, 455
GEF1	Octubre 2005	pCO ₂ , AT, CT	862, 436, 436
GEF2	Marzo 2006	pCO ₂ , AT, CT	2266, 724, 724
GEF3	Septiembre 2006	pCO ₂ , AT, CT	1627, 567, 567
SAMOC 2	Agosto 2009	AT, CT	45, 45
SAMOC 3	Julio 2010	AT, CT	70, 70
SAMOC 4	Diciembre 2010	AT, CT	18, 18
SAMOC 5	Julio 2011	AT, CT	49, 49
SAMOC 7	Julio 2012	AT, CT	75, 75
SAMOC 10	Octubre 2014	AT, CT	55, 55
STSF	Octubre 2013	AT, CT	135, 135
CASSIS-Malvinas	Mayo 2016- Mayo 2017	AT,CT, pH	75, 75, 90

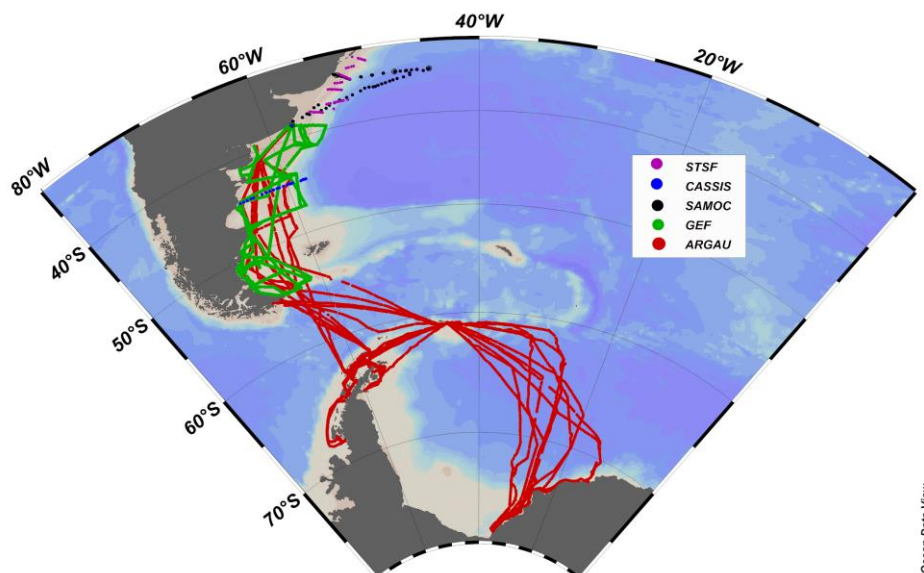


Fig. 2. Mapa del Océano Atlántico Sudoccidental (ASO) y Océano Austral adyacente. En él se presenta la posición de los datos muestreados en el marco de los distintos proyectos (más detalle en la Tabla 1). Cada color hace referencia al proyecto: rojo=ARGAU, verde=GEF, negro=SAMOC, azul=CASSIS y magenta=STSF.

En el marco del proyecto GEF (*Global Environmental Facility: Condiciones Ambientales en el Mar de Patagonia*), se realizaron 3 campañas (GEF1, GEF2 y GEF3), entre octubre de 2005 y septiembre de 2006, a bordo del buque oceanográfico “ARA Puerto Deseado” (BOPD) (Fig.2). La región de muestreo fue el Mar Patagónico. En estas campañas se determinaron todas las variables mencionadas para ARGAU y se realizaron estaciones CTD [13]. En las mismas se obtuvieron mediciones de O₂, Chl-a, nutrientes, AT y CT. Estas campañas permitieron obtener una línea de base del SC en esta región del ASO.

A partir del año 2009 comenzaron las mediciones para la región del Sur de la plataforma de Brasil, área común de pesca Argentina-Uruguay y océano abierto adyacente. Estos datos *in-situ* fueron muestreados durante las campañas realizadas en el marco de la iniciativa conocida como *South Atlantic Meridional Overturning Circulation* (SAMOC) y de *Subtropical Shelf Front* (STSF). El objetivo del proyecto SAMOC es observar el transporte meridional de masa a través de 34.5°S en el Océano Atlántico Sur (http://www.aoml.noaa.gov/phod/SAMOC_international/). El proyecto es liderado por investigadores del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), del SHN y de las Universidades de Sao Pablo (USP, Brasil) y Federal de Rio Grande do sul (FURG, Brasil). En algunas de las campañas se realizaron determinaciones de AT y CT, además de otros parámetros oceanográficos (Tabla 1, Fig.2). La campaña STSF, realizada en octubre de 2013, fue la principal actividad de campo asociada al proyecto denominado *Export of shelf waters along the Subtropical Shelf Front: A one way ticket?* (<http://sacc.coas.oregonstate.edu/~sacc/index.php>), financiado por el Instituto Inter-Americano para la Investigación del Cambio Global

