

BRAZILIAN OCEAN ACIDIFICATION RESEARCH (BROA)

(PESQUISA BRASILEIRA SOBRE A ACIDIFICAÇÃO DOS OCEANOS)

TEXTO ELABORADO A PARTIR DAS DISCUSSÕES ENTRE OS PARTICIPANTES DO WORKSHOP "STUDYING OCEAN ACIDIFICATION AND ITS EFFECTS ON MARINE ECOSYSTEMS"

PARTICIPANTES (EM ORDEM ALFABÉTICA): ADRIANA R. PERRETTI, ANDREW DICKSON, BÁRBARA R. PINHEIRO, BETINA G. R. ALVES, CAMILA O. PEREIRA, CATHERINE G. RIBEIRO, CHRIS LANGDON, CLAUDIA Y. OMACHI, FRÉDÉRIC KPÉDONOU, ILANA WAINER, IOLE ORSELL, JOANIE KLEYPAS, JULIANA LEONEL, LETICIA C. DA CUNHA, LISA ROBBINS, MARCELO F. L. DE SOUZA, MARCIA BICEGO, MARIANA DE V. C. GONÇALVES, MARTIM MAS, NATASCHA M. BERGO, PATRICIA PINHO, PAULO Y. G. SUMIDA, RODRIGO KERR, ROSANE G. ITO, RUBENS FIGUEIRA.

INSTITUIÇÕES PARTICIPANTES: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP), UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE (FURG), UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO (UFPE), UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (UERJ), UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ (UESC), UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ), SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY (SAN DIEGO, EUA), UNIVERSITY OF MIAMI (MIAMI, EUA), NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (BOULDER, EUA), US GEOLOGICAL SURVEY (EUA), INTERNATIONAL GEOSPHERE-BIOSPHERE PROGRAMME (IGBP).

RELATORES: DR. RODRIGO KERR & DRA. LETICIA C. DA CUNHA

REVISORES: DR. MARCELO F. L. DE SOUZA & DRA. ADRIANA R. PERETTI

MEMBROS LÍDERES DE GRUPO NAS INSTITUIÇÕES DA REDE DE PESQUISA BRASILEIRA SOBRE ACIDIFICAÇÃO DOS OCEANOS:

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP)

DRA. ILANA WAINER | INSTITUTO OCEANOGRÁFICO
L.P.: OCEANOGRAFIA FÍSICA - MODELAGEM CLIMÁTICA
<http://lattes.cnpq.br/7363908432737523>

DR. PAULO Y. G. SUMIDA | INSTITUTO OCEANOGRÁFICO
L.P.: OCEANOGRAFIA BIOLÓGICA - ACOPLAMENTO BENTO-
PELÁGICO
<http://lattes.cnpq.br/6311181934718737>

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (UERJ)

DRA. LETICIA C. DA CUNHA | FACULDADE DE OCEANOGRAFIA
L.P.: BIOGEOQUÍMICA DE AMBIENTES COSTEIROS - SISTEMA
CARBONATO
<http://lattes.cnpq.br/0415198949492913>

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE (FURG)

DR. RODRIGO KERR | INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA
L.P.: OCEANOGRAFIA FÍSICA E POLAR - CARBONO
ANTROPOGÊNICO & CLIMA
<http://lattes.cnpq.br/8913201220635275>

DRA. ROSANE G. ITO | INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA
L.P.: OCEANOGRAFIA QUÍMICA - FLUXOS DE CO₂ & SISTEMA
CARBONATO
<http://lattes.cnpq.br/2840046898467482>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ

DR. MARCELO F. L. DE SOUZA | DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS
EXATAS E TECNOLÓGICAS
L.P.: ECOLOGIA DE ECOSISTEMAS - PROCESSOS
BIOGEOQUÍMICOS EM SISTEMAS ESTUARINOS E COSTEIROS
<http://lattes.cnpq.br/9661320052179799>

Dezembro de 2012

1. Introdução

Diversos estudos atuais reportam um **aquecimento dos oceanos** desde os seus níveis superficiais até os mais profundos. Estima-se que a temperatura média dos oceanos aumentou em 0,037°C no período entre 1955 e 1998¹. Estes estudos científicos só são possíveis visto que vários **programas de observação oceanográfica**, em escala global, já foram realizados previamente (e.g., GEOSECS^a, WOCE^b). Hoje em dia, ainda há esforços que visam o **monitoramento** das propriedades e dos processos físicos, químicos e biológicos dos oceanos (e.g., ARGO^c, PIRATA^d, GOOS^e, OceanSites^f). Entretanto, apesar das iniciativas de observação, os oceanos continuam sendo “sub-amostrados”, uma vez que muitas observações restringem-se às camadas superficiais ou a escalas de tempo que não são adequadas para determinados estudos de processos oceanográficos e costeiros (e.g., ventilação da termoclina², variabilidade sazonal da pressão parcial de dióxido de carbono (CO₂) nos oceanos³, mistura pela maré e/ou ondas internas e frentes). Além disso, os equipamentos atuais de observações oceanográficas são comumente desprovidos de sensores que sirvam a aumentar o entendimento do papel dos oceanos no **ciclo global do carbono**.

As observações remotas dos oceanos, realizadas por satélites e intensificadas nas últimas décadas, serviram em parte para tentar preencher esta lacuna. Deve-se, porém, ter em mente que as mesmas são limitadas às camadas de superfície (1/5 da camada fótica⁴) e que os resultados são satisfatórios somente em regiões e períodos de tempo livres de nebulosidade.

No entanto, as questões científicas que relacionam **processos físicos e biogeoquímicos** marinhos ainda continuam sem resposta, apesar: (i) do crescente estresse gerado pelas mudanças climáticas nos ecossistemas oceânicos e costeiros; e (ii) da dependência de forçantes físicas pelos processos biogeoquímicos. Dentre as questões em aberto, podemos destacar: “*qual é a resposta biogeoquímica dos oceanos em relação às oscilações climáticas naturais provocadas pelo fenômeno El Niño-La Niña^{5,6}?*”, ou “*qual é a magnitude do sumidouro oceânico de carbono (CO₂) antropogênico e dos efeitos consequentes de acidificação dos oceanos^{7,8}?*”, ou ainda, “*qual é a taxa e a distribuição espacial das áreas de desoxigenação dos oceanos decorrente do seu aquecimento⁹⁻¹²?*”.

A costa brasileira possui extensão na ordem de 10.000 km, sendo a área oceânica da zona exclusiva do Brasil superior a 3,5 milhões de km², quando consideradas as ilhas oceânicas do oceano Atlântico Sul pertencente ao território brasileiro: a chamada “Amazônia Azul”⁹. Neste sentido, passando da escala global para a escala regional, identifica-se na margem continental do oceano Atlântico Sudoeste (i.e., região de interesse político-econômico para o Brasil) uma carência de dados oceanográficos históricos e séries

^a <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.GEOSECS/>

^b <http://woce.nodc.noaa.gov/wdiu/>

^c <http://www.argo.ucsd.edu/index.html>

^d <http://www.pmel.noaa.gov/pirata/>

^e <http://www.ioc-goos.org/>

^f <http://www.oceansites.org/>

^g https://www.mar.mil.br/menu_v/amazonia_azul/html/definicao.html

temporais de longo período (i.e., décadas, séculos) que descrevam a climatologia e a variabilidade inter- e intra-anual de propriedades físicas e químicas (e.g., temperatura, salinidade, direção e intensidade de correntes, oxigênio dissolvido, parâmetros biogeoquímicos).

Da mesma forma, há uma ausência de séries temporais e até mesmo de medições de parâmetros que regem a dinâmica dos oceanos e os processos intrínsecos às trocas entre os compartimentos do sistema continente-oceano-atmosfera (e.g., intensidade e de direção dos ventos, precipitação). Sem o conhecimento da **variabilidade natural** de um sistema (i.e., dos processos físicos e biogeoquímicos associados e inter-relacionados nos diversos compartimentos da Terra), torna-se muito difícil a identificação e avaliação dos **impactos regionais** relacionados às **mudanças climáticas** e à **acidificação dos oceanos**. A atuação destes impactos na vida marinha dos ecossistemas costeiros e oceânicos, e a consequente resposta para a sociedade brasileira no contexto socioeconômico **também é prejudicada por esta carência de informações**.

Como exemplo de impactos relacionados às mudanças globais, podemos citar o aumento da intensidade do fenômeno chamado “Vazamento das Agulhas”, que resulta na liberação de vórtices (i.e., feições de mesoescala que exercem influência na circulação global, na distribuição de larga escala de massas d'água e na biologia dos oceanos) originados do sistema da corrente das Agulhas (Atlântico Sudeste). Por conseguinte, estas estruturas de mesoescala alcançam o sistema da corrente do Brasil, alterando a estrutura da termoclina no oceano Atlântico Sudoeste (corrente do Brasil) com aumento zonal da temperatura e da salinidade¹³. O aumento do “Vazamento das Agulhas” está relacionado ao enfraquecimento dos ventos oeste (*westerlies*) no oceano Austral¹⁴. Outro exemplo está relacionado as anomalias positivas de temperatura superficial do oceano Atlântico Sudoeste, que afetam diretamente a troca de calor entre a atmosfera e a superfície do oceano, criando condições que aumentam a probabilidade de ocorrência de tempestades tropicais e furacões que podem atingir a costa brasileira, como foi o caso do furacão CATARINA em 2004^{15,16}.

