

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE BIOLOGIA
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

Helena de Belmonte Alcaide Guerra

Foraminíferos bentônicos oportunistas como indicadores de deposição de carbono orgânico
no sudoeste do Atlântico Sul desde o último Período Glacial.

Niterói
2017

Helena de Belmonte Alcaide Guerra

Foraminíferos bentônicos oportunistas como indicadores de deposição de carbono orgânico
no sudoeste do Atlântico Sul desde o último Período Glacial.

Monografia apresentada ao Curso de
graduação em Ciências Biológicas da
Universidade Federal Fluminense,
como requisito parcial para obtenção
do Grau de Bacharel.

Orientador: Dra. Ana Luiza Albuquerque

Co-orientador: Dra. Bruna Dias

Niterói

2017

Ficha catalográfica

Helena de Belmonte Alcaide Guerra

Foraminíferos bentônicos oportunistas como indicadores de deposição de carbono orgânico no sudoeste do Atlântico Sul desde o último Período Glacial.

Monografia de conclusão de curso apresentada na Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Aprovada em _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Ana Luiza S. Albuquerque
(Presidente)

Dr. Igor M. Venancio
(Membro)

Dr. Fabio B. Pitombo
(Membro)

Dr. Edson P. da Silva
(Membro suplente)

Niterói

2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais (Waldemar e Eva) por tudo que fizeram por mim esses anos, sem eles nada disso teria sido possível. Agradeço especialmente a minha mãe que sempre fez o melhor para que todos meus sonhos fossem alcançados, me dando suporte emocional para aguentar todas as adversidades, sempre confiando na minha capacidade.

Aos meus avós Luis e Pilar, por todo o apoio estrutural, carinho e aprendizado em todos esses anos.

As minhas irmãs Flora e América por sempre estarem do meu lado, conversando, apoiando, incentivando e aconselhando.

Ao meu amigo, companheiro e amor Bernardo por ter passado cada etapa difícil ao meu lado, me dando forças constantemente para seguir em frente, me tirando sorrisos nos momentos mais difíceis.

À Dra. Bruna Dias, por todo o aprendizado, pela orientação e pelo apoio durante um ano e meio no laboratório, me incentivando e acreditando sempre no meu potencial. Serei sempre grata por toda experiência e confiança que me foi concebida.

À professora Dra. Ana Luiza Albuquerque por me recebido com tanto carinho no laboratório e por todo suporte para a realização da minha monografia.

À todos os alunos do Departamento de Geoquímica, especialmente Janie, Giulia, Thatiele e Bruna, pela amizade e companheirismo durante todo o processo, me apoiando de forma pessoal ou profissional.

Aas amigas Helena, Nathália, Camila por todos os choros e sorrisos que passamos dentro da universidade, e na vida. Por todo incentivo e por acreditarem sempre em mim.

Ao órgão de financiamento Capes pela concessão das bolsas de estudos.

Por fim, Universidade Federal Fluminense e ao Departamento de Geoquímica pelo apoio no desenvolvimento da monografia.

RESUMO

Partindo do entendimento de que as mudanças oceanográficas constituem um importante papel na modulação dos ciclos biogeoquímicos dos sedimentos marinhos, este trabalho visa aprimorar o conhecimento sobre a dinâmica de deposição do carbono orgânico na borda sudoeste do Atlântico Sul. Areladas à Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC, do inglês *Atlantic Meridional Overturning Circulation*), a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) apresenta uma variabilidade na circulação durante ciclos glaciais/interglaciais e eventos abruptos, que, por sua vez, podem alterar a deposição de carbono orgânico no sistema marinho, gerando importantes consequências biológicas e geoquímica nos sedimentos. Neste sentido, este trabalho visa reconstruir, a deposição do carbono orgânico desde o último período glacial utilizando como indicadores foraminíferos bentônicos. As análises geoquímicas e paleoecológicas foram realizadas no testemunho sedimentar marinho GL1090 localizado na bacia de Santos, incluindo a análise da abundância das espécies oportunistas *Alabaminella wedellenensis*, *Epistominella exigua* e *Globocassidulina subglobosa* foram realizadas, assim como o teor de carbono orgânico total (COT) e tamanho médio da fração *sortable silt*. Os resultados obtidos mostraram que a espécies oportunistas apresentam maior abundância em períodos glaciais, onde o fluxo de carbono é maior do que em períodos interglaciais. As espécies de oportunistas respondem de forma diferente às espécies infaunais, pois o carbono orgânico lábil exportado e rapidamente degradado na superfície dos sedimentos. As espécies infaunais mostram um período glacial mais produtivo, e *G. subglobosa* confirma uma maior remineralização da matéria orgânica. As oportunistas mostraram o MIS 3 como o estágio mais produtivo e condições de produtividade e aporte de material orgânico lábil no MIS 2 parecidas com o MIS 1, uma vez que no Atlântico Sul durante o MIS 2 já se encontravam condições parecidas as interglaciais. Com isso, a maior abundância destas espécies indica uma maior eficiência da bomba biológica em períodos de AMOC menos intensas (Período Glacial), pois estas condições favoreceram maior exportação de carbono orgânico para os sedimentos.

