



MECANISMOS DE FERTILIZAÇÃO INFERIDOS ATRAVÉS DO REGISTRO DE COCOLITOFORÍDEOS DURANTE O QUATERNÁRIO TARDIO NA MARGEM CONTINENTAL SUL-BRASILEIRA

JULIANA DE FREITAS GONÇALVES & ADRIANA LEONHARDT
Programa de Pós-Graduação em Oceanologia, Universidade Federal do Rio Grande, Cx. P. 474,
Av. Itália, km 8, 96201-900, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil.
goncalvesjuliana.f@gmail.com (autora correspondente), *adriana.leonhardt@yahoo.com.br*

ABSTRACT – Mechanisms of fertilization inferred from the coccolithophorid record during the Late Quaternary in the southern Brazilian Continental Margin. This study aimed to understand which fertilization mechanisms are preponderant over oceanic primary productivity and its relationship with remarkable climatic events of the Late Quaternary in the south of the Brazilian Continental Margin. The investigation was carried out through geochemical and coccolithophorid analyzes in the SIS188 marine core, recovered from the Pelotas Basin slope at 1,514 m water depth. The record shows that productivity was related to insolation (with a predominance of the precession cycle) and atmospheric processes that influence ocean dynamics. During the glacial period (MIS 3 and 2), the highest productivity intervals were associated with the expansion of the upwelling system in the Santa Marta Cape region, driven by the northeast winds. However, the interval of greatest productivity recorded in the core is the initial Holocene, when the upwelling was attenuated. This substantial increase in productivity is attributed to lagging processes resulting from the decrease in sea level that occurred during the Last Glacial Maximum.

Keywords: productivity, Pelotas Basin, upwelling, Quaternary, coccolithophorids.

RESUMO – Este estudo teve como objetivo compreender quais mecanismos de fertilização são preponderantes sobre a produtividade primária oceânica e a sua relação com eventos climáticos marcantes do Quaternário Tardio no sul da Margem Continental Brasileira. A investigação foi realizada através de análises geoquímicas e de coccolitoforídeos no testemunho marinho SIS188, recuperado no talude da Bacia de Pelotas a uma profundidade de 1514 m. O registro demonstra que a produtividade esteve relacionada à insolação (com predominância do ciclo da precessão) e aos processos atmosféricos que influenciam a dinâmica oceânica. Durante o período glacial (EIM 3 e 2), os intervalos de maior produtividade estiveram associados à expansão do sistema de ressurgência na região do Cabo de Santa Marta, impulsionado pelos ventos de nordeste. Entretanto, o intervalo de maior produtividade registrado no testemunho é o Holoceno inicial, quando a ressurgência esteve atenuada. Este aumento substancial da produtividade é atribuído a processos retardatários resultantes da diminuição do nível do mar ocorrida durante o Último Máximo Glacial.

Palavras-chave: produtividade, Bacia de Pelotas, ressurgência, Quaternário, coccolitoforídeos.

INTRODUÇÃO

O registro de mudanças pretéritas no ambiente marinho, bem como suas interações e os mecanismos que as conduzem, são importantes para projetar alterações ambientais futuras. As zonas de ressurgência das margens leste dos oceanos têm sido extensivamente estudadas devido a sua magnitude e importância para o sistema climático, sendo ainda mais fortes durante períodos glaciais, devido à intensificação dos ventos alísios (Matsuzaki *et al.*, 2011). No entanto, a borda oeste nos oceanos também apresenta sistemas de ressurgência que são importantes para a produtividade regional, embora os estudos conduzidos para essa região ainda sejam um pouco escassos. No Atlântico Sudoeste, há um sistema de ressurgência na margem continental do Brasil que abrange a região entre 20° e

28° S (Campos *et al.*, 2000; Gyllencreutz *et al.*, 2010). Nessa área, a Corrente do Brasil (CB) interage com a topografia local e sofre instabilidade pela mudança brusca na orientação da plataforma continental, podendo resultar em ressurgência de águas intermediárias (Campos *et al.*, 2000).

Além da intensidade da ressurgência costeira ou de quebra de plataforma, outros fatores podem influenciar na fertilização das águas marinhas superficiais na região de estudo. Sobre a plataforma da margem continental sul-brasileira, a Pluma do Rio da Prata e a drenagem continental são fatores importantes para o aumento do aporte de nutriente (González-Silveira *et al.*, 2006). A Pluma do Rio da Prata pode ter alcançado áreas distintas das atingidas atualmente, em intervalos glaciais e/ou de redução do nível do mar. Outro fator a ser considerado é a fertilização do oceano a partir do influxo de poeira carregada

para a área de estudo pelos ventos de sudoeste gerados pelo anticiclone do Pacífico Sul em intervalos glaciais (Lopes *et al.*, 2021).

Decifrar a variabilidade natural da produtividade em escala de tempo orbital a milenar, através de registros paleoclimáticos e paleoceanográficos de alta resolução, poderá ajudar a revelar a modulação ou ligação de suas variações a eventos climáticos conhecidos globalmente e à insolação. Vários trabalhos relacionam a produtividade a eventos em escala milenar na Margem Continental Brasileira, entretanto a grande maioria foi realizada nas Bacias de Campos e Santos (*e.g.*, Leonhardt *et al.*, 2013; Costa *et al.*, 2016; Lessa *et al.*, 2016). Na Bacia de Pelotas, os trabalhos ainda são incipientes e a maioria realizada através do estudo das associações de foraminíferos planctônicos e análises geoquímicas em carapaças de foraminíferos bentônicos ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$) (*e.g.*, Pereira *et al.*, 2018). Raros são os estudos realizados sobre a paleoprodutividade utilizando produtores primários (*e.g.*, cocolitoforídeos) como *proxies*.

Os cocolitoforídeos são bons indicadores de produtividade por serem organismos do fitoplâncton que ocorrem abundantemente e estão amplamente distribuídos nos oceanos do mundo. Como são organismos fotossintetizantes, necessitam habitar a zona fótica, sendo que a maioria das espécies pode ser encontrada nos primeiros 80 m da coluna d'água (Beaufort *et al.*, 2010). Entretanto, essa fração da zona fótica é muitas vezes depletada em nutrientes, e a produtividade é maior imediatamente acima da nutriclina. Quando o oceano está fortemente estratificado, a nutriclina se aprofunda na zona fótica e a produtividade diminui. Algumas espécies, como *Florisphaera profunda*, estão adaptadas a ambientes com menor incidência de luz e são comumente encontradas entre 80 e 180 m de profundidade (Okada & Honjo, 1973). Dessa maneira, a abundância relativa de *F. profunda* serve para monitorar a profundidade da nutriclina (Molfino & McIntyre, 1990). Outras espécies possuem afinidades com determinadas características ambientais específicas, tornando-se boas indicadoras de massas de água ou processos de ressurgência, por exemplo.

O presente estudo tem como objetivo compreender quais mecanismos de fertilização são preponderantes sobre a produtividade primária na Margem Continental Sul-Brasileira e a sua relação com eventos climáticos marcantes do Quaternário Tardio.

CONTEXTO OCEANOGRÁFICO E ATMOSFÉRICO REGIONAL ATUAL

A região de estudo é fortemente influenciada pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), o sistema de alta pressão localizado a aproximadamente 30°S, associado à Célula de Hadley sobre o Oceano Atlântico (Gomes & Freitas, 2018). Durante o inverno, as temperaturas são menores sobre os continentes, causando o deslocamento da ASAS em direção à América do Sul e há o predomínio dos ventos de sudoeste na região de estudo. No verão, as temperaturas sobre os continentes são maiores, e o anticiclone localiza-se sobre o

Oceano, predominando os ventos nordeste (Bastos & Ferreira, 2008). Além da ASAS, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é uma característica climatológica importante do verão austral na América do Sul. É definida como uma banda convectiva alongada, originada na Bacia Amazônica, que se estende em direção ao sudeste do Brasil podendo avançar sobre o Oceano Atlântico Sudoeste Subtropical (Carvalho *et al.*, 2004). A ZCAS e a atividade convectiva na Bacia Amazônica são as principais componentes do sistema de monção da América do Sul (Jones & Carvalho, 2002), regulando a estação chuvosa sobre a área de estudo.

O sul da Margem Continental Brasileira, onde o testemunho SIS188 foi coletado, está sob a influência da CB, originada do ramo meridional da Corrente Sul Equatorial, fechando a porção oeste do Giro Subtropical (Peterson & Stramma, 1991). A CB é responsável pelo transporte de calor e sal desde os trópicos para altas latitudes no Atlântico Sudoeste, transportando as águas quentes e salinas da Água Tropical (AT) e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), mais fria e com maior concentração de nutrientes. A massa d'água que banha a região do talude na qual o testemunho SIS188 foi coletado é a Água Circumpolar Superior (ACS). Essa massa de água é reconhecida por um máximo de fosfato e sílica e um mínimo de temperatura em uma profundidade de 1000 m na região equatorial, onde ocorre o seu limite máximo ao norte (Stramma & England, 1999). Apesar de fluir do Atlântico Sul para o Atlântico Norte, assim como a Água Intermediária Antártica (AIA) (que se encontra acima da ACS), essas duas massas de água possuem regiões de origem distintas. O mínimo de oxigênio associado à ACS está presente no Atlântico Sul, em forma de cunha, bordejando o máximo de oxigênio da AIA (Stramma & England 1999). Comparada à Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), que está abaixo, a ACS é mais rica em nutrientes, porém mais pobre em oxigênio.

O Cabo de Santa Marta (29° S), próximo ao testemunho SIS188, é importante por causa da alta produtividade primária que caracteriza as águas da região. A ressurgência na região do Cabo de Santa Marta resulta da sinergia entre a ressurgência de quebra de plataforma e a circulação sobre a plataforma (ressurgência costeira), que é induzida pelos ventos nordeste. Esses dois processos são modulados por mudanças na orientação e pela largura da plataforma (Campos *et al.*, 2013). Uma mudança repentina na orientação da plataforma, como ocorre no Cabo de Santa Marta, resulta em instabilidade na CB gerando vórtices ciclônicos e fluxo vertical ascendente da ACAS, que fertiliza as águas superficiais na área de estudo (Brandini *et al.*, 2014).