(IAI). En ella se realizaron 51 estaciones oceanográficas (CTD y roseta), en las cuales se tomaron muestras de AT, CT, O₂, Chl-a y nutrientes (Tabla 1, Fig.2).

A partir de la colaboración realizada en el marco del proyecto PIDDEF 47/11 (Ministerio de Defensa), a partir de 2015, junto al INIDEP (Instituto Nacional de Desarrollo e Investigación Pesquera), se adquirió un Espectrofotómetro Ocean Optics®. El método de determinación de pH en agua de mar por espectrofotometría fue desarrollado por Clayton y Bayne (1993) [14] y se describe en el SOP6b de la “Guía de Buenas Prácticas en Mediciones Oceánicas de CO₂” [15]. De esta manera se realizaron las primeras mediciones directas de pH por espectrofotometría en campañas realizadas en el marco del proyecto CASSIS-Malvinas, una iniciativa del instituto franco-argentino UMI-IFAECI, cuyo objetivo fue comprender, simular y predecir la variabilidad climática y sus cambios, así como sus impactos en el sur de América del Sur y océanos circundantes. En este proyecto, junto a las mediciones directas de pH, se determinaron AT, CT y otros parámetros oceanográficos en una sección en 44.7°S en el mes de Mayo de 2016 y 2017 (Tabla 1, Fig.2).

Asimismo, a través de un proyecto de investigación PIDDEF 12/2014, el SHN ha adquirido un sistema de monitoreo de pCO₂ modelo PRO-OCEANUS CO2-Pro CV™. En el marco del proyecto conjunto con investigadores del IADO (*Identificación del potencial de descarbonización natural en el Estuario de Bahía Blanca para la implementación eficiente de herramientas de emisión negativa de CO₂*, Smartport Net-Zero Challenge 2022) será utilizado a fin de obtener una serie de tiempo de pCO₂.

Con los resultados obtenidos de los distintos proyectos se busca poder brindar una línea de base del estado del mar respecto al sistema de los carbonatos. La misma puede ser utilizada con distintos fines, por ejemplo la validación de modelos biogeoquímicos o para realizar experimentos sobre los efectos de la acidificación en diferentes organismos. En este sentido, el SHN ha colaborado en el Proyecto Nacional sobre los efectos de la Acidificación de los Océanos en especies de bivalvos de interés comercial liderado por la Dra. Lomovasky del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC-CONICET-UNMDP) (<https://www.conicet.gov.ar/cientificos-de-mar-del-plata-trabajan-sobre-acidificacion-de-los-oceanos/> [10]).

3 Resultados obtenidos

Las determinaciones realizadas en el marco de los proyectos mencionados, dieron lugar a diversos trabajos, que incluyen 4 tesis de grado [16,17,18,19], 3 de doctorado [20,21,22], varias publicaciones en revistas [23,24,25,26,27,28,29] y múltiples comunicaciones científicas nacionales e internacionales.

A partir de dichos estudios se pudo cuantificar el balance regional de los flujos de CO₂ [23,24], determinando que, con una captura neta de 16 TgC/año el Mar Argentino es uno de los mayores sumideros de CO₂ atmosférico en el Océano Global [24]. Además, los flujos de CO₂ en esta región exhiben una marcada estacionalidad y fuertes gradientes en las zonas frontales (Fig.3) [23,24,27]. En las aguas estratificadas de la plataforma, entre la primavera y el otoño, la captura neta de CO₂ es alta debido a la elevada producción primaria en las aguas superficiales. Por otro lado, en las aguas

cercanas a la costa, la mezcla inducida por las mareas genera un efecto de bombeo de aguas profundas, caracterizadas por un bajo pH y alto contenido de CO_2 , lo que resulta en una fuente neta de CO_2 [27]. En el frente de talud, los FCO_2 hacia el océano son intensos, con una alta variabilidad estacional [29,30]. La bomba biológica juega un papel crucial en la regulación de estos flujos y en el equilibrio del sistema de carbonatos del Mar Patagónico [22,24,26,27].