Palavras-Chave: paleoprodutividade, paleoecologia, foraminíferos bentônicos, Atlântico Sul

ABSTRACT

Based on the understanding that oceanographic changes play an important role in the modulation of biogeochemical cycles of marine sediments, this work aims to improve knowledge about the dynamics of organic carbon deposition on the southwestern edge of the South Atlantic. Tied to the Atlantic Meridian Overturning Circulation (AMOC), the North Atlantic Deepwater (NADW) shows changes in circulation during glacial/interglacial cycles and abrupt events, which in turn may modify the deposition of organic carbon in the marine system and generate important biological and geochemical consequences on the sediments. In this sense, this work aims to reconstruct the deposition of organic carbon in the last glacial period, using benthic foraminifera as indicators. The geochemical and paleoecological analyzes were carried out on the marine sediment core GL1090 in the Santos basin, including the abundance analysis of the opportunistic species *Alabaminella wedellenensis*, *Epistominella exigua* and *Globocassidulina subglobosa*, as well as the total organic carbon (TOC) and the sortable silt mean size. The results showed that opportunistic species present greater abundance in glacial periods, where the carbon flux is higher than in interglacial periods. The opportunists respond differently to infauna species, because the labile organic carbon exported is rapidly degraded on the surface of the sediments. The infaunal species show the glacial period as more productive, and *G. subglobosa* confirms a greater remineralization of the organic matter. The opportunists showed the Marine Isotope Stage (MIS) 3 as the most productive and conditions of productivity and contribution of labile organic material in the MIS 2 similar to the MIS 1, since in the South Atlantic the MIS 2 conditions were already similar to the interglacial. Therefore, the greater abundance of these species indicates a greater efficiency of the biological pump in periods of AMOC less intense (glacial period), because these conditions favored greater exportation of organic carbon to the sediments.

Keywords: paleoproductivity, paleoecology, benthic foraminifera, South Atlantic

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ilustração das espécies <i>Alabaminella weddellensis</i> , <i>Epistominella exigua</i> e <i>Globocassidulina subglobosa</i>	3
Figura 2: Ilustração das espécies <i>Uvigerina peregrina</i> , <i>Bolivina lowmani</i> e <i>Bolivina ordinaria</i>	4
Figura 3: Modelo Trox representando os limites de profundidade de microhabitat de foraminíferos bentônicos pela combinação da penetração de oxigênio e disponibilidade de oxigênio no sedimento.....	5
Figura 4: Localização do testemunho marinho GL-1090.....	8
Figura 5: Geometria das massas d'água do oceano Atlântico baseado no $\delta^{13}\text{C}$ de foraminíferos bentônicos durante A) período interglacial e B) ultimo glacial.....	9/10
Figura 6: Gráficos de abundância das espécies <i>Uvigerina peregrina</i> e <i>Bolivina</i> sp., BFAR, <i>sortable silt</i> , porcentagem de COT e CaCO_3 analisados no testemunho GL-1090. Os retângulos em branco representam o MIS 1 e 3, e os retângulos em cinza representam o MIS 2 e 3. Os triângulos tracejados representam os eventos Heinrich 1, 2, 3, 4, 5 e 5A, respectivamente.....	13
Figura 7: Gráficos de abundância das espécies <i>Epistominella exigua</i> , <i>Globocassidulina subglobosa</i> , e <i>Alabaminella weddellensis</i> , analisadas no testemunho GL-1090. Os retângulos em branco representam o MIS 1 e 3, e os retângulos em cinza representam o MIS 2 e 3. Os triângulos tracejados representam os eventos Heinrich 1, 2, 3, 4, 5 e 5A, respectivamente.....	15
Figura 8: Gráfico de fluxo de <i>Epistominella exigua</i> , <i>Globocassidulina subglobosa</i> , e <i>Alabaminella weddellensis</i> analisadas no testemunho GL-1090. Os retângulos em branco representam o MIS 1 e 3, e os retângulos em cinza representam o MIS 2 e 3. Os triângulos tracejados representam os eventos Heinrich 1, 2, 3, 4, 5 e 5A, respectivamente.....	17
Figura 9: Modelo conceitual proposto que resume a circulação profunda na margem oeste do Atlântico Sul desde o último interglacial.....	23