MATERIAL E MÉTODOS

O testemunho sedimentar SIS188 foi recuperado do talude da Bacia de Pelotas (-29.221286°; -47.283805°), sul da Margem Continental Brasileira, sob 1514 m de profundidade (Figura 1). O testemunho consiste majoritariamente de lamas hemipelágicas levemente carbonáticas, com porções menores de lama levemente arenosa e camadas ricas em

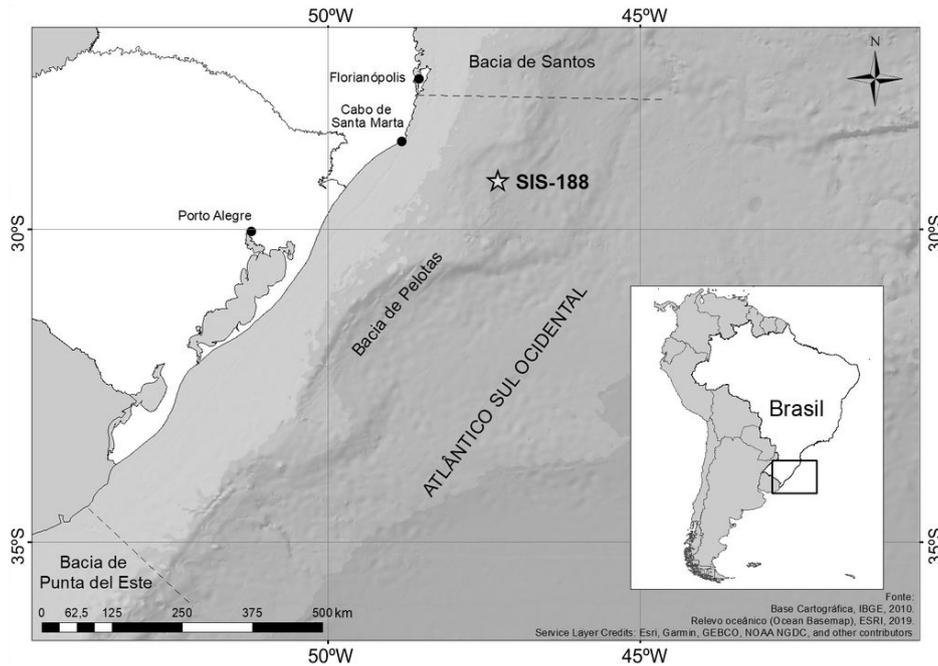


Figura 1. Localização do testemunho SIS188 na Baía de Pelotas, sul da Margem Continental Brasileira.

Figure 1. Location of SIS188 core at Pelotas Basin, south of the Brazilian Continental Margin.

matéria orgânica (Figura 2B). Foram analisados os 365 cm do testemunho. As amostras foram retiradas a cada 2 cm e peneiradas em malhas de 63 μm e 125 μm . Todas as amostras foram secas em estufa a 50°C para confecção das lâminas para cocolitoforídeos.

O modelo de idade foi estabelecido correlacionando os registros de isótopos de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) nas testas do foraminífero planctônico *Globigerinoides ruber*, que reflete a composição isotópica da água no topo da camada de mistura (Ravelo & Fairbanks, 1992), com a curva LS16 para o Atlântico Sul de Lisiecki & Stern (2016) (Figura 3). As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Espectrometria de Massa da Universidade da Califórnia, EUA. Quatro datações por radiocarbono foram realizadas nas testas do foraminífero planctônico *G. ruber* no Laboratório de Radiocarbono da Universidade Federal Fluminense (LACUFF). As datações por radiocarbono foram corrigidas para o efeito reservatório ($\Delta R = 54.0 \pm 42.0$) de acordo com o Marine Reservoir Correction Database (De Masi, 1999; Angulo *et al.*, 2005; Alves *et al.*, 2015). As idades foram calibradas de acordo com a curva Marine13 (Reimer *et al.*, 2013), usando a probabilidade mediana, com o auxílio do *Calib Radiocarbon Program*, versão 7.1 (Stuiver & Reimer, 1993). As datações foram utilizadas para controlar a cronologia entre ambas as curvas. Finalmente, o modelo de idade foi construído através da interpolação linear entre os pontos de controle, usando o *software Analyseries 2.0* (Paillard *et al.*, 1996) e foi parcialmente apresentado por Duque-Castaño *et al.* (2019).

Com a finalidade de estimar a abundância absoluta de cocólitos por grama de sedimento seco, as amostras foram preparadas usando o método de dissolução e pipetagem

descrito por (Koch & Young, 2007). Após secagem em estufa das amostras, 0,1–0,2 g da fração fina (< 63 μm) foram diluídas em 10 ml de água destilada e posteriormente levadas ao ultrassom para melhor desagregação. As amostras foram diluídas mais uma vez em 5 ml de água destilada e 500 μl dessa segunda solução foram pipetadas em uma lamínula sobre uma placa aquecedora plana, para que pudesse secar rapidamente. As lamínulas foram montadas sobre a lâmina utilizando bálsamo do Canadá. O uso de uma amostra com peso conhecido sobre uma área conhecida permite a contagem de cocólitos por campo visual ser convertida em números de espécimes por grama de sedimento.

As contagens de cocólitos foram realizadas utilizando um microscópio de luz polarizada com magnificação de 1000x. Em cada amostra, foram contados pelo menos 500 cocólitos. A identificação das espécies de cocolitoforídeos foi baseada em Antunes (2007) e em Young *et al.* (2020).

O número de cocólitos por grama de sedimento foi calculado de acordo com Koch & Young (2007):

$$\text{Número de espécimes por grama de sedimento} = \frac{A \cdot N}{f \cdot n \cdot W} \quad (1)$$

onde A é a área da lamínula; f é a área de um campo visual; n é o número de campos visuais analisados para quantificar ao menos 500 cocólitos; W corresponde ao peso do sedimento sobre a lamínula; e N é o número de cocólitos contados.

A Razão N (Flores *et al.*, 2000) foi utilizada para estimar a paleoprodutividade e monitorar a variação da profundidade da nutriclina. Consiste em uma razão entre a abundância relativa de espécies oportunistas, que se beneficiam de um

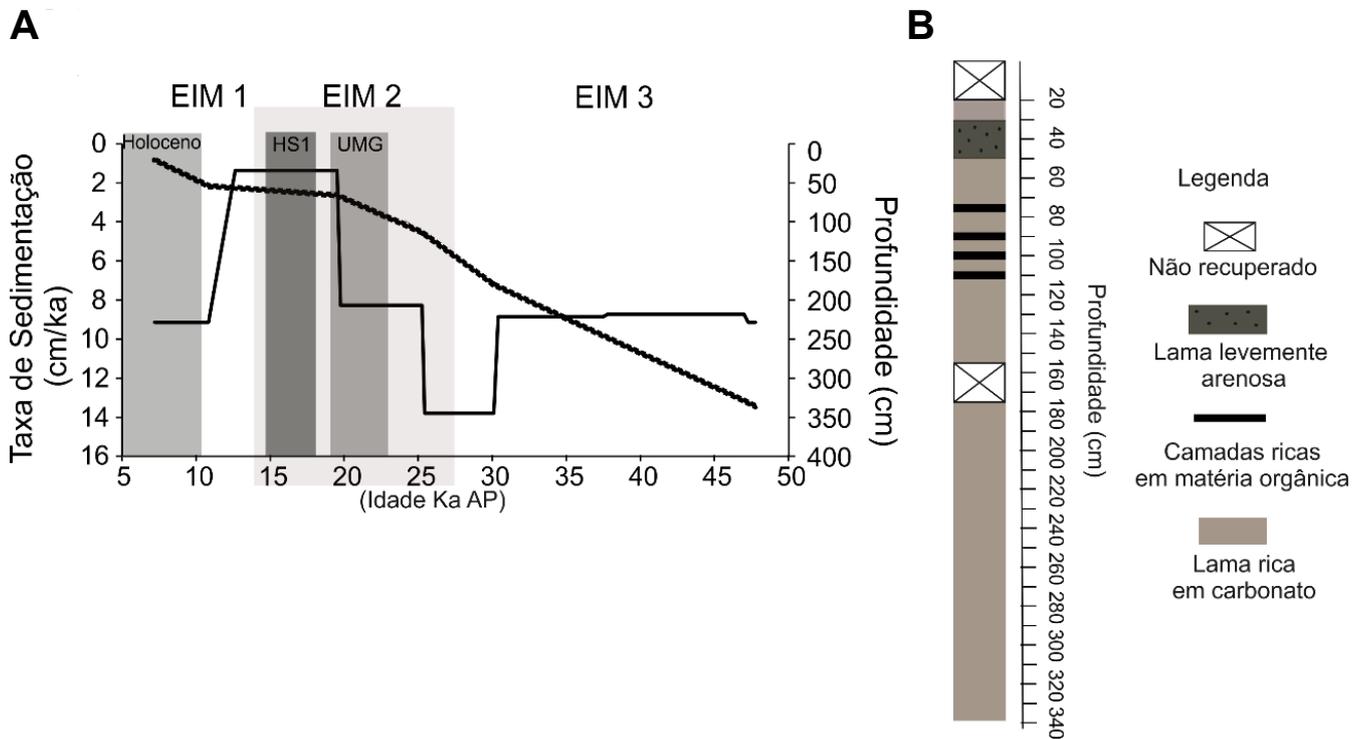


Figura 2. A, modelo de idade-profundidade e taxas de sedimentação do testemunho SIS188. A linha pontilhada indica a variação da idade de acordo com a profundidade e a linha preta indica a taxa de sedimentação. B, litologia do testemunho SIS 188. **Abreviações:** EIM, Estágio Isotópico Marinho; HS1, Heinrich Stadial 1; UMG, Último Máximo Glacial; Ka (AP), mil anos antes do presente.

Figure 2. A, Age-depth model and sedimentation rates of core SIS188. The dotted line represents age variation according to depth. B, lithology of core SIS 188. **Abbreviations:** EIM, Marine Isotope Stage; HS1, Heinrich Stadial 1; UMG, Last Glacial Maximum; Holoceno, Holocene; Ka (AP), a thousand years before present.