O que é a acidificação dos oceanos?

Entende-se por acidificação a **redução do pH dos oceanos** por longos períodos de tempo (décadas ou mais). Esta redução do pH é causada principalmente pela **dissolução do CO₂ atmosférico** nos oceanos. O aumento contínuo das emissões antropogênicas de CO₂ para a atmosfera desde o início da Revolução Industrial elevou a concentração de dióxido de carbono na atmosfera a **níveis 40% superiores** aos encontrados no período pré-industrial⁵³. Atualmente, **os oceanos absorvem todo ano 25% das emissões de CO₂ antropogênico**, o que vem reduzindo drasticamente o impacto deste gás de efeito estufa sobre o clima em nosso planeta. Na figura 4 temos a concentração estimada de CO₂ de origem antropogênica dissolvido (CO_{2ant}) na superfície do oceanos, segundo o banco de dados GLODAP⁴⁸. O oceano Atlântico apresenta as maiores concentrações de CO_{2ant} em superfície. No entanto, a absorção do CO_{2ant} pelos oceanos **altera a química da água do mar** pelo aumento na formação de ácido carbônico, e em consequência ocorre a diminuição do pH da água⁵⁴. Este processo torna a água do mar mais **“corrosiva”** para os organismos que produzem conchas e outras estruturas calcárias, podendo afetar também a sua reprodução, fisiologia e distribuição geográfica. Caso o ritmo atual de emissões antropogênicas de CO₂ seja mantido, **dentro de poucas décadas a água do mar em regiões tropicais não sustentará mais o desenvolvimento de ecossistemas coralinos**, por exemplo. Isto levará à **perda de biodiversidade** e a **impactos econômicos ligados aos recursos pesqueiros e atividades relacionadas ao turismo**.

Cabe aqui ressaltar que medidas de mitigação dos impactos climáticos (redução da temperatura global, redução nas emissões dos outros gases de efeito estufa) **não têm nenhum efeito sobre o problema da acidificação dos oceanos**. A acidificação não é causada pelas mudanças climáticas globais, ela é **outro problema** relacionado às emissões antropogênicas de CO₂.

Embora haja esforços recentes de alguns grupos de pesquisa brasileiros para a implementação de sistemas de monitoramento de parâmetros físicos e biogeoquímicos na região costeira do Brasil, não há um grupo específico voltado para o melhor entendimento dos processos oceânicos relacionados às alterações biogeoquímicas reportadas nos oceanos¹⁷ e nos ecossistemas adjacentes, onde todos os aspectos ligados à **acidificação dos oceanos** sejam contemplado. Junto a isso, o papel dos diversos ecossistemas costeiros (e.g., mangues, lagunas, etc.) como fontes ou sumidouros de CO₂ atmosférico ainda está sendo ignorado no Brasil¹⁸. Por fim, para compreender as alterações biogeoquímicas e os efeitos da acidificação nestes ambientes, é necessário a aquisição de equipamentos para realizar medidas de parâmetros físicos e químicos de elevada precisão. As técnicas laboratoriais e os sensores utilizados para estes fins devem seguir, preferencialmente, protocolos internacionais^{19,20}, para reduzir drasticamente as incertezas na quantificação de fluxos biogeoquímicos marinhos através do conhecimento da variabilidade natural do ecossistema (i.e., escalas de tempo diurnas, sazonais e interanuais) da plataforma continental brasileira e do oceano Atlântico Sudoeste como um todo.

A criação de uma rede de pesquisadores voltada para o tema “**acidificação dos oceanos**” em conjunto com o estabelecimento de **sistemas de observação a longo prazo** (i.e., séries temporais, boias oceanográficas, amostragens a bordo de navios oceanográficos) possibilita ainda a compreensão da variabilidade espacial dos parâmetros físicos e biogeoquímicos relacionados ao sistema CO₂ na água do mar em diferentes escalas (local, regional, inter-regional). Como produto deste esforço de pesquisa pode-se esperar a **previsibilidade do funcionamento** de ecossistemas marinhos, do ponto de vista físico e biogeoquímico, trazendo benefícios tanto à comunidade científica quanto à sociedade.

No que diz respeito às medidas de parâmetros físico-químicos que controlam os fluxos de CO₂ na interface ar-mar (i.e., pH, pCO₂, oxigênio dissolvido, temperatura, salinidade, intensidade do vento, produção primária, respiração, calcificação/dissolução do carbonato), as observações a longo prazo permitirão quantificar a invasão de CO₂ antropogênico no oceano, e **compreender objetivamente** as tendências nas mudanças de pH e disponibilidade do íon carbonato na água do mar. Identificando as tendências em acidificação (regional e/ou temporal), pode-se avaliar direta e rapidamente o risco deste impacto sobre os organismos marinhos que produzem estruturas carbonatadas (e.g., cocolitoforídeos, foraminíferos, pterópodes, corais de águas rasas, e ainda corais de águas profundas - *Lophelia pertusa*, que ocorre na porção sudeste da plataforma continental brasileira²¹), e indiretamente os riscos de **perda de biodiversidade** em ambientes recifais e costeiros, além de prováveis **impactos sobre os estoques pesqueiros**. Este tipo de informação torna-se imediatamente uma ferramenta para **tomada de decisões** por parte das classes científicas e políticas.

Este documento foi gerado a partir de discussões entre pesquisadores brasileiros e estrangeiros de diferentes áreas do conhecimento, a fim de propiciar ferramentas e subsídios necessários para a compreensão, por parte das autoridades competentes, do atual estágio do Brasil e da pesquisa científica brasileira frente a questão de acidificação dos oceanos - tema de importância global, regional e local já

extremamente difundido e amparado internacionalmente por diversos governos e organizações científicas^{hij}. A seguir são destacados a importância e os objetivos da pesquisa brasileira, o contexto atual do Brasil, os recursos necessários e os desafios a serem superados frente a linha de pesquisa científica de acidificação dos oceanos.

2. Justificativa e Relevância dos estudos de acidificação dos oceanos

Aproximadamente $\frac{1}{4}$ das emissões anuais de CO₂ antropogênico (CO_{2ant}) são absorvidos pelos oceanos, entretanto, sua distribuição espacial e as taxas de armazenamento e captação reportadas são bastante incertas²². Estima-se que 34% da absorção global de CO_{2ant} pelos oceanos ocorra na superfície do oceano Atlântico (^{6,23}, figura 4), o que o torna particularmente exposto aos efeitos da acidificação. Apesar deste processo de absorção do CO_{2ant} pelos oceanos diminuir a intensificação do efeito estufa na atmosfera, devido à ordem de grandeza das emissões antropogênicas o “custo ambiental” é bastante elevado:

- quando o CO₂ atmosférico é absorvido pelos oceanos, queremos dizer que este gás é dissolvido na água do mar. O resultado deste processo é a formação de ácido carbônico, uma reação química que leva à acidificação dos oceanos. A “acidez” dos oceanos já aumentou em aproximadamente 30% desde o começo da revolução industrial²⁴.

Assim, a capacidade total dos oceanos em absorver o CO₂ antropogênico é uma função da solubilidade do CO₂ e da capacidade de tamponamento químico da água do mar. O tamponamento químico é oriundo das reações das moléculas de CO₂ com os íons carbonato durante a reação de formação de íons bicarbonato. Um pulso moderado de liberação de CO₂ para a atmosfera resultaria numa dissolução de 85% por parte dos oceanos²⁵. Desta forma, destaca-se a importância do estudo multidisciplinar e integrado da circulação e dinâmica oceânica relativa às alterações biogeoquímicas inerentes ao ciclo do carbono (i.e., estimativas das taxas de absorção, emissão e armazenamento, e da distribuição na coluna d’água). Seguindo a tendência atual de emissões de CO₂ antropogênico, prevê-se que dentro de décadas o crescimento de organismos marinhos que produzem estruturas calcárias (e.g., conchas, exoesqueletos), como os moluscos, equinodermos, crustáceos, e especialmente os corais escleractínios (tanto as espécies tropicais quanto as espécies de águas profundas e frias – ambas presentes na costa e na margem continental brasileira) estará tão prejudicado pela acidificação dos oceanos que haverá mais erosão que crescimento (no caso dos recifes coralinos). Em algumas regiões e sob determinadas condições, a vida nos oceanos para certos organismos pode tornar-se impraticável (ver painel Pág. 3 e Fig. 1).