LISTA DE ABREVIACOES

AMOC: Atlantic Meridional Overturning Circulation

BFAR: Índice de acúmulo de foraminíferos bentônicos

CaCO₃: Carbonato de cálcio

COT: Carbono orgânico total

MIS: Estágios isotópicos marinhos

SS: Srtable Silt

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	viii
LISTA DE ABREVIACÕES.....	ix
1.INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	7
2.1 OBJETIVO GERAL.....	7
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	7
3.MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	8
3.2 AMOSTRAGEM.....	9
3.3 MICROPALEONTOLOGIA.....	10
3.4 INDICES ECOLÓGICOS DE FORAMINÍFEROS BENTÔNICOS.....	10
3.5 ANÁLISES SEDIMENTOLÓGICAS.....	11
4. RESULTADOS.....	12
4.1 SEDIMENTOLOGIA.....	12
4.2 GEOQUÍMICA DO SEDIMENTO.....	12
4.3 PALEOECOLOGIA.....	12
5. DISCUSSÃO.....	18
5.1 PRODUTIVIDADE ACUMULADA X PRODUTIVIDADE EXPORTADA AO LONGO OS ÚLTIMOS 70.000 ANOS.....	18
5.2 CIRCULAÇÃO DE FUNDO E CICLO DO CARBONO NA BACIA DE SANTOS...21	
6. CONCLUSÃO.....	24
7. REFERÊNCIAS.....	25
8. APENDICE I – TAXONOMIA.....	3

1. INTRODUÇÃO

Os oceanos possuem características que influenciam fortemente no clima da Terra, como a sua alta capacidade térmica, suas propriedades de distribuição de calor (pela circulação termohalina) e a capacidade de armazenar e/ou liberar dióxido de carbono. As variações de temperatura dos oceanos provocam alterações na geometria e na velocidade das massas d'água que conseqüentemente modificam os padrões de circulação oceânica. A circulação termohalina, conhecida como “Meridional Overturning Circulation – MOC”, sendo a porção atlântica também conhecida como AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation), proporciona a transferência de calor e sal do hemisfério sul para o hemisfério norte através de correntes superficiais, principalmente pela Corrente Norte do Brasil (CNB), que se incorpora a Corrente do Golfo. Quando essas águas alcançam o hemisfério Norte afundam, dando origem à Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), que retorna para o hemisfério Sul até se incorporar à Corrente Circumpolar Antártica. Dessa forma, a abrupta variação de temperatura entre períodos glaciais e interglaciais também alteram as temperaturas da superfície do mar, refletindo na intensidade da AMOC. Isso se dá por que o transporte de calor para o Atlântico Norte nesses períodos acontece de maneiras e velocidades diferentes, o que conseqüentemente também influencia no afundamento dessas massas de água modificando a circulação de fundo do oceano Atlântico (Toggweiler, 1999).

Ao longo do tempo, mudanças na circulação são observadas e relacionadas com variações na temperatura dos oceanos e no volume de gelo das calotas polares. Essas variações foram deduzidas através de mudanças na razão isotópica do oxigênio $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$) das massas d'água (Emiliani, 1950), onde as variações entre períodos glaciais e interglaciais originaram os estágios isotópicos marinhos (MIS). Já foram identificados mais de 100 estágios isotópicos marinhos, os quais chegam a cerca de 6 milhões de anos. Os últimos 14ka passados até o presente (MIS 1), representam um período interglacial com menos valores de $\delta^{18}\text{O}$. O MIS 2, 3 e 4 possuem maior $\delta^{18}\text{O}$ e representam o último período glacial (Lisiecki e Raymo, 2005).

Durante o último período glacial, foram observados eventos rápidos em escala milenar relacionados ao desligamento da circulação da AMOC em decorrência do desprendimento de armadas de icebergs. Estas armadas se deslocavam pelo Atlântico Norte e seu derretimento

fez com que grandes quantidades de água doce fossem adicionadas a essa região, alterando os padrões da circulação termohalina (Heinrich, 1988). Esses eventos são conhecidos como Heinrich e ocorreram durante cinco dos últimos sete período glaciais no últimos 640ka anos (Hodell *et al.*, 2008).

Para entender as questões ambientais do presente precisamos olhar primeiramente para o passado, o que tem sido muito facilitado por estudos micropaleontológicos. Nesse sentido, foraminíferos têm sido muito usados como indicadores em estudos paleoambientais (Hallock *et al.*, 2003) possuindo forma planctônicas e bentônicas. São organismos ameboides que possuem uma carapaça (testa) dividindo-se em aglutinantes – constroem sua testa a partir da junção de grãos, espículas, pedaços de conchas e semelhantes – e em calcários, que podem ser porcelanáceos ou hialinos tendo ambos como principal componente carbonato de cálcio (CaCO₃) na sua composição (Blackmon e Todd, 1959).