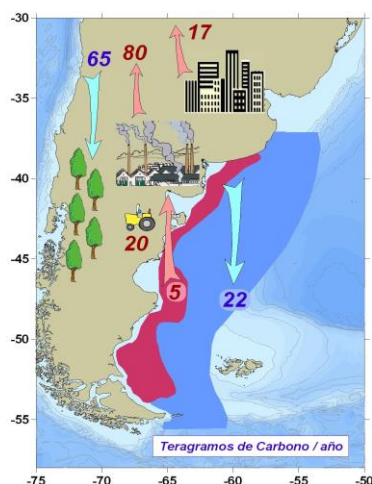


Fig. 3. Esquema del balance de CO_2 en Argentina. Se destaca el Mar Patagónico, en donde ocurre fuerte emisión de CO_2 en el sector a lo largo de la costa (área roja), mientras que la zona de plataforma (área azul) es una importante zona de absorción de CO_2 atmosférico (Fuente: Bianchi et al., 2010 [31]).

Esta alta captura de CO_2 en el Mar Argentino podría inducir cambios significativos en la química marina de la región, provocando un efecto de AO [6,7]. Estimaciones basadas en datos de AT y CT, utilizando el modelo TrOCA [32], indican que el pH en la región ha disminuido en 0,1 unidades desde el período preindustrial hasta el año 2006 [33], lo que equivale a una tasa de -0,002 unidades de pH por año. La absorción de CO_2 antropogénico ha resultado en una disminución similar del pH en el Mar Argentino, comparable con registros globales [34] y con proyecciones de modelos climáticos [35]. Sin embargo, la falta de registros suficientes de pH en Argentina impide verificar completamente estas estimaciones.

En el sector norte del ASO (norte de 38°S), los datos mostraron la existencia de una marcada relación entre los distintos parámetros del SC con las masas de agua, mostrando predominio de los procesos físicos sobre el SC. Las distribuciones de AT y CT de las aguas de plataforma de la zona responden a la influencia de las aguas de la Pluma del Río de Plata y a la presencia del Frente Subtropical de Plataforma [36]. Las distribuciones del SC observadas para las aguas de océano abierto responden a la compleja distribución de las masas de agua típica de la región [37] mientras que parte de la variabilidad observada en el SC responde a la actividad de mesoescala, como son la presencia de *eddies* y filamentos [22]. A partir de estimaciones de pH, en Kahl (2018) [22] se ha observado que los mares marginales del ASO son menos ácidos que

otros mares marginales (en al menos 0.1 unidades de pH), señalando así un carácter relativamente básico y favorable al desarrollo de los organismos calcificantes.

Observando los estudios realizados en los mares australes, una amplia zona del Mar de Weddell, entre las Islas Orcadas y la base Belgrano, fue estudiada durante los veranos de los años 2000-2005. Se estudió la relación entre los flujos de CO₂ y la aparición de polinias (áreas ausentes de hielo o con concentraciones reducidas del mismo en el interior de zonas donde se esperaría encontrar hielo compacto), obteniendo que en el interior de las polinias, el secuestro de CO₂ por el océano es un 67% mayor que en el océano abierto [21]. Adicionalmente, trabajos más recientes se han enfocado al estudio de los FCO₂ en la región del Pasaje de Drake, en donde los resultados indican que los flujos de carbono son impulsados por procesos de mesoescala y submesoescala al norte del Frente Polar y por el afloramiento de las aguas profundas circumpolares superiores en el límite antártico del Pasaje de Drake, mientras que los patrones estacionales son modulados principalmente por factores locales como la disponibilidad de nutrientes, la actividad biológica y la cubierta de hielo [28].

4 Contribución a bases de datos internacionales

4.1 Publicación de datos en la base global SOCAT

El SHN ya ha publicado los datos de pCO₂ colectados entre los años 2000 y 2006 en la versión 3 de SOCAT [38]. SOCAT (<https://socat.info/SOCATv1/index.html>) es el Atlas del CO₂ de la Superficie del Océano donde la comunidad internacional que realiza investigación del carbono marino provee observaciones de CO₂ de la superficie del océano.