^h <http://oceanacidification.org.uk>

ⁱ <http://www.oceanacidification.noaa.gov>

^j <http://www.epoca-project.eu>

Para evitar o aumento da acidificação dos oceanos, não basta tomar medidas de controle do aumento da temperatura global. Caso o CO_2 continue a ser emitido pelo homem no mesmo ritmo de hoje, os oceanos continuarão a absorver o CO_2 que está em excesso na atmosfera. A acidificação dos oceanos não é um efeito do aquecimento global, e sim o chamado “o outro problema do CO_2 ”²⁶. As emissões antropogênicas e o aumento do CO_2 atmosférico promovem tanto o aquecimento global quanto a acidificação dos oceanos. Caso o CO_2 continue a ser emitido pelo homem no ritmo atual, os oceanos continuarão a absorver o excesso que está na atmosfera. A Figura 1 mostra resumidamente o efeito de alteração no sistema carbonato dos oceanos (e.g., pH, saturação de calcita e aragonita), que é ocasionado devido ao aumento da emissão de CO_2 para a atmosfera.

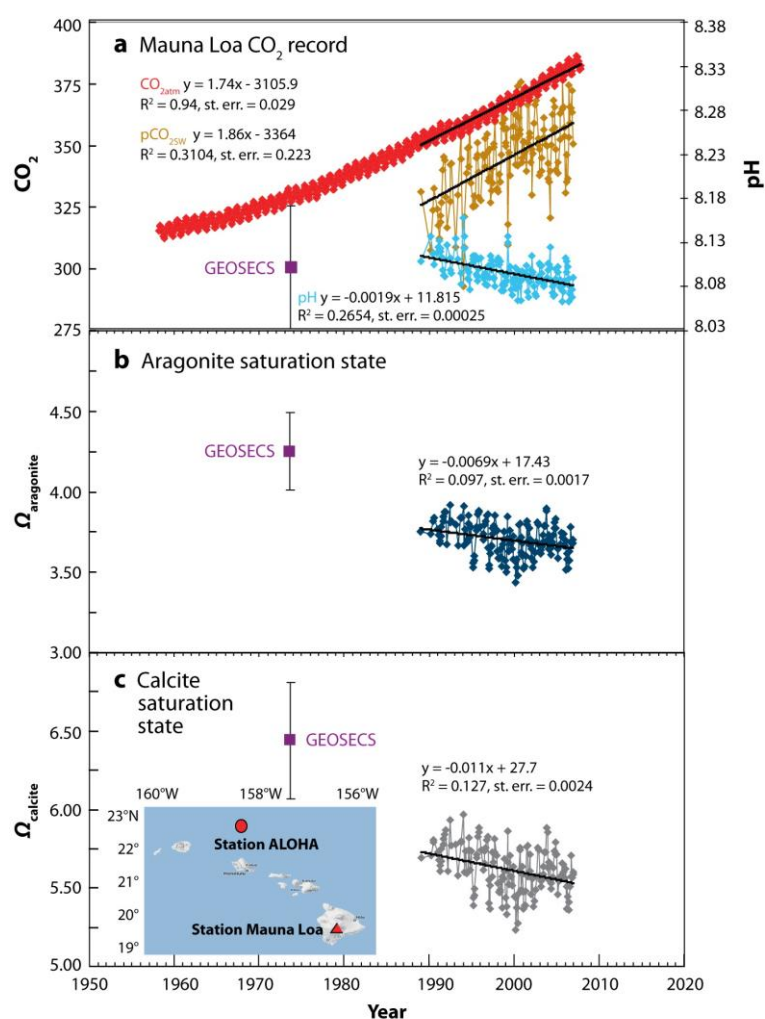


Figura 1. Séries temporais do Observatório Atmosférico de Mauna Loa e da Estação Oceanográfica ALOHA (Havaí, EUA) para a) pCO_2 atmosférico (ppmv, pontos vermelhos), pCO_2 na superfície do oceano (ppm, pontos marrons), e pH na superfície do oceano (pontos azul claros); b) saturação da aragonita na superfície do oceano (pontos azul escuros); c) saturação da calcita na superfície do oceano (pontos cinza). Note-se o aumento das concentrações de CO_2 atmosférico e dissolvido na superfície do oceano, concomitantemente com a diminuição do pH e do estado de saturação de aragonita e calcita. Fonte: ²⁶

A pesquisa científica sobre a acidificação e suas implicações para os processos biogeoquímicos globais e seus efeitos sobre os organismos marinhos é relativamente recente, apesar da sua importância global. Por esse motivo, acreditamos que a comunidade científica brasileira deve **posicionar-se e juntar-se aos esforços internacionais** que estão sendo realizados. De forma bastante resumida, podemos destacar a seguinte pergunta:

QUAIS SÃO OS EFEITOS DA ACIDIFICAÇÃO DOS OCEANOS?

- 1) A destruição/declínio de recifes corálinos (zona berçário para muitas espécies de interesse comercial) afeta diretamente: a biodiversidade marinha, o turismo, a produção pesqueira e a proteção do litoral contra eventos extremos (e.g., tempestades).
- 2) A acidificação afeta diretamente o plâncton, que é a base da cadeia alimentar marinha. Com isso, muitas espécies de interesse comercial (e.g., peixes, crustáceos, moluscos) estão ameaçadas. A economia baseada na pesca artesanal será provavelmente a mais afetada.
- 3) O aumento da acidificação, junto com o aumento da temperatura dos oceanos, diminui a capacidade de absorção do CO₂ em excesso, o que cria um círculo vicioso de aumento da temperatura e aumento dos efeitos de aquecimento da atmosfera.

Desta forma, a partir deste questionamento, destacamos abaixo os principais objetivos para a formação de uma rede de investigação científica com foco no estudo dos processos de acidificação dos oceanos, que devem ser considerados pela comunidade científica brasileira, pelos órgãos de fomento e pelos tomadores de decisões político-estratégicas que visam o interesse socioeconômico do Brasil.

2.1. *Objetivos da rede de pesquisa em Acidificação dos Oceanos*

- ❖ **Identificar áreas prioritárias dos ecossistemas brasileiros** vulneráveis à acidificação dos oceanos;
- ❖ **Implantar uma rede de monitoramento de longo prazo** dos parâmetros biogeoquímicos e físicos em regiões oceânicas e costeiras de importância econômica e social;
- ❖ **Capacitar recursos humanos** para estudos científicos sobre acidificação dos oceanos;
- ❖ **Criar um banco brasileiro de dados biogeoquímicos** (e.g., pH, pCO₂, AT, DIC, nutrientes), de modo a colaborar com os conjuntos de dados internacionais já disponibilizados em rede;
- ❖ Fornecer **ferramentas** e **informações quantitativas** para os tomadores de decisões político-econômica;

2.2. Objetivos científicos

- ❖ **Compreender o papel dos processos físicos e biogeoquímicos** no sistema carbonato e no clima global;
- ❖ Compreender as questões inerentes aos **ciclos biogeoquímicos** e os fluxos associados dentre os diferentes compartimentos: **fluxos verticais** na interface ar-mar e bêntico-pelágico; **fluxos laterais** entre continente-zonas costeiras, oceano costeiro-quebra de plataforma-oceano profundo;
- ❖ **Identificar de que forma a acidificação dos oceanos está influenciando e impactando** os organismos nos diferentes níveis da cadeia trófica marinha e estuarina (e.g., crescimento, desenvolvimento, morfologia, dinâmica trófica, metabolismo - produção e respiração, biodiversidade - estrutura de comunidades, expressão gênica, fluxo gênico e conectividade);
- ❖ **Identificar a influência da atividade antrópica relacionada à acidificação dos oceanos** (i.e., papel das emissões de CO₂ - carbono antropogênico)
- ❖ **Identificar a vulnerabilidade de ecossistemas baseados em organismos calcificadores:** na plataforma e margem continental do Brasil há recifes coralinos de águas rasas, uma extensa plataforma continental carbonatada (rodolitos, “mar de bananeiras”), além da ocorrência de corais de águas frias (*Lophelia* sp.).

3. Pesquisa Brasileira no contexto da acidificação dos oceanos

Devido à sua posição geográfica, com a maior parte da sua linha de costa voltada para o oceano Atlântico Sul, o Brasil possui destacada importância no contexto geopolítico para o conhecimento científico desta vasta área oceânica, onde estão incluídos os ecossistemas costeiros de manguezais, lagunas, recifes coralinos, entre outros, e as zonas costeiras e oceânicas do oceano Atlântico Sudoeste (Fig. 2). No entanto, o conhecimento científico gerado para estas regiões com base em medições e sistemas de monitoramento de parâmetros físicos e biogeoquímicos (e.g., pH, alcalinidade total, pCO₂ e carbono inorgânico dissolvido) ainda encontra-se aquém das expectativas necessárias para a correta compreensão dos estudos relativos à acidificação dos oceanos. Na Figura 2, podemos identificar a **falta de conhecimento** sobre o papel ecológico de largas extensões da zona econômica exclusiva (ZEE) brasileira, o que inclui os parâmetros essenciais ao estudo da acidificação dos oceanos (área da ZEE brasileira sombreada em azul no mapa).

Assim, destacamos abaixo na seção 3.1 o que a pesquisa brasileira realizou até então para estas regiões, as estratégias de abordagem que devem ser executadas para o preenchimento desta lacuna de conhecimento e, por fim, os principais mecanismos a serem desenvolvidos para os ecossistemas costeiro, estuarino e oceânico.