Em relação ao hábito de vida, os foraminíferos bentônicos podem ser divididos em duas categorias, epifaunais e infaunais. As espécies epifaunais são as que necessitam uma maior concentração de oxigênio, logo vivem na superfície do sedimento marinho ou de outros substratos, mantendo contato com as águas de fundo. Por outro lado, as espécies infaunais habitam diferentes profundidades do sedimento, podendo habitar camadas superficiais (infauna rasa), intermediárias (infauna intermediária) e profundas (infauna profunda) (Murray, 2006). A ecologia de foraminíferos bentônicos também possui grande importância em estudos paleoceanográficos, pois sua distribuição é controlada principalmente por fatores ambientais como a disponibilidade de material orgânico e oxigenação na parte mais profunda do oceano (Jorissen *et al.*, 2007). Uma maior ou menor quantidade dessa matéria estabelece o alojamento e abundância de determinadas espécies.

A abundância de algumas espécies de foraminíferos bentônicos oportunistas (como *Alabaminella weddellensis*, *Epistominella exigua* e *Globocassidulina subglobosa* (Figura 1) responde à variação de carbono orgânico exportado ao fundo do mar (Gooday, 1988). Estas espécies possuem uma alta taxa de reprodução (r-estrategistas) e são favorecidas em eventos de alto fluxo pulsatório de matéria orgânica produzido pela produção primária em profundidades mais rasas. A resposta dos foraminíferos bentônicos ao carbono orgânico lábil (fitodetritos) já foi relatada através de experimentos laboratoriais e *in situ* em sedimentos

(Heinz, 2001; Enge *et al.*, 2011). A colonização e o domínio de oportunistas resultam em uma redução da diversidade dos foraminíferos bentônicos (Corliss *et al.*, 2009). Tais condições de bombeamento biológico mais eficiente na coluna d' água não conduzem necessariamente a altas taxas de acumulação de carbono orgânico nos sedimentos, porque a matéria orgânica lábil pode ser rapidamente degradada no fundo do mar por bactérias e outros organismos na presença de oxigênio.

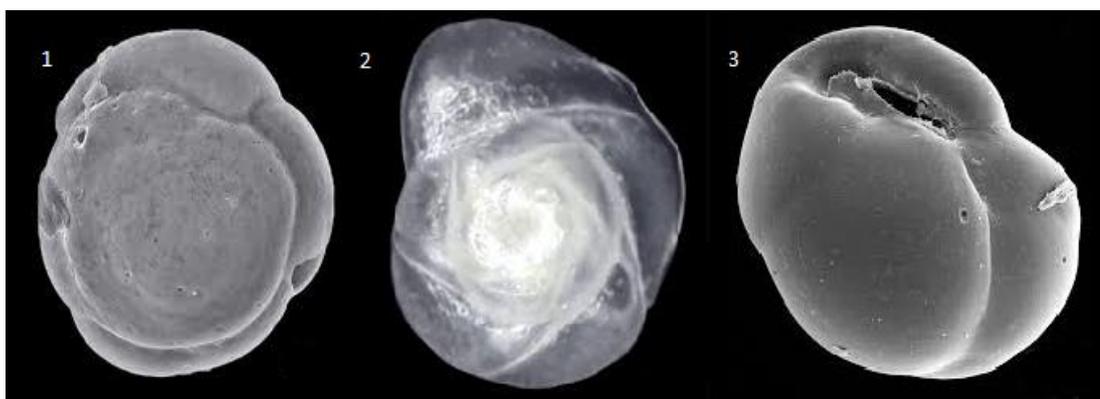


Figura 1: Espécies oportunistas. 1-*Alabaminella weddellensis*; 2- *Epistominella exigua*; 3- *Globocassidulina subglobosa*. (Fonte: www.foraminifera.eu)

A *G. subglobosa* é uma espécie que possui grande abundância, pois possui uma habilidade de se reproduzir rapidamente em condições estressantes de distribuição de fitodetritos nas águas subterrâneas ao longo do sedimento (Heinz, 2001; Gooday *et al.*, 2010). Na margem brasileira esta espécie foi destacada como indicador de águas oligotróficas e bem oxigenada (Eichler *et al.*, 2008; Paquette *et al.*, 2016). As espécies *A. weddellensis* e *E. exigua* possuem uma ecologia semelhante com a *G. subglobosa*, mas a *A. weddellensis* também pode estar associada ao alto fluxo de produtividade de diatomáceas (Stefanoudis *et al.*, 2017).