4.2 Participación en redes

Con el fin de fortalecer la colaboración con instituciones nacionales e internacionales y mejorar el intercambio de conocimientos sobre la problemática del exceso de CO₂ en el sistema climático, el SHN forma parte de distintas las redes:

- GOA-ON (<https://www.goa-on.org/>) es la Red Global de Observaciones de la Acidificación Oceánica. El SHN ha participado en talleres y reuniones organizados por la misma [33,39].
- LAOCA (Latin American Ocean Acidification Network) es la Red Latinoamericana de Acidificación Oceánica. Investigadores del SHN fueron parte de su creación (Chile, 2015) y en 2017, siendo Argentina el país anfitrión, el SHN fue parte del comité organizador del “1er Simposio Latinoamericano de Acidificación Oceánica”.
- REMARCO (<https://remarco.org/>) es la Red de Investigación de Estresores Marinos – Costeros en Latinoamérica y el Caribe, tiene por objetivo brindar información para establecer los niveles actuales de AO y analizar las tendencias a largo plazo y así fomentar políticas encaminadas a la reducción de las emisiones de CO₂. Con este fin el SHN ha recibido distintas capacitaciones relacionadas a la temática.

4.3 Aporte al Indicador de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 14.3.1

Dada la relevancia a nivel global del fenómeno de la AO se ha definido el indicador 14.3.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Acidez media del mar (pH). Argentina, como país miembro de la COI (Comisión Oceanográfica Internacional) ha sido invitada a contribuir a la recopilación de datos sobre la AO en relación con dicho indicador. Por tal motivo y siguiendo las pautas exigidas por los centros nacionales de datos oceanográficos (NODC) del IODE, el SHN, ha reportado los datos del Mar Argentino. La información enviada corresponde a datos recopilados durante las 3 campañas oceanográficas correspondientes al proyecto GEF. En total fueron enviados 467 registros de AT y CT, junto a información oceanográfica complementaria (temperatura, salinidad, profundidad). La información fue sometida a un profundo análisis y fue enviada siguiendo las especificaciones del organismo que nuclea toda la información de los países miembros. Estos datos junto a toda la información relacionada están disponibles en el portal web: <https://oa.iode.org/>.

Recomendaciones y perspectivas

El Mar Argentino sigue siendo una de las áreas oceánicas menos documentadas en términos de la dinámica regional del pH. La mayoría de los datos de pH existentes se han calculado a partir de mediciones de otros parámetros del SC, típicamente AT y CT, con los errores inherentes a estos cálculos. La escasez de series temporales no permite una comprensión completa de los factores que impulsan la variabilidad temporal del sistema de carbonatos. Estas series temporales son clave para estudiar a largo plazo el cambio climático y la consecuente AO y también para entender el componente biológico de la variabilidad del SC. Consideramos fundamental el acceso a instrumentos adecuados para medir directamente el pH, así como ser parte de una red internacional de monitoreo y al mismo tiempo establecer vínculos con los científicos participantes de los distintos grupos de trabajo (tanto nacionales como internacionales), permitiendo comunicaciones frecuentes, rápidas y efectivas, trabajo en red, transferencia de datos y asistencia técnica cuando sea requerida.

Referencias

1. Fay, A. R., Munro, D. R., McKinley, G. A., Pierrot, D., Sutherland, S. C., Sweeney, C., and Wanninkhof, R.: Updated climatological mean ΔfCO_2 and net sea-air CO_2 flux over the global open ocean regions, *Earth Syst. Sci. Data*, 16, 2123–2139 (2024). <https://doi.org/10.5194/essd-16-2123-2024>
2. Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C., Hauck, J., ... & Zheng, B.: Global carbon budget 2023. *Earth Syst. Sci. Data*, 15(12), 5301-5369 (2023). <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
3. Williams R.G., Follows M.J.: *Ocean Dynamics and the Carbon Cycle: Principles and Mechanisms*, Cambridge University Press, (2011). ISBN 978-0-521-84369-0
4. Dickson, A.G.: Standards for ocean measurements. *Oceanography*, 23(3), 34-47. (2011). doi:10.5670/oceanog.2010.22.