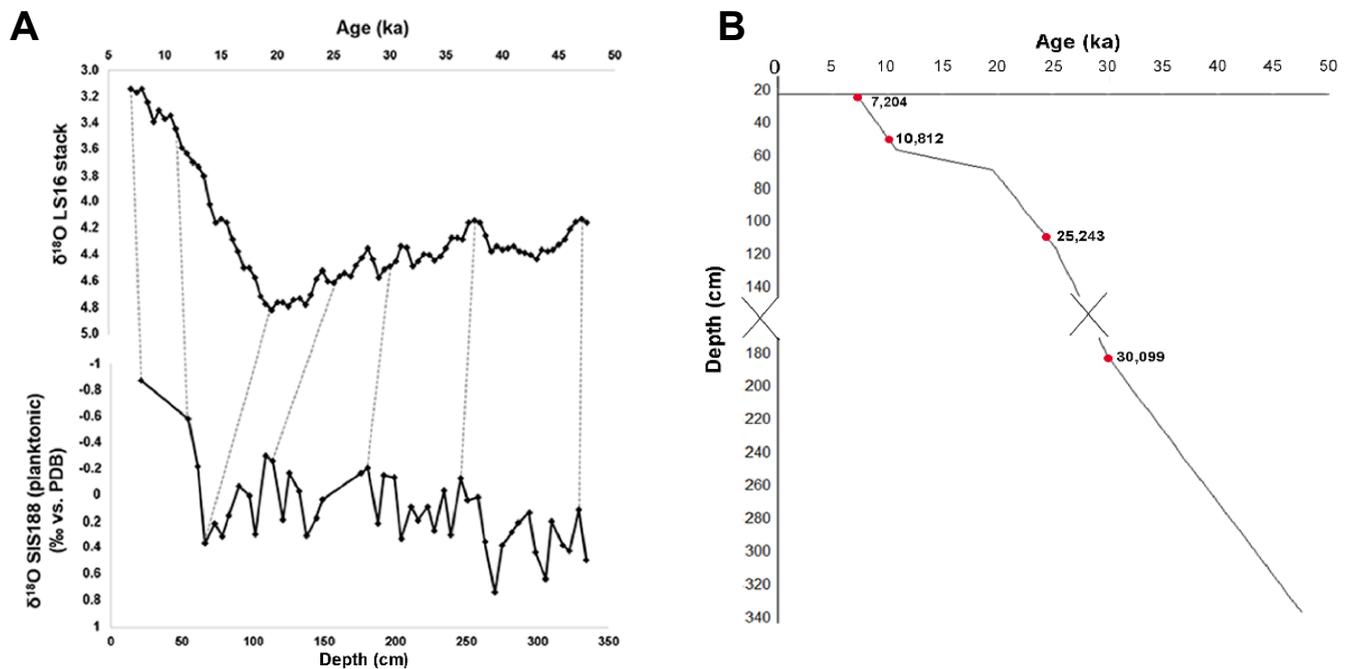


Figura 3. Modelo de idade. A, correlação entre a curva Atlântico Sul Intermediária de Lisiecki & Stern (2016) e os dados isotópicos de oxigênio do testemunho SIS188. B, relação entre idade e profundidade no SIS188. Os pontos vermelhos indicam as profundidades onde as idades de radiocarbono foram obtidas (Bottezini *et al.*, 2021).

Figure 3. Age model. A, correlation between the Lisiecki & Stern (2016) Intermediate South Atlantic curve and the oxygen-isotope data from SIS188. B, relationship between age and depth in SIS188. The red points indicate the depths where radiocarbon ages were obtained (Bottezini *et al.*, 2021).

aumento na disponibilidade de nutrientes na camada fótica (*Gephyrocapsa* spp. e *Emiliana huxleyi*), e *Florisphaera profunda*, habitante da zona eufótica inferior, que se beneficia de uma nutriclina profunda.

$$RN = \frac{\% E. hux \quad \% Gephyrocapsa \text{ spp.}}{\% E. huxleyi + \% Gephyrocapsa \text{ spp.} + \% F. profunda} \quad (2)$$

Foram realizadas observações sobre o estado de preservação dos cocólitos em cada amostra. Cinco categorias foram distinguidas utilizando uma escala similar à de Flores *et al.* (2003). Muito boa preservação (categoria 5) implica pouca ou nenhuma evidência de dissolução de carbonato, com as características morfológicas dos cocólitos bem preservadas; boa preservação (categoria 4) é definida por alto conteúdo de carbonato com pouca fragmentação e características diagnósticas preservadas; preservação moderada (categoria 3) é caracterizada por alguma dissolução, mas com quase todos os espécimes identificados a nível de espécie; preservação pobre (categoria 2) possui dissolução severa e fragmentação, com muitos espécimes não distinguidos; e amostras estéreis (categoria 1), com muito pouco ou nenhum conteúdo de carbonato.

O conteúdo de CaCO_3 foi determinado através do método de perda de massa por digestão ácida (Molnia, 1974), na qual as amostras carbonatadas com pesos conhecidos foram atacadas por ácido clorídrico (HCl) a uma concentração de 10%. O conteúdo de carbonato é representado pela diferença no peso antes e depois de sua remoção pelo ataque ácido.

O carbono orgânico total (COT) nos sedimentos foi medido através do método de oxidação catalítica por combustão em um analisador Shimadzu para *TOC-L Series SSM-5000^o*, no Laboratório de Análises Geoquímicas da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS). Cerca de 30 mg de sedimento seco foram aquecidos a 900°C em um ambiente rico em oxigênio, convertendo carbono a CO_2 , o qual é detectado por um analisador infravermelho de gás. Para avaliar o carbono inorgânico, as amostras foram acidificadas e oxidadas a 200°C. O CO_2 gerado nesse processo é o conteúdo de carbono inorgânico na amostra. A concentração de COT é definida subtraindo a concentração de carbono inorgânico da de carbono total.

Correlações entre as variáveis medidas no testemunho (número de cocólitos por grama de sedimentos, razão N, conteúdo de COT e CaCO_3 nos sedimentos) e a insolação mensal para 29°S ao longo do tempo (Laskar *et al.*, 2004) foram calculadas. A significância das correlações foi avaliada por autoreamostragem, com 10000 iterações, $\alpha=0,05$. As análises foram realizadas usando o software para análises estatísticas MULTIV (Pillar, 1997).

As análises espectrais de séries temporais foram realizadas no *software* PAST, versão 3.12 (Hammer *et al.*, 2001), utilizando o módulo REDFIT (Schulz & Mudelsee, 2002). O intuito das análises espectrais é buscar periodicidades que possam representar alguma forçante climática, estimando

a força do componente cíclico em todas as frequências possíveis. O módulo REDFIT permite que essa busca seja realizada sobre amostras que não apresentam um espaçamento temporal contínuo. Foi utilizada a simulação Monte Carlo e consideradas as frequências acima de 95% de significância.

RESULTADOS

O testemunho investigado compreende o período de tempo de 47,7 a 7,2 cal kyr BP (Tabela 1, Figura 3). As maiores taxas de sedimentação no testemunho ocorreram durante o EIM 3 e parte do EIM 2, até aproximadamente 20 kyr. No final do Último Máximo Glacial (UMG), há uma brusca diminuição na taxa de sedimentação, que volta a aumentar no início do EIM 1 (Figura 2A).

Amostras com as menores abundâncias de cocólitos ou mesmo desprovidas deles foram observadas principalmente durante o EIM 3. As maiores abundâncias, chegando a 115×10^8 cocólitos por grama de sedimento, foram registradas durante o Holoceno.

No total, 37 espécies e morfotipos foram identificadas, incluindo as espécies oportunistas *Emiliana huxleyi* e *Gephyrocapsa* spp. (*Gephyrocapsa* “small”, *G. oceanica* e *G. muelleriae*), e a espécie *Florisphaera profunda*. *Florisphaera profunda* dominou a associação fóssil, alcançando valores maiores que 50% em algumas amostras durante a primeira metade do EIM 3. Sua porcentagem diminuiu no fim do EIM 3 (entre 32,7 e 27,9 kyr), aumentando com o início do EIM 2 até o UMG, e apresentando várias flutuações a partir de então (Figura 4A). A segunda espécie mais abundante foi *Emiliana huxleyi*, que mostrou suas maiores abundâncias também durante o EIM 3. Sua abundância decaiu ligeiramente com o início do EIM 2, elevando-se novamente no EIM 1 (Figura 4C).

Gephyrocapsa “small” obteve alta representatividade nas amostras, apresentando seus mais altos valores de abundância relativa durante o EIM 3 (especialmente no início e no fim deste estágio) e Holoceno (Figura 4B). *Gephyrocapsa oceanica* (< 5 μm) esteve presente em todo o testemunho, mas apresentou diminuição da porcentagem durante o EIM 2; após um aumento no início do EIM 1, suas porcentagens voltam a cair no Holoceno (Figura 4D). *Gephyrocapsa oceanica* (> 5 μm) apresenta uma mudança marcante em sua curva de abundância relativa, que aumenta consideravelmente a partir do final do EIM 3 (Figura 4E). *Gephyrocapsa muelleriae* foi a espécie do gênero que apresentou a menor abundância ao longo do testemunho, demonstrando maior abundância relativa no início do EIM 3, com um aumento expressivo ao final do EIM 2/início do EIM 1 (Figura 4F).

Dentre os táxons subordinados, destacaram-se *Calcidiscus leptoporus*, *Helicosphaera* spp., *Coccolithus pelagicus* e *Umbilicosphaera* spp. *Calcidiscus leptoporus* apresentou maior abundância de aproximadamente 33 kyr BP até as amostras mais recentes do registro, com uma notável diminuição durante o Evento Heinrich 1 (HS1) e início do Holoceno (Figura 5A). *Helicosphaera* spp. também

Tabela 1. Amostras datadas por ^{14}C e calibradas no testemunho SIS188. **Abreviações:** AP, antes do presente; **Lab identificação,** identificação do laboratório.
Table 1. Samples dated by ^{14}C and calibrated in core SIS188. **Abbreviations:** AP, before present; **Lab identification,** Lab ID.