Espécies de infauna que vivem no sedimento, como *Uvigerina peregrina* e *Bolivina* sp. (Figura 2), ocorrem abundantemente em regiões onde o fluxo de matéria orgânica é alto e contínuo ao longo do ano, muitas vezes associadas a concentrações reduzidas de oxigênio (Ohga e Kitazato, 1997).

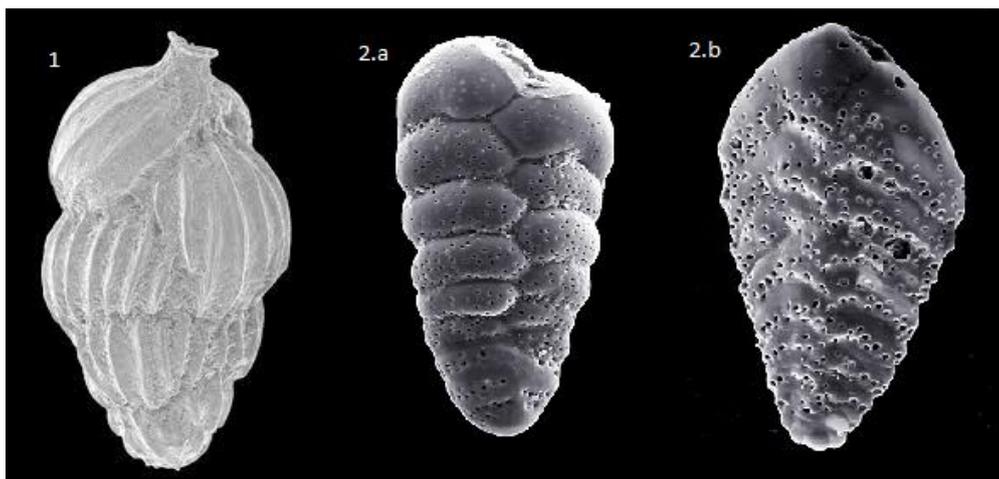


Figura 2 – Espécies infaunais. 1- *Ulvigerina peregrina*; 2 – Gênero *Bolivina*, 2.a – *Bolivina lowmani*, 2.b – *Bolivina ordinaria* (Fonte: www.foraminifera.eu)

Além da abundância de espécies, o índice de acúmulo de foraminíferos bentônicos *Benthic Foraminifera Accumulation Rate* (BFAR), tem sido utilizado para estimar a produtividade (Herguera e Berger, 1991). As estimativas sugerem uma produtividade glacial em baixas latitudes de cerca de 1,5 a 2 vezes maior do que a produtividade atual (Ohkushi *et al.*, 1999). No entanto, Corliss e Emerson (1990) interligaram não apenas a produtividades, mas a disponibilidade de oxigênio como os principais controles na microdistribuição das espécies de foraminíferos bentônicos. Um modelo de explicação da distribuição vertical de foraminíferos bentônicos no sedimento foi proposto por Jorissen *et al.* (1995), chamado modelo Trox (Figura 3). A essência desse modelo é que em ambientes eutróficos, o baixo nível de oxigênio determina a profundidade que determinadas espécies podem viver no sedimento e, em sistemas oligotróficos, o que limita a vida dos foraminíferos é a disponibilidade de alimento no sedimento. O esquema do modelo Trox de Jorissen *et al.* (1995) foi adaptado por alguns autores, como Van der Zwaan *et al.* (1999), que inseriu informações sobre o padrão de distribuição geral dos foraminíferos bentônicos em condições variáveis de oxigênio.