5. Zeebe, R. E., & Wolf-Gladrow, D.: CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes (Vol. 65). Gulf Professional Publishing (2001).
6. Feely RA, Doney SC, Cooley SR.: Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high-CO₂ world. *Oceanography*. 22(4): 36-47 (2009).
7. Doney, S.C., Fabry V.J., Feely R.A., Kleypas J.A.: Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual review of marine science*, 1(1), 169-192. (2009). <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
8. Laffoley, D., Baxter, J.M., Turley, C., Jewett, L., Lagos, N.A., (eds): Una introducción a la acidificación del océano: Lo que es, lo que sabemos y lo que puede suceder. UICN, Gland, Suiza, 30 pp (2017).
9. Doney, S., Busch, D., Cooley, S., Kroeker, K.: The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. *Annual Review of Environment and Resources*. 45. 11.1-11.30. (2020). [10.1146/annurev-environ-012320-083019](https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019)
10. Lomovasky B.J., A.P. Osiroff, M.S. Yusseppone, Kahl L.C.: La acidificación de los océanos, el otro problema al aumento del CO₂: perspectivas para la comprensión de sus efectos sobre los ecosistemas marinos en Argentina (2022). *Revista El Ojo del Cóndor*, N°11 (38-41), ISSN 2362-5821.
11. Machado I., M. Barreiro, D. Calliari: Variability of chlorophyll-a in the Southwestern Atlantic from satellite images: Seasonal cycle and ENSO influences *Continental Shelf Res*, 53, 102-109 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.11.014>.
12. Berghoff, C.F., Balestrini, C.F., Osiroff, A.P., Kahl, L.C., Bianchi, A.: Determinación de alcalinidad total y carbono inorgánico disuelto mediante titulación potenciométrica en celda cerrada. N° 11.17 p., INIDEP (2016).
13. Charo, M., Piola A.R.: Hydrographic data from the GEF Patagonia cruises, *Earth Syst. Sci. Data*, 6, 265–271 (2014). <https://doi.org/10.5194/essd-6-265-2014>
14. Clayton, T.D. and Byrne, R.H.: Spectrophotometric seawater pH measurement: Total hydrogen ion concentration scale calibration of m-cresol purple and at sea results. *Deep-Sea Res.*, 40, 2115-2129 (1993). doi:10.1016/0967-0637(93)90048-8
15. Dickson, A.G., C.L. Sabine, J.R. Christian, J.R., Guide to best practices for ocean CO₂ measurement (2007). Sidney, British Columbia, North Pacific Marine Science Organization, 191pp. <https://doi.org/10.25607/OBP-1342>
16. Bianucci, L.: Climatología de los frentes de marea y su relación con los flujos mar-atmósfera de CO₂ en la plataforma Patagónica. Universidad de Buenos Aires (2004)
17. Luz Clara, M: Estimación de los flujos mar-atmósfera de CO₂ y la variabilidad de la clorofila-a en el Mar Argentino. Universidad de Buenos Aires (2008)
18. Kahl, L.C.: Balance y variabilidad del CO₂ en el Mar Patagónico”. Universidad de Buenos Aires (2013).
19. Gomez Saez, L: Evaluación de la variabilidad en los flujos de CO₂ aire- mar en una transecta perpendicular a la batimetría a 44°S en el Mar Argentino. Universidad de Buenos Aires (2019).
20. Bianchi, A.: Sea-Air CO₂ Fluxes in the Patagonia Sea, Universidad Pierre et Marie Curie, París (2012).
21. Isbert, H.: El Mar de Weddell: intercambio mar-atmósfera del CO₂ y su relación con las variables físicas y biogeoquímicas. Universidad de Buenos Aires (2017).
22. Kahl, L.C.: Dinámica del CO₂ en el Océano Atlántico Sudoccidental. Universidad de Buenos Aires (2018). http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6525_Kahl
23. Bianchi A., L. Bianucci, A. Piola, D. Ruiz Pino, I. Schloss, A. Poisson, and C. Balestrini: Vertical stratification and sea-air CO₂ fluxes in the Patagonian shelf, *J. Geophys. Res.*, 110, C07003 (2005), <https://doi.org/10.1029/2004JC002488>.
24. Bianchi, A.A., D. Ruiz-Pino, H.G.I. Perlender, A.P. Osiroff, V. Segura, V. Lutz, A.R. Piola: Annual balance and seasonal variability of sea-air CO₂ fluxes in the Patagonia Sea: Their