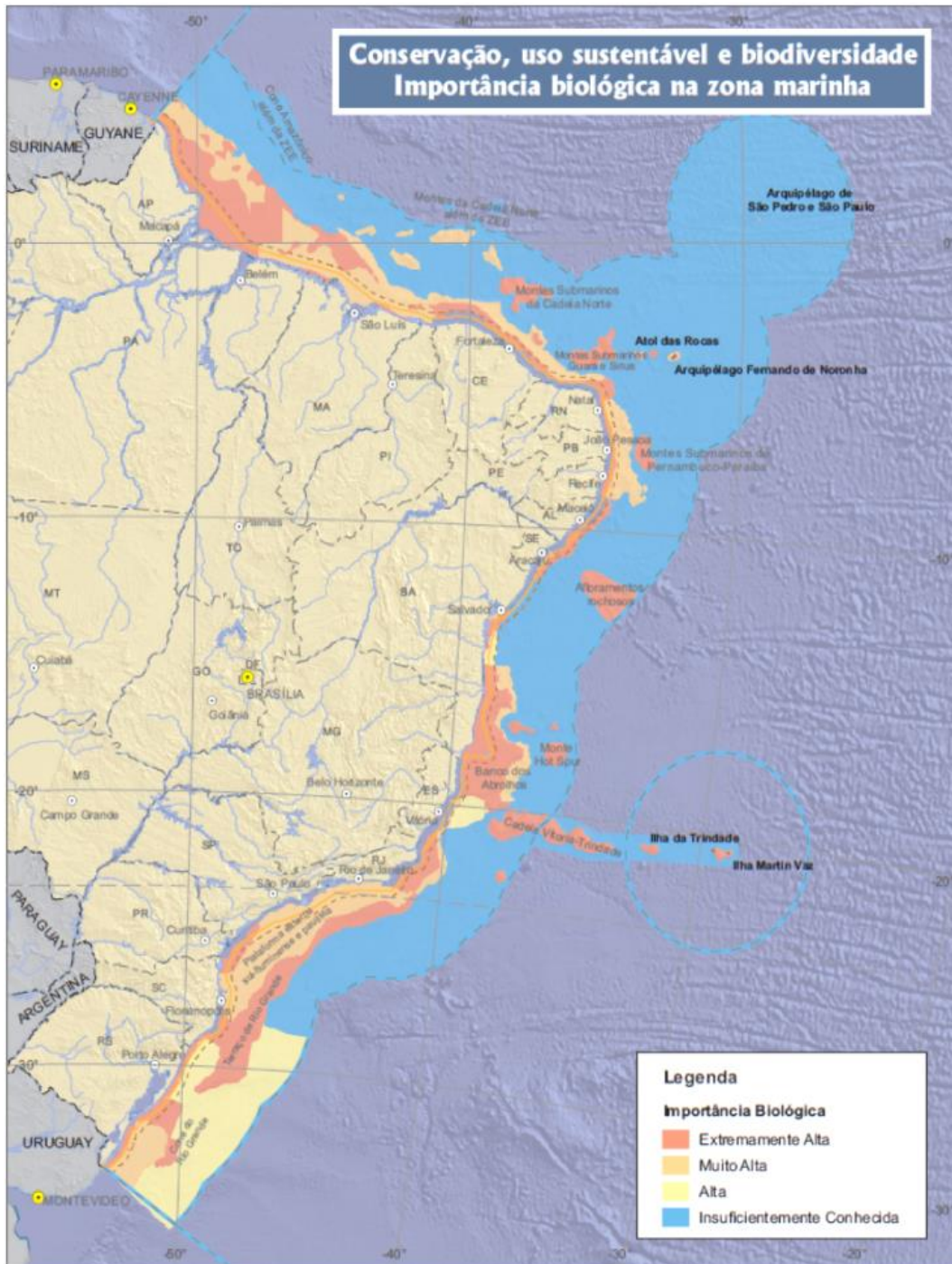


Figura 2. Mapa dos ecossistemas marinhos, costeiros e oceânicos do Brasil. As áreas sombreadas em azul no mapa ainda não têm a sua importância biológica reconhecida, devido à falta de estudos suficientes. Fonte: ²⁷.

3.1. Conhecimento científico prévio

Diversos projetos de pesquisa científica e programas nacionais e internacionais já executaram suas atividades entre os diferentes ecossistemas marinhos mencionados na Fig. 2. Entretanto, a maior parte destes estudos não teve como meta um acompanhamento temporal das medições de parâmetros físicos, químicos e biológicos. Dentre estes, poucos foram aqueles estudos que realizaram medições de parâmetros químicos essenciais (ver Glossário ao lado) para a **compreensão das alterações do sistema carbonato**. A maior parte dos grupos de pesquisa detentores destes dados trabalharam de forma isolada em suas respectivas regiões de atuação. O programa REVIZEE (*Programa de Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva*) proporcionou um entendimento sinótico das características físicas do ambiente da zona econômica exclusiva brasileira, bem como, dos recursos vivos e da biologia de espécies da costa brasileira. Entretanto, o mesmo não teve continuidade de suas atividades para monitoramento em média e larga escala dos ecossistemas sensíveis. Por outro lado, programas como o PELD (*Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração*) preenchem a questão de séries temporais de determinados parâmetros, mas são restritos a determinadas regiões (e.g., Baía de Guanabara - RJ e Lagoa dos Patos - RS).

GLOSSÁRIO:

pH: medida da concentração do íon H^+ , que indica a acidez da água do mar.

Carbono inorgânico dissolvido (DIC): a soma das formas inorgânicas dissolvidas do carbono na água (CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-}).

$p(CO_2)$: pressão parcial do dióxido de carbono na água do mar.

Alcalinidade total (AT): propriedade físico-química da água do mar, correspondente ao balanço das cargas dos cátions e ânions dissolvidos.

Rodólitos: Estruturas de carbonato de cálcio formadas por algas vermelhas coralinas, encontrados em fundos marinhos rasos. Os fundos de rodólitos criam hábitat para diversas outras espécies marinhas, como os recifes de corais. Uma das maiores extensões de bancos de rodólitos do planeta encontra-se na plataforma continental brasileira.

Calcificação: processo no qual organismos aquáticos utilizam os íons carbonato (CO_3^{2-}) e cálcio (Ca^{2+}) dissolvidos na água para secretar conchas e exoesqueletos calcários.

Recentemente, outros projetos (e.g. REVIZEE, HABITAT, Estação Antares em Ubatuba^k, FLUXCARB (Litoral da Bahia)²⁸) também colaboraram para o entendimento dos processos físicos e biológicos dos ecossistemas marinhos do Brasil, mas os mesmos sempre são (ou foram) limitados tanto em resolução espacial, ou seja, sua área de abrangência total, quanto em resolução temporal. Somado a isto, conforme já destacado, parâmetros essenciais para a identificação dos efeitos da acidificação dos oceanos sobre aspectos biológicos e socioeconômicos são extremamente escassos. **Estudos integrados para o conhecimento** destes efeitos a curto e médio prazo, que contemplem (incluam) o monitoramento destes parâmetros, em **escalas espaciais e temporais desejáveis** para a correta compreensão das alterações já

^k <http://www.dsr.inpe.br/antares/index.html>

identificadas nos oceanos e nos diferentes ecótonos entre as zonas continentais e oceânicas (quando observamos as alterações em escala global), devem ser priorizados como **tema de interesse nacional**.

Alguns esforços já estão em fase de implantação, como destacando-se as boias oceanográficas e meteorológicas dos projetos PIRATA^l (Prediction and Research Moored Array in the Atlantic, coordenado pelo Brasil EUA e França) e PNBOIA^m (Programa Nacional de Boias, DHN, Marinha do Brasil) onde planeja-se futuramente incluir sensores de p(CO₂) para medições de fluxos na interface ar-mar. Entretanto, apenas a realização da medição de um dos parâmetros não permite o entendimento do sistema carbonato nestes ambientes. Nestes casos, são necessários ao menos a medição de dois destes parâmetros, sendo recomendável a correta medição e análise de três parâmetros. Dificuldades são encontradas, neste caso, visto que a precisão e exatidão das medidas necessárias devem seguir padrões internacionais de análises. **O Brasil hoje não dispõe de instrumentação adequada (desejável) e laboratórios de referência para determinadas análises necessárias para o estudo da acidificação dos oceanos.** A qualificação profissional para a execução destes estudos existe, entretanto, deve-se ter em mente a necessidade de treinamento de recursos humanos voltado diretamente para as questões de acidificação dos oceanos. Somente assim, ou seja, com equipamentos e laboratórios de ponta com pesquisadores qualificados, a qualidade das medidas obtidas para os parâmetros químicos destacados acima poderá auxiliar no complexo entendimento das alterações da acidez dos ambientes marinhos e costeiros. Por fim, destacamos que a disponibilidade de medições pretéritas (embora raras) é dificultada pela ausência de um banco de dados comum com rigor em seu controle de qualidade.