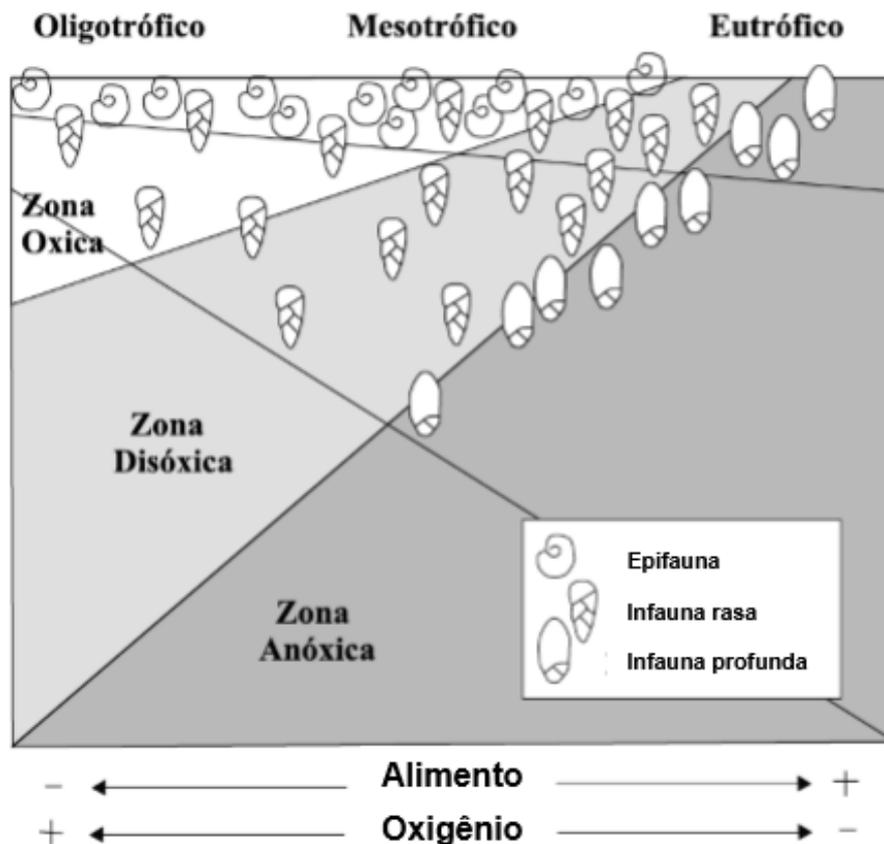


Figura 3 – Modelo Trox representando os limites de profundidade de microhabitat de foraminíferos bentônicos pela combinação da penetração de oxigênio e disponibilidade de oxigênio no sedimento. Fonte: Van der Zwaan et. al., 1999.

As mudanças que ocorrem nos glaciais e interglaciais na composição das espécies de foraminíferos bentônicos em várias partes dos oceanos têm sido relacionadas com mudanças na produtividade, seja na quantidade total de matéria orgânica que chega ao fundo do mar ou na forma que esse fluxo de material orgânico é depositado, podendo ser pulsatório ou contínuo (Thomas *et al.*, 1995). No entanto, a relação entre a variação das espécies de foraminíferos bentônicos e a dinâmica da AMOC durante eventos abruptos ainda são pouco explicados.

Deste modo, as seguintes questões relacionadas à paleocirculação e a paleoprodutividade das águas de fundo presentes no sudoeste do Atlântico serão investigadas:

- As três espécies oportunistas, *Alabaminella weddellensis*, *Epistominella exigua* e *Globocassidulina subglobosa* respondem ao fluxo de carbono orgânico da mesma forma?
- A resposta das espécies de foraminíferos oportunistas seriam similares as espécies de infauna em condições de alto fluxo de matéria orgânica?
- A abundância destas espécies poderia estar relacionada com a dinâmica da AMOC e circulação de fundo?

Considerando as três perguntas postuladas, as seguintes hipóteses serão testadas:

H1: A paleoprodutividade representada pelas espécies oportunistas respondem primariamente aos pulsos de carbono orgânico durante o período interglacial (menor fluxo de carbono orgânico – menor abundância) e último glacial (maior fluxo de carbono orgânico – maior abundância). Desta forma, a maior abundância destas espécies indica uma maior eficiência da bomba biológica em períodos de AMOC menos intensa (período glacial e eventos abruptos, o que favorece a exportação de carbono orgânico para os sedimentos).

*H2: A abundância das espécies de infauna (*U. peregrina* e *Bolivina* sp.) não estaria diretamente relacionada com as espécies oportunistas, uma vez que boa parte do carbono orgânico lábil exportado é rapidamente degradado na superfície dos sedimentos. Assim, a abundância das espécies de infauna representariam primariamente o carbono orgânico acumulado dos sedimentos.*

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Reconstruir as mudanças do carbono orgânico exportado na borda oeste do Atlântico Sul desde o último período glacial, visando entender o padrão de transporte e deposição de carbono orgânico lábil e entender quais são as respostas destes processos às variações paleoclimáticas e de paleocirculação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Utilizar espécies oportunistas de foraminíferos bentônicos a fim de reconstruir variações no carbono orgânico lábil transportado ao sedimento;
- Comparar a abundância de espécies oportunistas com espécies infauna a fim de compreender os processos de preservação e degradação do carbono orgânico lábil;
- Relacionar a dinâmica da abundância das espécies estudadas com as mudanças no transporte advectivo das massas de fundo.