Profundidade (cm)	Espécie	Idade (^{14}C anos AP)	Erro (anos)	Idade calibrada (probabilidade mediana) (cal anos AP)	Lab Identificação
21	<i>Globigerinoides ruber</i>	6725	±31	7204 [intervalo de idade com 2-sigma (95,4% de probabilidade): 7060–7318 cal AP]	(LACUFF) 170210
54	<i>Globigerinoides ruber</i>	9921	±34	10812 [intervalo de idade com 2-sigma (95,4% de probabilidade): 10649–11015 cal AP]	(LACUFF) 170055
113.5	<i>Globigerinoides ruber</i>	21360	±59	25243 [intervalo de idade com 2-sigma (95,4% de probabilidade): 25003–25497 cal AP]	(LACUFF) 170056
180.8	<i>Globigerinoides ruber</i>	26325	±77	30099 [intervalo de idade com 2-sigma (95,4% de probabilidade): 29690–30498 cal AP]	(LACUFF) 170211

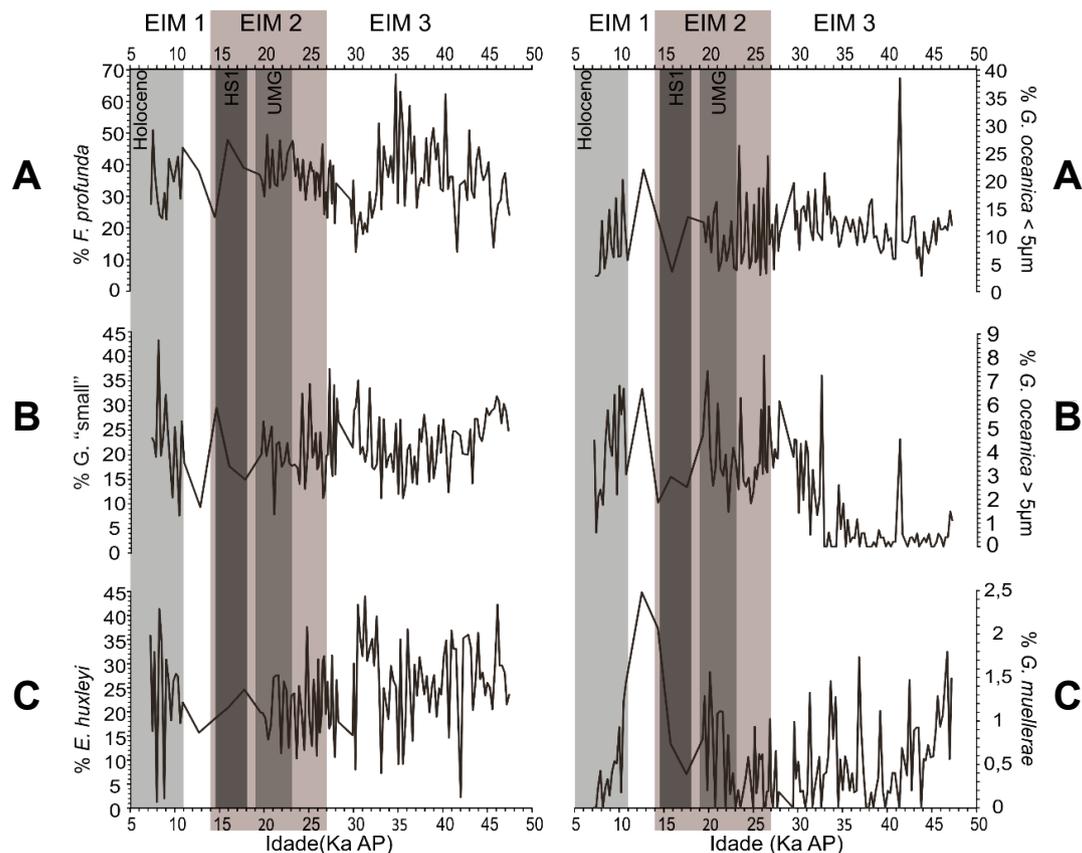


Figura 4. Abundância relativa das espécies dominantes no testemunho SIS188. **A,** *Florisphaera profunda*; **B,** *Gephyrocapsa* “small”; **C,** *Emiliana huxleyi*; **D,** *Gephyrocapsa oceanica* morfotipo <5µm; **E,** *G. oceanica* morfotipo >5µm; **F,** *G. mullerae*. **Abreviações:** EIM, Estágio Isotópico Marinho; **HS1,** Heinrich Stadial 1; **UMG,** Último Máximo Glacial; **Ka (AP),** mil anos antes do presente.

Figure 4. Relative abundance of dominant species in SIS188 core. **A,** *Florisphaera profunda*; **B,** *Gephyrocapsa* “small”; **C,** *Emiliana huxleyi*; **D,** *Gephyrocapsa oceanica* morphotype <5µm; **E,** *G. oceanica* morphotype >5µm; **F,** *G. mullerae*. **Abbreviations:** EIM, Marine Isotope Stage; **HS1,** Heinrich Stadial 1; **UMG,** Last Glacial Maximum; **Ka (AP),** a thousand years before present.

apresenta aumento de suas porcentagens a partir de 33 kyr BP, que diminuem a partir de 23 kyr BP (Figura 5B). *Coccolithus pelagicus* apresenta baixas porcentagens em todo o testemunho (raramente ultrapassando 1%), com ocorrência constante durante o UMG (Figura 5C). Já a abundância relativa de *Umbilicosphaera* spp. apresenta alguns picos, como ao redor de 45 e de 37 kyr (EIM 3), entre 27 e 20 kyr (EIM 2), ao redor de 16 kyr (HS1) e durante o Holoceno (Figura 5D).

A curva da razão N indica alguns intervalos de maior paleoprodutividade, como ao redor de 47,5–39 kyr, 33,3–29,9 kyr e 10,4–7,9 kyr e valores ligeiramente menores durante o EIM 2 (Figura 6B). Diferentemente, a curva de número de cocólitos por grama de sedimento apresenta uma nítida tendência de elevação do final do EIM 3 em direção ao Holoceno (Figura 6C). A mesma tendência é demonstrada nas curvas de COT (Figura 6D) e de conteúdo de CaCO_3 (Figura 6A) nos sedimentos. A preservação dos cocólitos nas

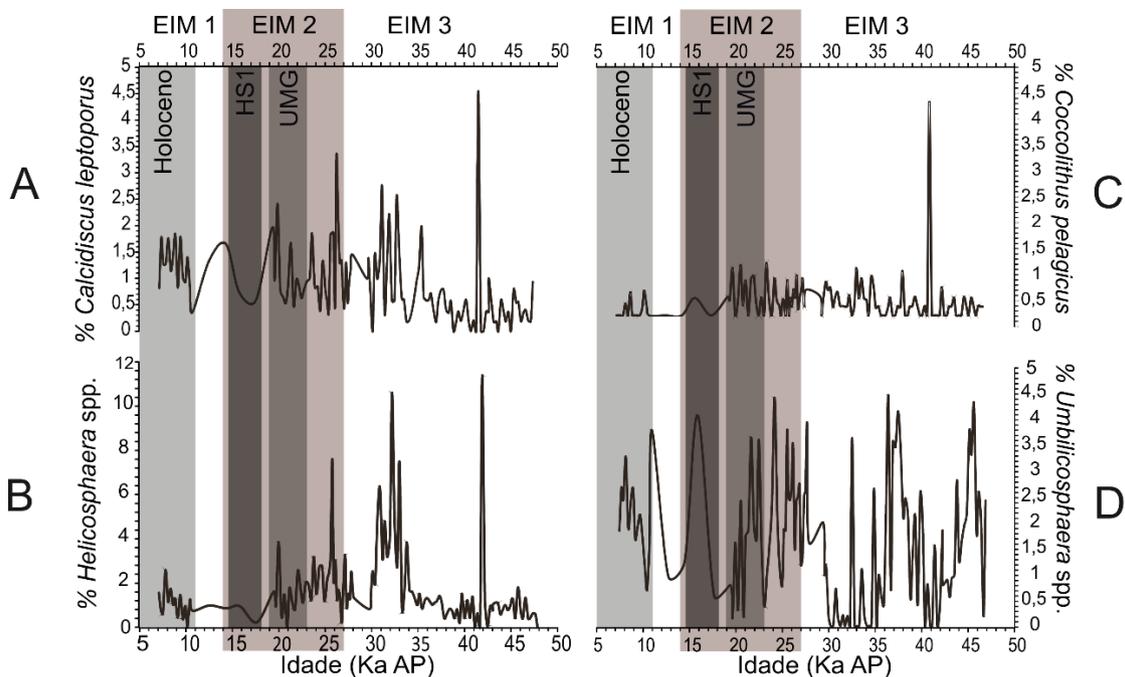


Figura 5. Abundância relativa das espécies subordinadas no testemunho SIS188. **A**, *Calcidiscus leptoporus*; **B**, *Helicosphaera* spp.; **C**, *Coccolithus pelagicus*; **D**, *Umbilicosphaera* spp. **Abreviações:** EIM, Estágio Isotópico Marinho; HS1, Heinrich Stadial 1; UMG, Último Máximo Glacial; Ka (AP), mil anos antes do presente.

Figure 5. Relative abundance of subordinate species in SIS188 core. **A**, *Calcidiscus leptoporus*; **B**, *Helicosphaera* spp.; **C**, *Coccolithus pelagicus*; **D**, *Umbilicosphaera* spp. **Abbreviations:** EIM, Marine Isotope Stage; HS1, Heinrich Stadial 1; UMG, Last Glacial Maximum; Ka (AP), a thousand years before present.

amostras se apresentou de moderada a boa, em geral, com as amostras com preservação muito boa apenas durante o EIM 3 e o EIM 1 (Figura 6E).

As variáveis Razão N, número de cocólitos e conteúdo de CaCO_3 e de COT nos sedimentos apresentam um padrão de correlação com a insolação muito similar (Tabela 2): em geral, as correlações são positivas durante toda a primavera e início do verão e negativas do final do verão ao início do outono austral. A maior parte do outono e o inverno não apresentam correlações significativas entre estas variáveis e a insolação.

A série temporal do número de cocólitos por grama de sedimento apresentou uma ciclicidade significativa de 18,65 kyr (Figura 7A). A flutuação do teor de CaCO_3 nos sedimentos apresentou ciclicidade de 18,57 kyr (Figura 7B). As séries temporais da Razão N e do conteúdo de TOC nos sedimentos não apresentaram ciclicidades significativas.

DISCUSSÃO

As análises espectrais das séries temporais dos números de cocólitos e do teor de CaCO_3 nos sedimentos demonstraram uma periodicidade significativa de aproximadamente 18 mil anos (Figura 7), que pode ser relacionada com o ciclo de precessão (Dansgaard *et al.*, 1993). A série temporal de COT nos sedimentos não apresentou nenhuma ciclicidade significativa, possivelmente porque sua resolução temporal é menor, fazendo com que a ciclicidade da precessão não

fosse percebida na análise. A influência do ciclo de precessão da órbita da Terra sobre o registro do testemunho SIS188 sugere que a produtividade na área de estudo é influenciada pela insolação.