3.2. Estratégias de abordagem

As seguintes estratégias de abordagem foram identificadas para a compreensão atual e futura do comportamento dos diferentes ecossistemas marinhos frente ao processo de acidificação dos oceanos, sendo estes:

- ❖ **Monitoramento dos ecossistemas:** um sistema de monitoramento oceânico e costeiro deve ser implementado considerando todos os parâmetros biogeoquímicos necessários para a compreensão do ciclo do carbono nos ambientes aquáticos e marinhos. A implantação do sistema de monitoramento irá permitir um melhor conhecimento da climatologia e dos processos físicos e biogeoquímicos de cada região, essencial para a detecção dos efeitos da acidificação dos oceanos;
- ❖ **Experimentos laboratoriais e *in situ*:** experimentos biológicos devem ser priorizados para o entendimento do efeito da acidificação sobre a biota marinha e estuarina. A realização de delineamentos experimentais proporcionará a identificação prévia do efeito da acidificação sobre

^l <http://www.pmel.noaa.gov/pirata/>

^m <http://www.goosbrasil.org/pnboia/index.php>

o comportamento da biota, essencial para a elaboração de técnicas de mitigação de perda de recursos biológicos e para assuntos econômicos;

- ❖ **Modelagem biogeoquímica:** simulações numéricas dos ecossistemas costeiros e oceânicos devem ser implementadas e realizadas para suprir parte da carência observacional tanto espacial quanto temporalmente. A modelagem numérica preenche as lacunas observacionais e é fundamental para uma melhor compreensão dos processos acoplados entre os diferentes ambientes. Entretanto, esta depende fundamentalmente dos esforços observacionais de monitoramento para a validação de seus resultados;
- ❖ **Estudos paleoceanográficos:** estudos paleoceanográficos são incentivados, visto que fornecem uma caracterização pretérita das condições ambientais de determinados ecossistemas. Paleoreconstruções ambientais a partir de testemunhos de sedimentos marinho poderiam elucidar sobre as variações pretéritas do sistema carbonato marinho, e sobre os processos que exerceram controle sobre as mesmas (i.e., mudanças climáticas, ciclo glacial-interglacial). Conhecendo-se a concentração do íon carbonato e o pH do oceano em eventos análogos pretéritos (i.e., períodos do passado geológico onde as concentrações de CO₂ atmosférico e/ou a temperatura global eram mais elevadas) tem-se uma percepção melhor dos processos de preservação do carbonato e do papel do oceano no equilíbrio do ciclo global do carbono²⁹. Tal conhecimento pode auxiliar na elaboração de modelos climáticos, bem como auxiliar na compreensão dos efeitos da acidificação dos oceanos sobre organismos carbonatados³⁰. O Brasil recentemente (agosto de 2012) aderiu ao programa internacional “*Integrated Ocean Drilling Program – IODP*”ⁿ, que desde 1958 dedica-se a estudos de paleoclimatologia, paleoceanografia e estrutura da Terra. Esta nova cooperação internacional deve ser fortemente considerada/aproveitada pelos pesquisadores brasileiros dedicados aos estudos paleoceanográficos.

O conhecimento gerado pelas observações a longo prazo, por experimentos e simulações numéricas permitirá um **melhor planejamento de estudos** de processos físicos e biogeoquímicos relacionados à acidificação dos oceanos na região costeira e no Atlântico Sudoeste. O conjunto de dados gerados pelas observações (i.e., séries temporais com amostragem discreta, boias e cruzeiros oceanográficos) contribuirá para o entendimento do papel do Atlântico Sudoeste no ciclo global do carbono (i.e., fluxos de CO₂ e produtividade). Espera-se também que os dados gerados através desta rede de pesquisadores sirvam para complementar programas nacionais de observação dos oceanos (PNBOIA^o) e integrem bases de dados científicos internacionais (*Global Ocean Observing System - GOOS*³¹, *Surface Ocean Carbon Atlas - SOCAT*^{32,33}).

ⁿ <http://www.iodp.org>

^o <http://www.goosbrasil.org/pnboia/index.php>

Em termos de **capacitação de pessoal**, a massa de dados que será gerada pelos sistemas de observação dará origem a múltiplos trabalhos de monografia, dissertações de mestrado e teses de doutorado (incluem-se aí os artigos publicados em periódicos científicos indexados). A natureza multidisciplinar das observações oceânicas **integrará as equipes nacionais** de pesquisa em oceanografia (física, biogeoquímica, biologia), permitindo a formação de profissionais capacitados para identificar os riscos decorrentes das mudanças ambientais ocasionadas devido à acidificação dos oceanos e os ecossistemas sensíveis aos seus efeitos (e.g., estuários, recifes coralinos, áreas de interesse pesqueiro).

3.3. *Ecossistemas costeiros e estuarinos*

As áreas costeiras são reconhecidas por seu importante papel no ciclo do carbono dos oceanos devido à alta produção biológica numa superfície relativamente pequena (8% da superfície global dos oceanos³⁴. Os estuários, em especial, transformam profundamente o material (incluindo nutrientes e carbono) trazido pelos rios, antes de exportá-lo para a zona costeira adjacente. Como resultado dos processos biogeoquímicos estuarinos nos sedimentos e na coluna d'água, observa-se comumente a emissão de CO₂ para a atmosfera³⁵. A produção da matéria orgânica nos estuários, a conseqüente exportação do carbono para a zona costeira, e subsequente mineralização (forma inorgânica dissolvida, DIC) e transporte para o oceano profundo adjacente, constitui o sequestro de carbono na plataforma continental (*continental shelf pump*), responsável pelo papel de sumidouro de CO₂ atmosférico nesta porção do oceano^{34,36,37}. No entanto, **a quantificação dos fluxos biogeoquímicos** (carbono e nutrientes) entre as áreas costeiras e o oceano adjacente e a atmosfera **possui ainda muitas lacunas no Brasil** e no mundo, devido à heterogeneidade natural destes ecossistemas aliada à eutrofização (fatores naturais ou influência antrópica) de muitas zonas costeiras³⁸. O conhecimento dos ciclos biogeoquímicos em zonas costeiras é destacado como um elemento chave para **identificar os impactos causados pela acidificação**, e para que seja feita a distinção entre esta última e outros processos provocados pela ação do homem.

No Brasil, pode-se citar poucos estudos de quantificação de fluxos biogeoquímicos costeiros que incluam também um ou mais parâmetros do sistema carbonato marinho (e.g., pH, DIC, AT, pCO₂). Um estudo hidroquímico no manguezal de Itacuruçá (Baía de Sepetiba, RJ) em 1986-87 mostrou que a origem dos nutrientes e da alcalinidade no ecossistema é controlada pelas marés³⁹. Posteriormente, foi estimado que o manguezal de Itacuruçá emite 41,1 mol C m⁻² a⁻¹ para a atmosfera^{38,40}. Estudos sobre a solubilidade do CO₂ na zona costeira e manguezais ao longo do litoral do Espírito Santo e Bahia⁴¹ mostram uma grande heterogeneidade na condição autotrófica ou heterotrófica do ecossistema. Áreas influenciadas por aportes continentais de nutrientes ou áreas onde há forte precipitação biológica de CaCO₃ (e.g., Abrolhos) mostraram supersaturação de CO₂ dissolvido (heterotrofia). Ainda no litoral da Bahia, observou-se heterotrofia líquida e fluxo de 13 mol CO₂ m⁻¹ a⁻¹ para a atmosfera no estuário do Rio Piauí (SE)²⁸. Estudos realizados no recife de Coroa Vermelha (Sta. Cruz de Cabrália, BA) demonstraram taxas de calcificação-dissolução variando de -9.4 a 26.4 mmol C m⁻² h⁻¹. Os fluxos de CO₂ no recife variaram entre -5.0 a 23.0 10⁻³ mmol CO₂ m⁻² h⁻¹ com predomínio de invasão de gás da atmosfera durante a maré baixa. As águas no entorno do recife

apresentaram supersaturação de CO_2 , atuando como fonte de CO_2 para a atmosfera (-10.5 a $0.4 \cdot 10^{-3} \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)⁴².

Em 2005, um estudo brasileiro⁴³ determinou a sazonalidade das trocas de CO_2 mar-atmosfera na região de plataforma até o talude continental ao largo de Santos (SP). Os resultados mostram que somente durante o inverno a região absorve CO_2 atmosférico. Nas outras estações do ano, o efeito biológico (respiração) e o aumento da temperatura da água (e a consequente diminuição da solubilidade do CO_2 na água do mar) sobrepõem-se à absorção de CO_2 através da produção primária. **Até o presente momento (2012), não há estudos brasileiros publicados direcionados ao tema das mudanças biogeoquímicas e dos impactos diretamente ligados à acidificação.** Recentemente enfatizou-se a importância das extensas formações carbonatadas (e.g., rodolitos, estruturas carbonatadas produzidas por algas bentônicas calcárias, ocupando uma superfície equivalente à Grande Barreira de Corais da Austrália, Fig. 3) existentes na plataforma continental brasileira até 150 m de profundidade. Estas formações são consideradas como a maior área de calcificação do oceano Atlântico Sudoeste, e estão ameaçadas pela diminuição da saturação de íons carbonato (CO_3^{2-}) no oceano, decorrente da acidificação dos oceanos⁴⁴.