3. MATERIAIS E METODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A região estudada nesse projeto foi a borda sudoeste do Atlântico (Figura 4). A Corrente do Brasil é a principal corrente do local e transporta na parte mais superficial a Água Tropical (AT) com temperaturas acima de 20°C e salinidade maiores de 36 seguido da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), apresentando temperaturas maiores que 6°C e menores que 20°C e salinidade entre 34,6 e 36,0. Posteriormente está presente a Água Intermediária Antártica (AIA) apresentando temperatura de 3°C a 6°C e salinidade entre 34,2 e 34,6, possuindo uma profundidade de 800 a 1500m. Por ultimo está a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), se localizando entre 1500 a 3000m de profundidade, com temperaturas entre 3° e -4°C e salinidade entre 34,6-35,0 (Silveira *et al.*, 2000). Esta se origina no Atlântico Norte e segue sentido o Sul por meio da Corrente Profunda de Borda Oeste do Atlântico (Rühlemann *et al.*, 1999) (Figura 5).

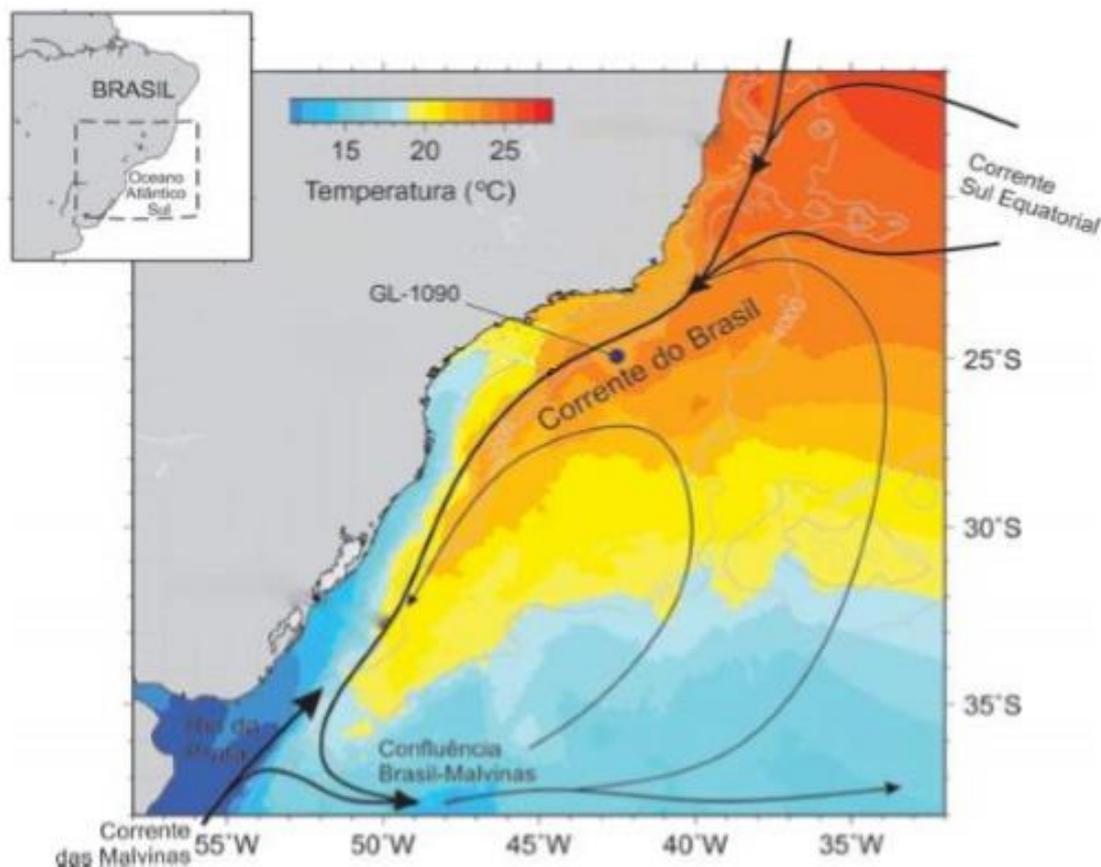
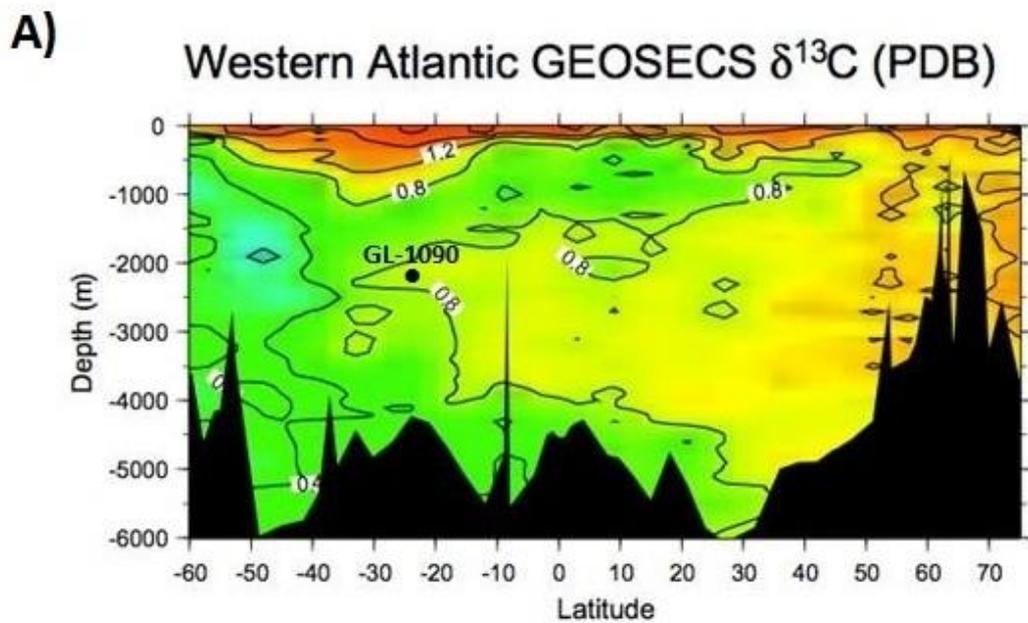