Os sistemas de ressurgência são conduzidos pela ação dos ventos, que têm forte vínculo com a insolação. Mudanças na insolação em determinada latitude ao longo do tempo têm influência sobre os processos atmosféricos, podendo apresentar um papel importante na intensificação ou enfraquecimento dos sistemas de ressurgência, que impulsiona a produtividade. Atualmente, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) alcança sua posição mais ao sul (3°N) entre janeiro e março, enfraquecendo o transporte de calor do Hemisfério Sul para o Norte durante o verão austral. Por consequência, esse também é o período no qual a ASAS se encontra deslocada para sul. Em função da migração sazonal da ASAS, os ventos de nordeste predominam nas regiões sul e sudeste do Brasil durante o verão, intensificando a ressurgência (Palma & Matano, 2009), e fazendo com que a pluma do Rio da Prata fique mais contida ao sul. Durante o inverno, há a predominância dos ventos de sudoeste na região, que dirigem a pluma até a latitude da região de estudo (Piola *et al.*, 2005), causando estratificação das águas e impedindo a ressurgência.

Este cenário pode ser extrapolado para os intervalos de maior insolação no passado. Além da ciclicidade associada à precessão encontrada no registro, a correlação entre as variáveis Razão N, número de cocólitos e conteúdo de CaCO_3

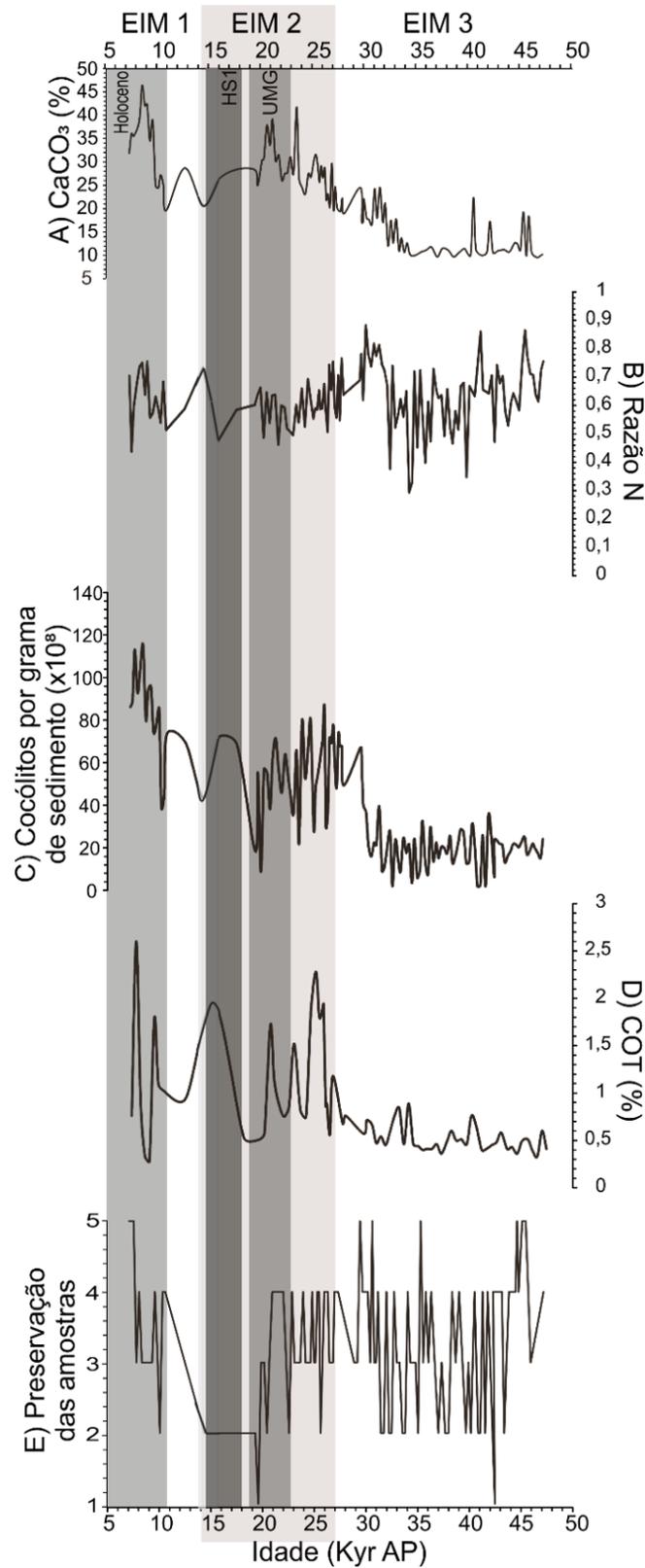
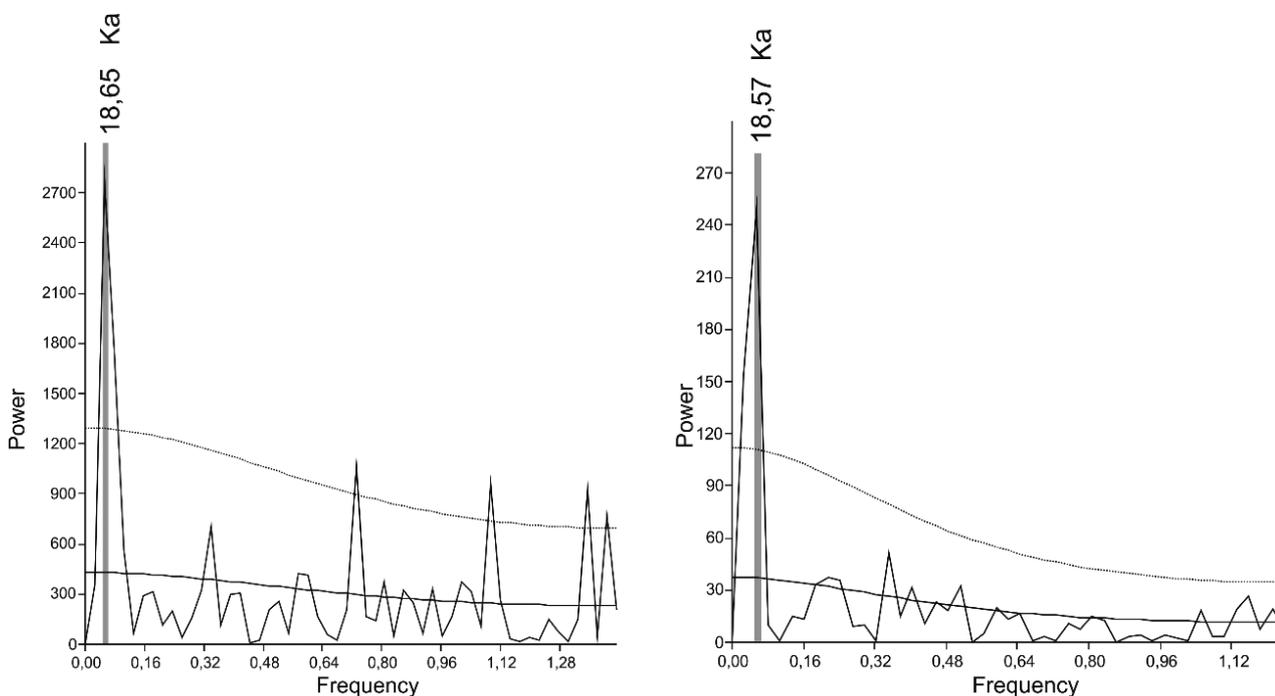


Figura 6. Proxies de produtividade. **A**, conteúdo de carbonato nos sedimentos; **B**, Razão N; **C**, número de cocólitos por grama de sedimento; **D**, conteúdo de Carbono Orgânico Total nos sedimentos; **E**, preservação dos cocólitos nas amostras. **Abreviações:** EIM, Estágio Isotópico Marinho; HS1, Heinrich Stadial 1; UMG, Último Máximo Glacial; Ka (AP), mil anos antes do presente.

Figure 6. Productivity proxies. **A**, sediments carbonate content; **B**, N ratio; **C**, coccoliths number per gram of sediment; **D**, sediments Total Organic Carbon content; **E**, coccolith preservation on samples. **Abbreviations:** EIM, Marine Isotope Stage; HS1, Heinrich Stadial 1; UMG, Last Glacial Maximum; Ka (AP), a thousand years before present.

Tabela 2. Correlação das variáveis com as curvas mensais de insolação a 29°S. **Abreviação:** COT, carbono orgânico total.**Table 2.** Correlation between variables and monthly insolation curve at 29°S. **Abbreviation:** COT, total organic carbon.

Insolação (mês)		COT	Número de cocólitos	Razão N	CaCO ₃
21feb-20mar	Correlação	-0.28594	-0.30711	-0.19735	-0.23535
	p-valor	0.0234	0.001	0.0412	0.0015
21mar-20apr	Correlação	-0.39521	-0.40689	-0.24109	-0.42279
	p-valor	0.0012	0.0001	0.0126	0.0015
21sep-20oct	Correlação	0.25675	0.29372	0.23359	Não significativa
	p-valor	0.0401	0.0021	0.0148	
21oct-20nov	Correlação	0.41143	0.41	0.20511	0.46514
	p-valor	0.0007	0.0001	0.0312	0.0005
21nov-20dec	Correlação	0.28077	0.25278	Não significativa	0.041614
	p-valor	0.02566	0.0073		0.0013
21dec-20jan	Correlação	Não	Não	Não significativa	0.22385
	p-valor	significativa	significativa		0.0975

**Figura 7.** Análises espectrais. **A,** análise espectral na série temporal de número de cocólitos por grama de sedimento; **B,** análise espectral na série temporal de conteúdo de carbonato nos sedimentos. As linhas inferiores indicam autoregressão de primeira ordem (AR (1)), as linhas superiores representam o intervalo de confiança de 95% e as barras cinzas indicam a periodicidade significativa.**Figure 7.** Spectral analysis. **A,** spectral analysis on the coccolith numbers of time series; **B,** spectral analysis on the carbonate content time series. The bottom lines indicate first-order autoregression (AR (1)), upper lines represent the 95% confidence interval and grey bars show the significant frequency.

e de COT nos sedimentos do testemunho SIS188 com as insolações mensais ao longo do tempo (Tabela 2) mostram um padrão similar ao atual para o intervalo de tempo estudado, com correlação positiva durante a primavera e início do verão e negativa ao final do verão e início do outono. Portanto, o aumento da produtividade na área de estudo reflete uma componente sazonal ao longo do tempo, aumentando em intervalos de maior insolação, com predomínio dos ventos de nordeste, que intensificam a ressurgência. Quando a insolação é menor (inverno austral), os ventos de sudoeste se fortalecem, porém não foram encontradas correlações significativas para estes intervalos. Ou seja, mesmo que a pluma do Rio da Prata tenha alcançado o oceano aberto no passado, ela não teve importância como fertilizadora dessas águas.