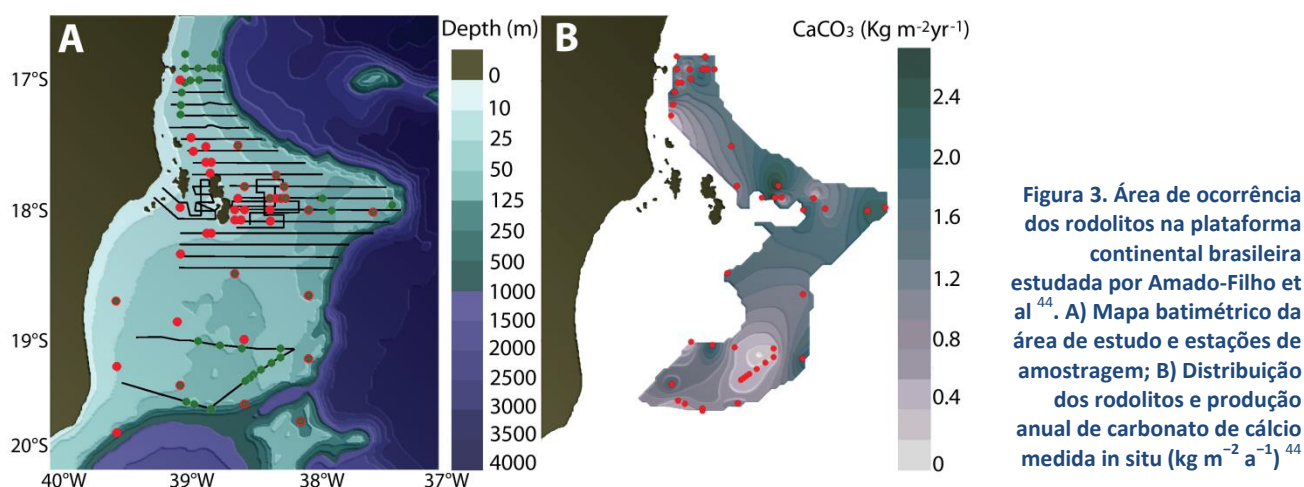


Figura 3. Área de ocorrência dos rodolitos na plataforma continental brasileira estudada por Amado-Filho et al.⁴⁴. A) Mapa batimétrico da área de estudo e estações de amostragem; B) Distribuição dos rodolitos e produção anual de carbonato de cálcio medida in situ ($\text{kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)⁴⁴

Um programa nacional de estudo sobre a acidificação em zonas costeiras deve levar em conta a grande heterogeneidade de ecossistemas encontrados no litoral brasileiro: **desde a foz do rio Amazonas**, passando por manguezais, estuários, restingas, praias, baías, lagunas costeiras, recifes coralinos, bancos de rodolitos, áreas de ressurgência regional, **até os banhados do litoral sul do país.**

As discussões entre os pesquisadores durante o Workshop “*Studying Ocean Acidification and its effects in marine ecosystems*” identificou as seguintes prioridades para iniciar-se estudos sobre os efeitos da acidificação nas zonas costeiras:

- I. **Adoção de métodos padronizados e reconhecidos pela comunidade científica internacional** para a análise dos parâmetros físico-químicos associados ao sistema CO₂ na água do mar¹⁹;
 - i. pH: medido somente na escala total, utilizando soluções TRIS e de aminopiridina em água do mar como padrões para calibração de eletrodos;
 - ii. DIC (Carbono inorgânico dissolvido): analisado por detecção infravermelha ou coulometria. Sugere-se a criação de centros de análise multiusuários distribuídos pelo país, devido ao alto custo das análises;
 - iii. p(CO₂): pressão parcial de CO₂ na água deve ser medida através de equilibradores com detecção infravermelha de CO₂. Este tipo de medida já é utilizado em rotina nos grupos de pesquisa da FURG e da UESC.
 - iv. Alcalinidade total (AT): determinação da alcalinidade total por titulação de Gran modificada, utilizando um sistema automático de titulação potenciométrica. Os grupos de pesquisa que queiram trabalhar com esse parâmetro em áreas com alta concentração de matéria orgânica dissolvida devem estar atentos às prováveis interferências de ácidos húmicos e fúlvicos na alcalinidade do ecossistema e à ocorrência de redução de sulfato e reoxidação de sulfeto. Isto pode ocorrer não só em estuários, mas inclusive em experimentos (e.g., blocos de corais massivos, sedimento). Deve-se também verificar em experimentos se há consumo de NO₃⁻ sem eletroneutralidade durante assimilação pelo fitoplâncton, dependendo da fonte de nitrogênio.
- II. A médio prazo, criar um **protocolo brasileiro de análises químicas para estudos de acidificação da zona costeira e experimentos**, levando em consideração ao mesmo tempo a variabilidade dos ecossistemas de nosso litoral e baseando-se nos procedimentos padrão adotados internacionalmente^{19,20}.

3.4. Oceano aberto

Estudos realizados em áreas de oceano aberto são necessários devido a suas dimensões espaciais (escalas espaciais) e sua ampla relevância em escala global. Não há estudos brasileiros voltados para o entendimento dos processos que levam a acidificação dos oceanos. Em 2009, através da cooperação entre os governos brasileiro e sul-africano, foi realizada a primeira Comissão oceanográfica Transatlântica Brasil-África, onde foram realizadas amostragens físicas, química e biológicas numa seção latitudinal (30°S) entre o Brasil e a África. No entanto, não foram realizadas medições diretamente relacionadas ao entendimento do ciclo do carbono e acidificação dos oceanos. A repetição do cruzeiro no ano de 2011 (neste caso em 35°S),

por outro lado, mostrou avanços nesta questão, visto que realizou medições da pressão parcial do CO₂ (pCO₂) na interface ar-mar. Entretanto, como já fortemente destacado, a obtenção de apenas um parâmetro não fornece as informações necessárias para estudos de acidificação.

Os seguintes pontos são destacados para o estudo da acidificação dos oceanos em áreas de oceano aberto (i.e., águas profundas):

- I. **Realização periódica de cruzeiros oceanográficos em águas profundas:** sugere-se a linha de repetição WOCE A10 (30-35°S) como prioridade para obtenção de dados biogeoquímicos, tendo em vista os recentes cruzeiros realizados nas Comissões Transatlântica Brasil-África 2009 e 2011. E o conhecimento histórico realizado por projetos e programas internacionais. Outras trajetórias, tais como, ao longo da quebra de plataforma continental brasileira e a linha de repetição WOCE A16 no Atlântico Sul são indicadas para execução periódica. Tendo em vista as dificuldades logísticas para execução anual de tais cruzeiros oceanográficos, é sugerido períodos com intervalos de 2-3 anos para repetição dos cruzeiros. Convênios e colaborações internacionais poderiam auxiliar e devem ser firmados em âmbito internacional para a execução periódica destes cruzeiros oceanográficos.
- II. **Implantação de novas boias em regiões estratégicas:** Em adição as boias do projeto PIRATA (norte do oceano Atlântico Sul), boias de superfície com sensores de pH, pCO₂ e outros essenciais devem ser posicionadas ao longo da zona econômica exclusiva brasileira. Sugere-se a implantação de novas boias em cooperação com as equipes de pesquisa dos projetos PIRATA e PNBOIA, para a integração de sensores biogeoquímicos junto aos sensores de dados físicos e meteorológicos comumente instalados nestas boias.
- III. **Implantação de uma estação de pesquisa de monitoramento:** Para estudos do efeito da acidificação dos oceanos nos organismos e biologia das espécies, uma Estação Científica de Pesquisa deve ser instalada para utilização dos grupos de pesquisa. Esta estação serviria para realização de experimentos *in situ* e em laboratório. Tendo em vista a posição geográfica em mar aberto, o deslocamento recorrente entre o continente e a ilha e a presença de corais e outros organismos, é sugerida a Ilha da Trindade como localização para a realização de tais atividades.
- IV. **Delineamento de experimentos biológicos a serem desenvolvidos *in situ*:** Experimentos biológicos poderiam ser executados durante os cruzeiros propostos no item I acima. Assim, os navios poderiam ser utilizados como plataforma para experimentos *in situ*.
- V. **Utilização de equipamentos remotos e novas tecnologias:** A utilização de novas tecnologias devem ser incentivadas nas instituições atuantes no estudo da acidificação dos oceanos, tal como a utilização de veículos subaquáticos autônomos (e.g., gliders) acoplados com sensores de parâmetros biogeoquímicos. Ressalta-se que tais sensores ainda encontram-se em períodos experimentais pela comunidade internacional, entretanto, o uso desta tecnologia deve ser de domínio da comunidade científica brasileira a curto-médio prazo.