- relationship with fronts and chlorophyll distribution. *J. Geophys. Res. Oceans*, 114(C3) (2009). <https://doi.org/10.1029/2008JC004854>
25. Lutz, V.A., V. Segura,... Balestrini C.F.: Primary production in the Argentine Sea during spring estimated by field and satellite models. *J. Plankton Res.*, 32(2), 181-195 (2010).
 26. Schloss, I., Ferreyra, G., Ferrario, M., Almandoz G., Codina, R., Bianchi, A., Balestrini, C., Ochoa, H., Ruiz D., Poisson, A.: Role of plankton communities in sea-air variations in pCO₂ in the SW Atlantic Ocean. *Marine Ecology Progress Series*. 332. 93-106. 10.3354/meps332093. (2007).
 27. Kahl, L.C., Bianchi, A.A., Osiroff, A.P., Ruiz Pino, D., and Piola, A.R.: Distribution of sea-air CO₂ fluxes in the Patagonian Sea: Seasonal, biological and thermal effects, *Continental Shelf Res.*, 143, 18–28 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.05.011>
 28. Arbilla L.A., Ruiz-Etcheverry L.A., López-Abbate C., Kahl L.C.: CO₂ sink and source zones delimited by marine fronts in the Drake Passage, *Progress in Oceanography*, 223, 103246 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103246>
 29. Martinetto, P., Kahl, C., Alemany, D., Botto, F. (en prensa). Patagonian shelf-break front: the ecosystem services hot-spot of the South West Atlantic Ocean, Ch 9: The Patagonian Shelfbreak Front: Ecology, Fisheries, Wildlife Conservation (Acha, E.M., Iribarne, O.O., Piola, A. Eds.). Springer, Aquatic Ecology Series.
 30. Piola AR, Palma ED, Bianchi AA, Castro BM, Dottori M, Guerrero RA, Marrari M, Matano RP, Möller OO, Saraceno M.: Physical oceanography of the SW Atlantic Shelf: A review. In: *Plankton Ecology of the Southwestern Atlantic: From the Subtropical to the Subantarctic Realm*, edited by Mónica S. Hoffmeyer, Marina E. Sabatini, Federico P. Brandini, Danilo L. Calliari, and Norma H. Santinelli. Springer Cham, pp. 37-56 (2018). https://doi.org/10.1007/978-3-319-77869-3_2.
 31. Bianchi, A.A., Osiroff, A.P., Balestrini, C.F., Piola, A.R., Perlender, H.I., Atrapando CO₂ en el mar patagónico, *Revista Ciencia Hoy Vol. 20 Nro.119* (2010).
 32. Touratier, F. and Goyet, C.: Applying the new TrOCA approach to assess the distribution of anthropogenic CO₂ in the Atlantic Ocean, *J Mar Sys*, 46(1–4), pp. 181–197 (2004). doi: 10.1016/j.jmarsys.2003.11.020.
 33. Kahl L.C., A. Bianchi, Ruiz-Pino D: "Anthropogenic Acidification and CO₂ in the Southwestern Atlantic Ocean", The 4th Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON) International Workshop, Hangzhou, China, p238. (2019)
 34. Bates, N.R., Y.M. Astor, M.J. Church, K. Currie, J.E. Dore, M. González-Dávila, L. Lorenzoni, F. Muller-Karger, J. Olafsson, and J.M. Santana-Casiano: A time-series view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic CO₂ and ocean acidification. *Oceanography* 27(1):126–141 (2014).
 35. Hartin, C.A., Bond-Lamberty, B., Patel, P., and Mundra, A.: Ocean acidification over the next three centuries using a simple global climate carbon-cycle model: projections and sensitivities, *Biogeosciences*, 13, 4329–4342, <https://doi.org/10.5194/bg-13-4329-2016>, (2016).
 36. Kahl L.C., Osiroff A.P. y Balestrini C.: Caracterización del sistema de los carbonatos en la región del Frente Marítimo del Río de la Plata. 18° Simposio Científico de la Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo (CTMFM) (2017).
 37. Osiroff A.P., Kahl L.C., Valla D. y Bianchi A.A.: Distribuciones de Alcalinidad y Carbono Inorgánico disuelto en el Océano Atlántico Sudoccidental. IX Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, ISBN 978-987-33-9294-8 Pag. 271 (2015).
 38. Bakker et al.: A multi-decade record of high quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth Sys Sci Data*, 8: 383-413 (2016). doi:10.5194/essd-8-383-2016
 39. Arbilla L.A., Ruiz-Etcheverry L.A., López-Abbate M.C., Kahl L.C.: CO₂ Fluxes in the Drake Passage: A Comprehensive Exploration. *Ocean Acidification Week. Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON)* (2023).