O baixo valor da correlação das variáveis com as curvas de insolação demonstra que este não é o único fator direcionando as mudanças na produtividade. Um destes outros fatores pode ser a fertilização do oceano a partir do influxo de poeira carregada pelos ventos. Lopes *et al.* (2021) estudaram o testemunho SIS249 na Baía de Pelotas, coletado em 30°05'S 47°05'O, e documentaram aumentos de produtividade que tem boa correspondência com maiores influxos de poeira registrados em testemunhos de gelo da Antártica. Embora os testemunhos SIS249 e SIS188 sejam próximos, há pouca sobreposição temporal: um registra o intervalo entre o EIM 5 ao 3 (SIS 249) e o outro o intervalo do EIM 3 ao 1 (SIS188). Ainda assim, é possível observar um aumento na Razão N do testemunho SIS188 em intervalos do EIM 3 (47,5–41.7 kyr e 33,3–29,9 kyr) que coincidem em parte com o aumento do influxo de poeira acompanhado pelo aumento de produtividade no testemunho SIS249 apontado em Lopes *et al.* (2021). Em intervalos glaciais há uma expansão do cinturão dos ventos de sudoeste gerado pelo anticiclone do Pacífico Sul para norte (Pichat *et al.*, 2014; Jacobel *et al.*, 2017), atingindo a Baía de Pelotas. A cobertura vegetal é reduzida nestes intervalos mais frios e secos (Zárate, 2003; Quattrocchio *et al.*, 2008), facilitando o transporte da poeira e possibilitando a fertilização pela sua deposição no Oceano Atlântico Sudoeste.

Embora estes intervalos de maior produtividade no EIM 3 sejam sugeridos pela curva da razão N, os demais *proxies*, como o número de cocólitos e conteúdo de CaCO₃ e de COT nos sedimentos, demonstram valores mais baixos durante este período, com tendência de elevação somente a partir do final do EIM 3. Gonçalves & Leonhardt (2021) sugerem que há um viés na preservação destes indicadores no testemunho SIS188 neste intervalo. A preservação de COT nos sedimentos está mais relacionada com a geometria de massas de água de fundo, do que à deposição e à produtividade. O local de coleta do testemunho SIS188 encontra-se próximo ao limite entre as massas de água ACS e APAN. Na região estudada, há maior influência da primeira, porém com alguma contribuição da segunda. É possível que durante parte do EIM 3, assim como visto por Lopes *et al.* (2021), haja pulsos de maior influência da APAN, já que este período é um intervalo glacial, mesmo que mais ameno que o EIM 2. Embora não haja registro de grande atenuação da AMOC para o EIM 3, sabe-se que esta

sofreu alguma variação durante o período, o que possibilitaria uma ligeira superficialização da contribuição da APAN, mais rica em oxigênio, levando a uma maior deterioração da matéria orgânica.

Já o baixo número de cocólitos e conteúdo de CaCO₃ nos sedimentos está relacionado à sua diluição ocasionada pela alta taxa de sedimentação durante o EIM 3, possibilitada pela redução na velocidade da Corrente de Contorno Oeste Intermediária (Gonçalves & Leonhardt, 2021). Além disso, a taxa de sedimentação mais alta neste período pode estar relacionada a uma maior turbidez das águas superficiais, que inibiria o desenvolvimento da maioria das espécies de cocolitoforídeos. Uma exceção é *Florisphaera profunda*, espécie típica da zona fótica inferior e adaptada a sobreviver em condições de baixa luminosidade (Molfino & McIntyre, 1990), que apresenta altas porcentagens em boa parte do EIM 3 (Figura 4A).

As curvas de número de cocólitos e teores de COT e CaCO₃ nos sedimentos demonstram uma elevação no final do EIM 3 que se amplia durante o EIM 2, enquanto a Razão N sofre uma leve diminuição (Figura 6). Além das abundâncias relativas das espécies dominantes (Figura 4), que pode ser sintetizada pela Razão N, as abundâncias das espécies subordinadas (Figura 5) ajudam a caracterizar o último glacial (neste registro, EIM 3 e EIM 2). *Coccolithus pelagicus* é uma espécie que apresenta afinidade com águas frias, ricas em nutrientes e principalmente, por uma coluna d'água misturada (Boeckel & Baumann, 2006), sendo um bom indicador de ressurgência. No testemunho SIS188, essa espécie é mais frequente entre 35,9 e 19,5 kyr, incluindo o UMG (Figura 5C). Da mesma maneira, as espécies com afinidades a águas ricas em nutrientes, *Calcidiscus leptoporus* e *Helicosphaera* spp. (Figuras 5 A e B), também demonstram maior relevância ao longo do último período glacial, se comparadas ao EIM 1. Embora estas espécies sejam subordinadas, sua ocorrência está de acordo com a interpretação de Pereira *et al.* (2018) que encontraram evidências de alta produtividade para os EIM 3 e 2 ao estudar o testemunho GEOB2107-3 na Baía de Pelotas, atribuída a maior ressurgência.

Além da influência dos ventos nordeste, outro fator que pode ter contribuído para o aumento da produtividade devido à intensificação da ressurgência de ACAS na região é a diminuição do nível do mar registrada durante os períodos glaciais, especialmente no EIM 2. No UMG, por exemplo, estima-se uma redução de 120 m no nível médio do mar (Mix *et al.*, 2001), o que resultaria em uma completa exposição da plataforma continental na região de estudo, sobrepondo então os efeitos da ressurgência costeira e da ressurgência da quebra de plataforma.

Os processos de ressurgência, além de trazerem águas ricas em nutrientes para a superfície, também diminuem a temperatura das águas superficiais. Duque-Castaño *et al.* (2019) reconstruíram as paleotemperaturas (pTSM) para o testemunho SIS188 através da técnica do análogo moderno aplicada sobre a abundância relativa de foraminíferos planctônicos. As menores pTSM médias anuais foram encontradas durante o último período glacial (EIM 3 e EIM 2),

atingindo seu mínimo durante o UMG, com temperatura anual média de aproximadamente 20°C. De acordo com Miranda (1985), a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) é caracterizada por um índice termohalino de 20°C e 36,2 de salinidade. Portanto, as temperaturas encontradas são compatíveis com a presença da ACAS em superfície, o que corroboraria a interpretação de que a ressurgência esteve fortalecida durante o último período glacial, aumentando a fertilização das águas superficiais e, por consequência, a produtividade primária.

Por outro lado, Pereira *et al.* (2018) encontraram um aumento nas pTSM durante o UMG (chegando a quase 23°C), acompanhado de queda na produtividade, no testemunho GEOB2107-3 na Bacia de Pelotas. Santos *et al.* (2017) perceberam uma tendência a aquecimento das águas desde o fim do EIM 3, sem apresentar queda de temperatura durante o UMG em um testemunho na Bacia de Santos. Nos dois casos, os padrões de temperatura foram atribuídos a mudanças na Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC – *Atlantic meridional overturning circulation*). No entanto, outros trabalhos realizados na Margem Continental Brasileira também apontaram uma queda de pTSM durante o UMG (*e.g.*, Toledo *et al.*, 2007).

Ao final do EIM 2, durante o Evento Heinrich 1 (HS1), as abundâncias de *Calcidiscus leptoporus*, *Helicosphaera* spp. e *C. pelagicus* (Figura 5), relacionadas a um maior aporte de nutrientes, caem abruptamente. Além disso, há um aumento concomitante das abundâncias de *Florisphaera profunda* (Figura 4A) e *Umbilicosphaera* spp. (Figura 5D). *Umbilicosphaera* spp. tem sua distribuição associada a águas quentes e oligotróficas (Flores *et al.*, 1999; Boeckel & Baumann, 2004), apontando para um abrandamento no processo de ressurgência durante o HS1 juntamente com *F. profunda*. Com isso, o aporte de nutrientes para as águas superficiais é menor e a produtividade cai. Durante os eventos Heinrich, a AMOC é fortemente desacelerada, interrompendo o transporte de calor para o Atlântico Norte, que é aprisionado no Sul. Além disso, a monção do Atlântico Sul esteve fortalecida durante o HS1 (Stríkis *et al.*, 2015): ela carrega umidade da Amazônia para o sudeste do Brasil e para o Atlântico Sudoeste através da ZCAS, o que resulta em maior precipitação sobre a área de estudo. Tanto o aquecimento das águas quanto uma diminuição de salinidade pelo aumento de precipitação ampliam a estratificação e inibem a ressurgência. Estudos palinológicos em testemunhos marinhos na Bacia de Pelotas também demonstram mudanças relacionadas ao HS1, quando há uma expansão das florestas no continente possibilitada pelo aumento das chuvas e/ou pelo aumento da temperatura (Gu *et al.*, 2018). Novamente, o registro do testemunho GEOB2107-3 (Pereira *et al.*, 2018) apresenta tendência oposta à do SIS188, com aumento da produtividade durante o HS1.

As séries temporais da Razão N, número de cocólitos e teores de COT e CaCO₃ nos sedimentos (Figura 6) apontam para alta produtividade primária no EIM 1. No entanto, diversos trabalhos apontam para a atenuação da ressurgência neste intervalo. Há evidências de aumento da pTSM na região

a partir do HS1 até o Holoceno (Chiessi *et al.*, 2015; Pereira *et al.*, 2018; Duque-Castaño *et al.*, 2019). Este último trabalho, realizado no testemunho SIS188, registrou pTSM média anual entre 23 e 24°C para o Holoceno, indicando uma massa de água quente e, conseqüentemente, o abrandamento do sistema de ressurgência na região. Dados apontam que o sistema de ressurgência sobre a plataforma continental na Bacia de Santos e Campos, ao norte da área de estudo, também sofreu atenuação e restrição nos últimos 20 mil anos (Portilho-Ramos *et al.*, 2015; Lessa *et al.*, 2019). No testemunho SIS188, também não há evidências de manutenção ou expansão do sistema de ressurgência, já que *C. pelagicus* praticamente desapareceu do registro durante a deglaciação e permanece com porcentagens muito baixas no Holoceno (Figura 4C).