3.5. Outras regiões

A Floresta Amazônica é reconhecida como um patrimônio nacional e desempenha um importante papel no clima, influenciando o ciclo da água, a circulação atmosférica e o ciclo do carbono. O Rio Amazonas, um dos maiores rios do planeta, tem sua desembocadura localizada nesta região. As variações na precipitação na Amazônia e na descarga do rio foram associadas a eventos como El Niño-Oscilação Sul⁴⁵ e variações na temperatura da superfície do mar nos oceanos Pacífico e Atlântico^{46,47}. Tais variações na precipitação afetam diretamente o aporte de material terrestre no oceano, influenciando não somente o ecossistema local, mas também o ciclo de carbono regional (ver processos costeiros discutidos no item 3.3). Porém, os dados nesta área de estudo ainda são poucos e apresentam séries temporais pequenas.

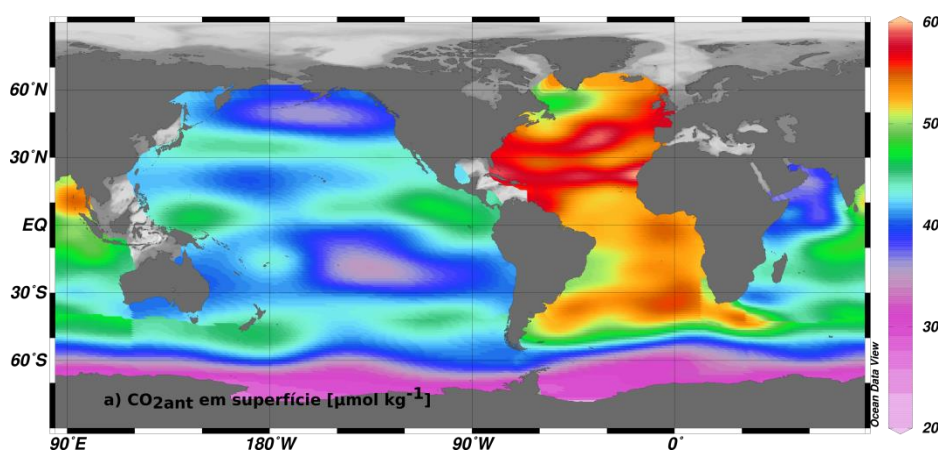


Figura 4. Distribuição das concentrações de CO_2 antropogênico ($\text{CO}_{2\text{ant}}$) na superfície do mar em $\mu\text{mol C kg}^{-1}$, segundo os dados do projeto GLODAP (Global Ocean data analysis Project,⁴⁸), disponíveis para download em <http://cdiac3.ornl.gov/las/servlets/dataset>. Note-se que as maiores concentrações de $\text{CO}_{2\text{ant}}$ em superfície são encontradas no oceano Atlântico, onde ocorrem 34% da absorção total de $\text{CO}_{2\text{ant}}$, mas cuja superfície corresponde a somente 26% do oceano global⁶. Gráfico preparado com o programa Ocean data View⁴⁹.

Além da região Amazônica, outra região que deve ser priorizada para estudos de acidificação dos oceanos é a região Antártica. O Brasil é um país que vem se destacando internacionalmente no que diz respeito aos estudos científicos desta região. O programa regular de pesquisa científica brasileira, realizado no oceano Austral e amparado pelo Programa Antártico Brasileiro (MMA, MCTi, CNPq) e pela Marinha do Brasil, deve enfatizar esta temática em seus próximos editais de fomento. O Brasil possui hoje grupos de referência internacional na temática Antártica e oceano Austral (e.g., GOAL^p), com representantes brasileiros em diversos órgãos ligados a ciência polar (e.g., SCAR^q, SOOS^r e APECS^s). Além disso, pouco se sabe sobre a dinâmica do oceano Austral atuando como fonte de absorção ou emissão de CO_2 ^{50,51}, fundamental para a correta compreensão do ciclo do carbono e dos efeitos de acidificação. Por fim, o entorno da

^p <http://www.goal.furg.br/>

^q <http://www.scar.org/>

^r <http://www.soos.aq/>

^s <http://apecs.is/>

Península Antártica, região de localização da Estação Antártica Comandante Ferraz e área principal de atuação de alguns grupos de pesquisa brasileiros, é uma das regiões do globo mais susceptíveis aos efeitos das alterações climáticas globais com significante implicações biológicas⁵². Desta forma, os estudos de acidificação dos oceanos também devem contemplar esta região, de forma análoga ao que já é desenvolvido e executado no oceano Ártico^{tu}.

4. Recursos Necessários

Tendo em vista as dificuldades inerentes as medições necessárias para os estudos de acidificação dos oceanos, foram identificados como prioridades os seguintes itens:

- ❖ Instrumentação (equipamentos e material de consumo) dos laboratórios atuais ligados ao tema da acidificação;
- ❖ Realização de um exercício nacional de intercalibração para as análises acima citadas (ver item I da seção 3.3), utilizando o material certificado de referência para a água do mar¹⁹. Este exercício deverá ser repetido periodicamente;
- ❖ Treinamento e capacitação de pessoal em continuidade para a realização das análises do sistema CO₂ na água do mar, através de cooperação a nível nacional e internacional;
- ❖ Implementação de uma base de dados oceanográfico-biogeoquímicos, de livre acesso aos cientistas (dados em linha), onde os conjuntos individuais de dados devem ser referenciados utilizando-se o sistema internacional “D.O.I. – digital object identifier”, permitindo que a fonte seja citada tal um artigo científico.

5. Desafios

A realização do workshop “*Studying Ocean Acidification and its effects on marine ecosystems*”, em dezembro de 2012, foi um marco fundamental para a integração dos grupos de pesquisa brasileiros interessados nos estudos em acidificação. Este documento identifica, da maneira mais completa possível, as necessidades da comunidade científica brasileira que estuda (e/ou tem interesse de implementar esta linha de pesquisa em seus centros) os problemas da acidificação dos oceanos.

Entendemos que este tema, não só do ponto de vista oceanográfico-biogeoquímico, mas também socioeconômico, deve ser considerado estratégico pelas agências de fomento à pesquisa brasileira em âmbitos estaduais e federal.

^t <http://www.aaos.org/ocean-acidification-arctic/>

^u <http://www.sfos.uaf.edu/oarc/>

O grupo BROA espera, **a curto prazo, a criação de uma rede nacional de pesquisadores, aberta a todos os interessados no tema de acidificação dos oceanos**. Gostaríamos que essa participação não fosse restrita somente à área de Ciências da Terra e Biológicas, mas também se alargasse para integrar pesquisadores de Ciências Humanas e Tecnológicas. Como modelo de rede ou programa de pesquisa sugere-se a utilização do programa Pesquisa Ecológica de Longa Duração (PELD), sendo o foco diretamente voltado para o assunto de acidificação dos oceanos.

A médio prazo, o grupo BROA espera que, **a nível nacional, as instalações e equipamentos para pesquisa em acidificação dos oceanos esteja operacional**, incluindo a **certificação das análises** através de exercícios de intercalibração nacional e internacional com o material certificado de referência¹⁹. Gostaríamos de frisar aqui a importância da **cooperação internacional** com equipes experimentadas e qualificadas na abordagem deste tema nas diversas áreas do conhecimento, tais como Oceanografia, Biologia, Paleoclimatologia, entre outras, para a realização desta meta.

A longo-prazo, esperamos **criar uma massa crítica de pesquisadores** treinados para trabalhar com os diferentes aspectos e problemáticas da acidificação dos oceanos, para que **as ferramentas de ação apresentadas neste documento** (e.g., identificação de zonas vulneráveis, propostas de proteção a ecossistemas vulneráveis e/ou mitigação dos impactos decorrentes da acidificação) sejam postas **em prática** para (i) o **avanço do conhecimento científico**, para a (ii) **proteção dos ecossistemas sob risco**, e para (iii) o **bem-estar das comunidades afetadas** (pesca, turismo).

O grupo BROA espera uma contrapartida do governo brasileiro, no sentido de reconhecimento do tema como prioritário, e a sua inclusão em Programas e Editais Temáticos pela Coordenação para Mar e Antártica da Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento do Ministério da Ciência e Tecnologia. Esperamos também que, em trabalho conjunto com o CNPq (por exemplo via o Plano Diretor de Tecnologias para a Informação – PDTI), possamos desenvolver uma solução para o banco de armazenamento e distribuição dos dados científicos que serão gerados através das atividades do grupo BROA. Por fim, o grupo BROA, através de seus líderes principais, encontra-se à disposição para eventuais esclarecimentos e colaboração para a melhor implementação das atividades de pesquisa ligadas à temática de acidificação dos oceanos.

6. Referências

1. Levitus, S. Warming of the world ocean, 1955–2003. *Geophysical Research Letters* **32**, (2005).
2. Gruber, N. *et al.* Towards an Integrated Observing System for Ocean Carbon and Biogeochemistry at a Time of Change. *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society* **2**, 182–196 (2010).
3. Johnson, K. *et al.* Observing Biogeochemical Cycles at Global Scales with Profiling Floats and Gliders: Prospects for a Global Array. *Oceanography* **22**, 216–225 (2009).
4. Vantrepotte, V., Loisel, H., Mélin, F., Desailly, D. & Duforêt-Gaurier, L. Global particulate matter pool temporal variability over the SeaWiFS period (1997–2007). *Geophysical Research Letters* **38**, (2011).