Na Bacia de Pelotas, uma acentuada queda na produtividade foi observada a partir do Holoceno em direção ao atual no testemunho GEOB2107-3 (Pereira *et al.*, 2018). Por outro lado, as porcentagens de *Florisphaera profunda* (Figura 4A) não apresentam um aumento significativo e a Razão N (Figura 6B) se mantém alta no testemunho SIS188, indicando que não houve aprofundamento da nutriclina nesse período, apesar da atenuação na ressurgência. Os altos números de cocólitos e de teor de COT nos sedimentos também apontam o Holoceno inicial (o registro termina em 7,2 kyr) como o período de maior produtividade. Esta discrepância pode ser atribuída em parte à natureza dos proxies utilizados nos trabalhos. Enquanto no testemunho SIS188 o principal proxy de produtividade é a Razão N de cocolitoforídeos, no GEOB2107-3 são utilizados foraminíferos planctônicos, que podem ser bastante influenciados pela temperatura. A espécie *Globigerina bulloides*, utilizada por Pereira *et al.* (2018) como um dos indicadores de águas ricas em nutrientes, também é geralmente mais abundante em ambientes frios subtropicais e transicionais (Toledo *et al.*, 2008). A espécie de cocolitoforídeo *C. pelagicus* apresenta a mesma preferência por baixas temperaturas. Na região estudada, muitas vezes baixas temperaturas e maior concentração de nutrientes ocorrem juntas nas águas superficiais, tornando difícil a interpretação individual destes parâmetros. No entanto, nem sempre a maior disponibilidade de nutrientes está associada a águas mais frias, como, por exemplo, na fertilização do oceano pela poeira atmosférica ou pelo influxo de sedimentos continentais, via influência fluvial ou regressões marinhas.

Leonhardt *et al.* (2013), estudando o testemunho KF13 no norte da Bacia de Campos (20°02'S 38°59'O), encontraram uma Razão N alta durante o UMG, mas que atingiu seu máximo durante a deglaciação. Como no testemunho SIS188, a produtividade manteve-se alta até 6,5 kyr, diminuindo a partir daí. Os autores relacionaram este intervalo de alta produtividade com dinâmicas geoquímicas provocadas pela regressão marinha durante o UMG. Filippelli *et al.* (2007) demonstraram que a redistribuição de fósforo da margem para o oceano profundo durante as regressões marinhas pode apresentar uma defasagem de 10–20 kyr entre os registros de produção de exportação baseados em fósforo e o nível do mar, fazendo com que o aumento máximo da produtividade seja percebido apenas durante a deglaciação. Esta é uma possível

explicação para a alta produtividade encontrada no início do Holoceno no testemunho SIS188.

CONCLUSÕES

O registro do testemunho SIS188 demonstra que a produtividade esteve relacionada à insolação (com predominância do ciclo da precessão) e aos processos atmosféricos que influenciam a dinâmica oceânica. Durante o período glacial (EIM 3 e 2), a expansão do sistema de ressurgência na região do Cabo de Santa Marta, impulsionado pelos ventos de nordeste, tiveram um papel importante. Outro fator relevante na fertilização das águas de estudo durante o período glacial foi o transporte de poeira a partir dos ventos. Entretanto, há uma tendência substancial de elevação da produtividade durante o EIM 1, especialmente no Holoceno inicial, quando a ressurgência esteve atenuada. Este intervalo de alta produtividade pode estar relacionado com a redistribuição de fósforo causada pela regressão marinha do UMG.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro e bolsa de doutorado que possibilitaram a execução deste trabalho (CAPES processo nº 88887.091729/2014-01). A primeira autora também é grata ao PPG em Oceanologia da FURG pela oportunidade.

REFERÊNCIAS

- Alves, E.; Macario, K.; Souza, R.; Pimenta, A.; Douka, K.; Oliveira, F.; Chanca, I. & Angulo, R. 2015. Radiocarbon reservoir corrections on the Brazilian coast from pre-bomb marine shells. *Quaternary Geochronology*, **29**:30–35. doi:10.1016/j.quageo.2015.05.006
- Angulo, R.J.; De Souza, M.C.; Reimer, P.J. & Sasaoka, S.K. 2005. Reservoir effect of the Southern and Southeastern Brazilian coast. *Radiocarbon*, **47**:67–73. doi:10.1017/S0033822200052206
- Antunes, R.L. 2007. Nanofósseis Calcários do Quaternário da Margem Continental Brasileira. *Série Ciência Técnica Petróleo*, **21**:76 p.
- Bastos, C.C. & Ferreira, N.J. 2008. Análise Climatológica da Alta Subtropical do Atlântico Sul. *Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia*, p. 612–619.
- Beaufort, L.; Van Der Kaars, S.; Bassinot, F.C. & Moron, V. 2010. Past dynamics of the Australian monsoon: precession, phase and links to the global monsoon concept. *Climate of the Past*, **6**:695–706. doi:10.5194/cp-6-695-2010
- Boeckel, B. & Baumann, K.H. 2004. Distribution of coccoliths in surface sediments in the south-eastern South Atlantic Ocean: ecology, preservation and carbonate contribution. *Marine Micropaleontology*, **51**:301–320. doi:10.1016/j.marmicro.2004.01.001
- Boeckel, B. & Baumann, K. 2006. Coccolith distribution patterns in South Atlantic and Southern Ocean surface sediments in relation to environmental gradients. *Deep-Sea Research Part I*, **53**:1073–1099. doi:10.1016/j.dsr.2005.11.006
- Bottezzini, S.R.; Leonhardt, A.; Diniz, D. & Ávila, A.S.P. Climatic and vegetational dynamics in southern Brazil between 47.8 and 7.4 cal ka BP: a palynological analysis. *Revista Brasileira de Paleontologia*, **24**:345–356.
- Brandini, F.; Nogueira, M.; Simião, M.; Codina, J.C.U. & Almeida Noernberg, M. 2014. Deep chlorophyll maximum and plankton community response to oceanic bottom intrusions on the continental shelf in the South Brazilian Bight. *Continental Shelf Research*, **89**:61–75. doi:10.1016/j.csr.2013.08.002
- Campos, E.J.D.; Velhote, D. & Area, T.S. 2000. Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders. *Geophysical Research Letters*, **27**:751–754. doi:10.1029/1999GL010502
- Campos, P.C.; Möller, O.O.; Piola, A. & Palma, E.D. 2013. Seasonal variability and coastal upwelling near Cape Santa Marta (Brazil). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **118**:1420–1433. doi:10.1002/jgrc.20131
- Carvalho, L.M.V.; Jones, C. & Liebmann, B. 2004. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, **17**:88–108. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2
- Chiessi, C.M.; Mulitza, S.; Mollenhauer, G.; Silva, J.B.; Groeneveld, J. & Prange, M. 2015. Thermal evolution of the western South Atlantic and the adjacent continent during Termination 1. *Climate of the Past*, **11**:915–929. doi:10.5194/cp-11-915-2015
- Costa, K.B.; Cabarcos, E.; Satarosa, A.C.A.; Battaglin, B.B.F. & Toledo, F.A.L. 2016. A multiproxy approach to the climate and marine productivity variations along MIS 5 in SE Brazil: A comparison between major components of calcareous nannofossil assemblages and geochemical records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **449**:275–288. doi:10.1016/j.palaeo.2016.02.032
- Dansgaard, W.; Johnsen, S.J.; Clausen, H.B.; Dahl-Jensen, D.; Gundestrup, N.S.; Hammer, C.U.; Hvidberg, C.S.; Steffensen, J.P.; Sveinbjörnsdóttir, A.E.; Jouzel, J. & Bond, G. 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**:218–220. doi:10.1038/364218a0
- De Masi, M.A.N. 1999. *Prehistoric hunter-gatherer mobility on the southern Brazilian coast: Santa Catarina Island*. Department of Anthropology, Stanford University, Ph.D. Thesis, 186 p.
- Duque-Castaño, M.L.; Leonhardt, A. & Pivel, M.A.G. 2019. Morphometric analysis in the shells of the planktonic foraminifera orbulina universa: A source for paleoceanographic information? *Brazilian Journal of Oceanography*, **67**:1–17. doi:10.1590/S1679-87592019025206701
- Filippelli, G.M.; Latimer, J.C.; Murray, R.W. & Flores, J.A. 2007. Productivity records from the Southern Ocean and the equatorial Pacific Ocean: Testing the glacial Shelf-Nutrient Hypothesis. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **54**:2443–2452. doi:10.1016/j.dsr2.2007.07.021
- Flores, J.A.; Gersonde, R. & Sierro, F.J. 1999. Pleistocene fluctuations in the Agulhas Current Retroflexion based on the calcareous plankton record. *Marine Micropaleontology*, **37**:1–22.
- Flores, J.A.; Gersonde, R.R.; Sierro, F.J. & Niebler, H.S. 2000. Southern Ocean Pleistocene calcareous nannofossil events: Calibration with isotope and geomagnetic stratigraphies. *Marine Micropaleontology*, **40**:377–402. doi:10.1016/S0377-8398(00)00047-5

- Flores, J.A.; Marino, M.; Sierro, F.J.; Hodell, D.A. & Charles, C.D. 2003. Calcareous plankton dissolution pattern and coccolithophore assemblages during the last 600 kyr at ODP Site 1089 (Cape Basin, South Atlantic): Paleoceanographic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **196**:409–426. doi:10.1016/S0031-0182(03)00467-X
- Gomes, L.M.J. & Freitas, A.C.V. 2018. Alterações na Circulação de Hadley Regional e na Alta Subtropical do Atlântico Sul em um Cenário de Aquecimento Global. *Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro*, **43**:227–239. doi:10.11137/2020_3_227_239
- Gonçalves, J.F. & Leonhardt, A. 2021, no prelo. A influência dos processos de fundo sobre um registro fóssil de coccolitoforídeos na Bacia de Pelotas. *Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro*.
- González-Silveira, A.; Santamaría del Angel, E. & Millán-Núñez, R. 2006. Spatial and temporal variability of the Brazil-Malvinas Confluence and the La Plata Plume as seen by SeaWIFS and AVHRR imagery. *Journal of Geophysical Research*, **111**:C06010. doi:10.1029/2004JC002745
- Gu, F.; Chiessi, C.M.; Zonneveld, K.A.F. & Behling, H. 2018. Late Quaternary environmental dynamics inferred from marine sediment core GeoB6211-2 off southern Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **496**:48–61. doi:10.1016/j.palaeo.2018.01.015
- Gyllencreutz, R.; Mahiques, M.M.; Alves, D.V.P. & Wainer, I.K.C. 2010. Mid- to late-Holocene paleoceanographic changes on the southeastern Brazilian shelf based on grain size records. *The Holocene*, **20**:863–875. doi:10.1177/0959683610365936
- Hammer, O.; Harper, D.A.T.; Ryan, P.D. 2001. Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, **4**:1–9.
- Jacobel, A.W.; McManus, J.F.; Anderson, R.F. & Winckler, G. 2017. Climate-related response of dust flux to the central equatorial Pacific over the past 150 kyr. *Earth and Planetary Science Letters*, **457**:160–172. doi:10.1016/j.epsl.2016.09.042
- Jones, C. & Carvalho, L.M.V. 2002. Active and break phases in the South American monsoon system. *Journal of Climate*, **15**:905–914. doi:10.1175/15200442(2002)015<0905:AABPI T>2.0.CO;2
- Koch, C. & Young, J.R. 2007. A simple weighing and dilution technique for determining absolute abundances of coccoliths from sediment samples. *Journal of Nanoplankton Research*, **29**:67–69.
- Laskar, J.P.; Robutel, F.; Joutel, M.; Gastineau, A.C.M.; Correia & Levrard, B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, **428**:261–285. doi:10.1051/0004-6361:20041335
- Leonhardt, A.; Toledo, F.A.L. & Coimbra, J.C. 2013. The productivity history in the Southwestern Atlantic as inferred from coccolithophore record for the last 130 kyr. *Revista Brasileira de Paleontologia*, **16**:361–374. doi:10.4072/rbp.2013.3.02
- Lessa, D.V.O.; Santos, T.P.; Venancio, I.M.; Santarosa, A.C.A.; Santos Junior, E.C.; Toledo, F.A.L.; Costa, K.B. & Albuquerque, A.L.S. 2019. Eccentricity-induced expansions of Brazilian coastal upwelling zones. *Global and Planetary Change*, **179**:33–42. doi:10.1016/j.gloplacha.2019.05.002
- Lessa, D.V.O.; Venancio, I.M.; Santos, T.P.; Belem, A.L.; Turcq, B.J.; Sifeddine, A. & Albuquerque, A.L. 2016. Holocene oscillations of Southwestern Atlantic shelf circulation based on planktonic foraminifera from as upwelling system (off Cabo Frio, Southeastern Brazil). **26**:1175–1187. doi:10.1177/0959683616638433
- Lisiecki, L.E. & Stern, J.V. 2016. Glacial Cycle. *Paleoceanography*, **31**:1368–1394. doi:10.1002/2016PA003002
- Lopes, R.P.; Bonetti, C.; Silveira dos Santos, G.; Gomez Pivel, M.A.; Petró, S.M.; Caron, F. & Bonetti, J. 2021. Late Pleistocene sediment accumulation in the lower slope off the Rio Grande terrace, southern Brazilian Continental Margin. *Quaternary International*, **571**:97–116. doi:10.1016/j.quaint.2020.12.022
- Matsuzaki, K.M.R.; Eynaud, F.; Malaizé, B.; Grousset, F.E.; Tisserand, A.; Rossignol, L.; Charlier, K. & Jullien, E. 2011. Paleoceanography of the Mauritanian margin during the last two climatic cycles: From planktonic foraminifera to African climate dynamics. *Marine Micropaleontology*, **79**:67–79. doi:10.1016/j.marmicro.2011.01.004
- Miranda, L.B. de. 1985. Forma da correlação T-S de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), Brasil. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, **33**:105–119. doi:10.1590/s0373-55241985000200002
- Mix, A.C.; Bard, E. & Schneider, R. 2001. Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG). *Quaternary Science Reviews*, **20**:627–657. doi:10.1016/S0277-3791(00)00145-1
- Molfinio, B. & McIntyre, A. 1990. Precessional forcing of nutricline dynamics in the equatorial Atlantic. *Science*, **249**:766–769. doi:10.1126/science.249.4970.766
- Molnia, B.F. 1974. A rapid and accurate method for the analysis of calcium carbonate in small samples. *Journal of Sedimentary Petrology*, **44**:589–590.
- Okada, H. & Honjo, S. 1973. The distribution of oceanic coccolithophores in the Pacific. *Deep Sea Research*, **20**:355–374.
- Paillard, D.; Labeyrie, L. & Yiou, P. 1996. Macintosh program performs time-series analysis. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, **77**:379.
- Palma, E.D. & Matano, R.P. 2009. Disentangling the upwelling mechanisms of the South Brazil Bight. *Continental Shelf Research*, **29**:1525–1534. doi:10.1016/j.csr.2009.04.002
- Pereira, L.S.; Arz, H.W.; Pätzold, J. & Portilho-Ramos, R.C. 2018. Productivity evolution in the South Brazilian bight during the last 40,000 years. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, **33**:1339–1356. doi:10.1029/2018PA003406
- Peterson, R.R. & Stramma, L. 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, **26**:1–73. doi:10.1016/0079-6611(91)90006-8
- Pichat, S.; Abouchami, W. & Galer, S.J.G. 2014. Lead isotopes in the eastern equatorial Pacific record quaternary migration of the south westerlies. *Earth and Planetary Science Letters*, **388**:293–305. doi:10.1016/j.epsl.2013.11.035
- Pillar, V.D. 1997. Multivariate exploratory analysis and randomization testing with MULTIV. *Coenoses*, **12**:145–148.
- Piola, A.R.; Matano, R.P.; Palma, E.D.; Möller Jr., O.O. & Campos, E.J.D. 2005. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, **32**:1–4. doi:10.1029/2004GL021638
- Portilho-Ramos, R.C.; Ferreira, F.; Calado, L.; Frontalini, F. & de Toledo, M.B. 2015. Variability of the upwelling system in the southeastern Brazilian margin for the last 110,000 years. *Global and Planetary Change*, **135**:179–189. doi:10.1016/j.gloplacha.2015.11.003
- Quattrocchio, M.E.; Borromei, A.M.; Deschamps, C.M.; Grill, S.C. & Zavala, C.A. 2008. Landscape evolution and climate changes

- in the Late Pleistocene–Holocene, southern Pampa (Argentina): evidence from palynology, mammals, and sedimentology. *Quaternary International*, **181**:123–138. doi:10.1016/j.quaint.2007.02.018
- Ravelo, A.C. & Fairbanks, R.G. 1992. Oxygen isotopic composition of multiples species of planktonic foraminifera: records of the modern photic zone temperature gradient. *Paleoceanography*, **7**:815–831.
- Reimer, P.J.; Bard, E.; Bayliss, A.; Beck, J.W.; Blackwell, P.G.; Ramsey, C.B.; Buck, C.E.; Cheng, H.; Edwards, R.L.; Friedrich, M.; Grootes, P.M.; Guilderson, T.P.; Haffidason, H.; Hajdas, I.; Hatté, C.; Heaton, T.J.; Hogg, A.G.; Hughen, K.A.; Kaiser, K.F.; Kromer, B.; Manning, S.W.; Niu, M.; Reimer, R.W.; Richards, D.A.; Scott, E.M.; Southon, J.R.; Turney, C.S.M. & Van der Plicht, J. 2013. IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0–50000 years calBP. *Radiocarbon*, **55**:1869–1887. doi:10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Santos, T. P.; Lessa, D.O.; Venancio, I.M.; Chiessi, C.M.; Mulitza, S.; Kuhnert, H.; Govin, A.; Machado, T.; Costa, K.B.; Toledo, F.; Dias, B.B. & Albuquerque, A.L.S. 2017. Prolonged warming of the Brazil Current precedes deglaciations. *Earth and Planetary Science Letters*, **463**:1–12. doi: 10.1016/j.epsl.2017.01.014
- Schulz, M. & Mudelsee, M. 2002. REDFIT: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers and Geosciences*, **28**:421–426. doi:10.1016/S0098-3004(01)00044-9
- Stramma, L. & England, M. 1999. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, **104**:20863–20883. doi:10.1029/1999JC900139
- Strikis, N.M.; Chiessi, C.M.; Cruz, F.W.; Vuille, M.; Cheng, H.; De Souza Barreto, E.A.; Mollenhauer, G.; Kasten, S.; Karmann, I.; Edwards, R.L.; Bernal, J.P. & Sales, H.D.R. 2015. Timing and structure of Mega-SACZ events during Heinrich Stadial 1. *Geophysical Research Letters*, **42**:5477–5484. doi:10.1002/2015GL064048
- Stuiver, M. & Reimer, P.J. 1993. Extended ¹⁴C data base and revised Calib 3.0 ¹⁴C age calibration program. *Radiocarbon*, **35**:215–230. doi:10.1017/S0033822200013904
- Toledo, F.A.L.; Costa, K.B. & Pivel, M.A.G. 2007. Salinity changes in the western tropical South Atlantic during the last 30 kyr. *Global and Planetary Change*, **57**:383–395. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.01.001
- Toledo, F.A.L.; Costa, K.B.; Pivel, M.A.G. & Campos, E.J.D. 2008. Tracing past circulation changes in the western South Atlantic based on planktonic foraminifera. *Revista Brasileira de Paleontologia*, **11**:169–178. doi:10.4072/rbp.2008.3.03
- Young, J.R.; Bown P.R. & Lees, J.A. 2020. Nannotax3 website. International Nannoplankton Association. Disponível em <http://www.mikrotax.org/Nannotax3>; acesso em 19/08/2020.
- Zárate, M. 2003. Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews*, **2**:1987–2006. doi:10.1016/S0277-3791(03)00165-3

Received in 06 February, 2021; accepted in 30 October, 2021.