5. Brix, H., Gruber, N. & Keeling, C. D. Interannual variability of the upper ocean carbon cycle at station ALOHA near Hawaii. *Global Biogeochemical Cycles* **18**, (2004).
6. Gruber, N. Anthropogenic CO₂ in the Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* **12**, 165 (1998).
7. Wanninkhof, R. *et al.* Detecting anthropogenic CO₂ changes in the interior Atlantic Ocean between 1989 and 2005. *Journal of Geophysical Research* **115**, C11028 (2010).
8. Graven, H. D., Gruber, N., Key, R., Khatiwala, S. & Giraud, X. Changing controls on oceanic radiocarbon: New insights on shallow-to-deep ocean exchange and anthropogenic CO₂ uptake. *Journal of Geophysical Research* **117**, C10005 (2012).
9. Stramma, L. *et al.* Expansion of oxygen minimum zones may reduce available habitat for tropical pelagic fishes. *Nature Climate Change* **2**, 33–37 (2011).
10. Stramma, L., Visbeck, M., Brandt, P., Tanhua, T. & Wallace, D. Deoxygenation in the oxygen minimum zone of the eastern tropical North Atlantic. *Geophysical Research Letters* **36**, (2009).
11. Brandt, P. *et al.* Changes in the Ventilation of the Oxygen Minimum Zone of the Tropical North Atlantic. *Journal of Physical Oceanography* **40**, 1784–1801 ST – Changes in the Ventilation of the (2010).
12. Keeling, R. F., Körtzinger, A. & Gruber, N. Ocean Deoxygenation in a Warming World. *Annual Review of Marine Science* **2**, 199–229 (2010).
13. Biastoch, A., Böning, C. W., Schwarzkopf, F. U. & Lutjeharms, J. R. E. Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. *Nature* **462**, 495–8 (2009).
14. Van Sebille, E., Biastoch, A., Van Leeuwen, P. J. & De Ruijter, W. P. M. A weaker Agulhas Current leads to more Agulhas leakage. *Geophysical Research Letters* **36**, L03601 (2009).
15. Vianna, M. L., Menezes, V. V., Pezza, A. B. & Simmonds, I. Interactions between Hurricane Catarina (2004) and warm core rings in the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research* **115**, C07002 (2010).
16. Pezza, A. B. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. *Geophysical Research Letters* **32**, (2005).
17. Stramma, L., Johnson, G. C., Sprintall, J. & Mohrholz, V. Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science* **320**, 655–658 ST – Expanding oxygen–minimum zones in th (2008).
18. Da Silva Copertino, M. Add coastal vegetation to the climate critical list. *Nature* **473**, 255 (2011).
19. Dickson, A. ., Sabine, C. L. & Christian, J. R. (Eds. . *Guide to best practices for ocean CO₂ measurements*. 191 (2007).at <http://cdiac.ornl.gov/oceans/Handbook_2007.html>
20. Riebesell, U., Fabry, V. J., Hansson, L. & Gattuso, J.-P. (Eds. . *Guide to best practices for ocean acidification research and data reporting*. 260 (Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2010).
21. Wheeler, A. J. *et al.* Morphology and environment of cold-water coral carbonate mounds on the NW European margin. *International Journal of Earth Sciences* **96**, 37–56 (2006).
22. Khatiwala, S., Primeau, F. & Hall, T. Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean. *Nature* **462**, 346–349 ST – Reconstruction of the history of ant (2009).
23. Lee, K. *et al.* An updated anthropogenic CO₂ inventory in the Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* **17**, (2003).
24. Feely, R. A. *et al.* Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science* **305**, 362–366 (2004).
25. Sarmiento, J. L. & Gruber, N. Sinks for Anthropogenic Carbon. *Physics Today* **55**, 30 (2002).
26. Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A. & Kleypas, J. A. Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Annual Review of Marine Science* **1**, 169–192 (2009).

27. *Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil*. (IBGE, CIRM: 2011).
28. Souza, M. F. L., Gomes, V. R., Freitas, S. S., Andrade, R. C. B. & Knoppers, B. Net Ecosystem Metabolism and Nonconservative Fluxes of Organic Matter in a Tropical Mangrove Estuary, Piauí River (NE of Brazil). *Estuaries and Coasts* **32**, 111–122 (2009).
29. Yu, J., Foster, G. L., Elderfield, H., Broecker, W. S. & Clark, E. An evaluation of benthic foraminiferal B/Ca and $\delta^{11}\text{B}$ for deep ocean carbonate ion and pH reconstructions. *Earth and Planetary Science Letters* **293**, 114–120 (2010).
30. Zachos, J. C. *et al.* Rapid acidification of the ocean during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Science* **308**, 1611–5 (2005).
31. Dexter, P. & Summerhayes, C. P. Ocean Observations - the Global Ocean Observing System (GOOS). *Troubled Waters: Ocean Science and Governance*. 161–178 (2012).
32. Pfeil, G. B., Olsen, A. & Bakker, D. C. E. Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT) V1.4. (2012).doi:10.1594/PANGAEA.767698
33. Pfeil, B. *et al.* A uniform, quality controlled Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth System Science Data Discussions* **5**, 735–780 (2012).
34. Chen, C.-T. A. & Borges, A. V Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO₂. *Deep-sea Research Part II-topical Studies In Oceanography* **56**, 578–590 (2009).
35. Borges, A. V. & Abril, G. Carbon Dioxide and Methane Dynamics in Estuaries. *Treatise on Estuarine and Coastal Science* 119–161 (2011).doi:10.1016/B978-0-12-374711-2.00504-0
36. Cotrim da Cunha, L., Buitenhuis, E. T., Le Quéré, C., Giraud, X. & Ludwig, W. Potential impact of changes in river nutrient supply on global ocean biogeochemistry. *Global Biogeochemical Cycles* **21**, (2007).
37. Tsunogai, S., Watanabe, S. & Sato, T. Is there a “continental shelf pump” for the absorption of atmospheric CO₂? *Tellus B* **51**, 701–712 (1999).
38. Borges, A. V Do we have enough pieces of the jigsaw to integrate CO₂ fluxes in the coastal ocean? *Estuaries* **28**, 3–27 (2005).
39. Ovalle, A. R. C., Rezende, C. E., Lacerda, L. D. & Silva, C. A. R. Factors affecting the hydrochemistry of a mangrove tidal creek, Sepetiba Bay, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **31**, 639–650 (1990).
40. Borges, A. V, Delille, B. & Frankignoulle, M. Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean: Diversity of ecosystems counts. *Geophysical Research Letters* **32**, 14601 (2005).
41. Ovalle, A. R. C., Rezende, C. E., Carvalho, C. E. V., Jennerjahn, T. C. & Ittekkot, V. Biogeochemical characteristics of coastal waters adjacent to small river–mangrove systems, East Brazil. *Geo-Marine Letters* **19**, 179–185 (1999).
42. Longhini, C. M., Silva, A. M. & Souza, M. F. L. Net ecosystem metabolism, calcification and CO₂ fluxes on a reef flat in Northeastern Brazil. *Biogeochemistry* **submitted**,
43. Gonçalves Ito, R., Schneider, B. & Thomas, H. Distribution of surface fCO₂ and air–sea fluxes in the Southwestern subtropical Atlantic and adjacent continental shelf. *Journal of Marine Systems* **56**, 227–242 (2005).
44. Amado-Filho, G. M. *et al.* Rhodolith beds are major CaCO₃ bio-factories in the tropical South West Atlantic. *PLoS one* **7**, e35171 (2012).
45. Marengo, J. A. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International Journal of Climatology* **12**, 853–863 (1992).
46. Nobre, P. & Strukla, J. Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate* **9**, 2464–2479 (1996).
47. Marengo, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology* **78**, (2004).

48. Key, R. M. *et al.* A global ocean carbon climatology: Results from Global Data Analysis Project (GLODAP). *Global Biogeochemical Cycles* **18**, (2004).
49. Schlitzer, R. Ocean Data View. (2012).at <<http://odv.awi.de>>
50. Le Quéré, C. *et al.* Saturation of the southern ocean CO₂ sink due to recent climate change. *Science* **316**, 1735–8 (2007).
51. Le Quéré, C. *et al.* Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience* **2**, 831–836 (2009).
52. Meredith, M. P. & King, J. C. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters* **32**, (2005).
53. Hood, M., Broadgate, W., Urban, E. & Gaffney, O. ACIDIFICAÇÃO OCEÂNICA Sumário para formuladores de políticas públicas - Segundo Simpósio sobre oceanos em um mundo com elevado CO₂. 8 (www.ocean-acidification.net: 2009).at <www.ocean-acidification.net>
54. Orr, J. C. Recent and Future Changes in Ocean Carbonate Chemistry. *Ocean Acidification* (2011).