Figura 4 – Localização do testemunho marinho GL-1090.

3.2 AMOSTRAGEM

Um testemunho sedimentar marinho doado pela Petrobrás, nomeado GL1090, foi amostrado na Bacia de Santos na latitude e longitude de 24°55,7'S - 43°31,1'W, em uma profundidade de 2225m de coluna d'água e recuperação de 1915cm de sedimento (Figura 4). O testemunho GL-1090 consiste principalmente em sedimentos glaciais de silte e argila ricos em foraminíferos.

Um modelo cronológico foi elaborado a partir da combinação de idades de radiocarbono obtidas com foraminíferos planctônicos e $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bentônicos, assim como descrito por Santos *et al.* (2017).



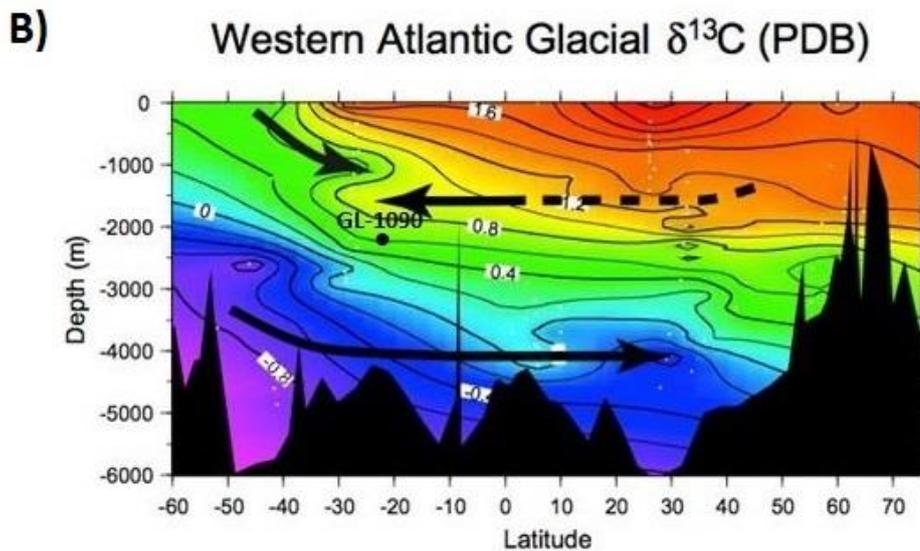


Figura 5 – Geometria das massas d’água do oceano Atlântico baseado no $\delta^{13}\text{C}$ de foraminíferos bentônicos durante A) período interglacial e B) ultimo glacial, com as localizações do testemunho GL – 1090 (Adaptado de Curry and Oppo 2005).

3.3 MICROPALEONTOLOGIA

Um volume total de 5 cm^3 de sedimento marinho de 61 amostras foram lavadas em uma peneira com abertura da malha de $63\mu\text{m}$ permitindo que apenas as testas carbonáticas e partículas mais grossas de sedimentos ficassem retidas na malha. Entre as lavagens das amostras a peneira foi banhada em uma solução de azul de metileno com finalidade de marcar qualquer foraminífero de outra amostra que não tenha se desprendido da peneira. Posteriormente as amostras foram secas em estufa a $50\text{ }^\circ\text{C}$.

Com as amostras já secas, foi realizado o processo de triagem e identificação das espécies em microscópio estereoscópio. A amostra foi despejada em bandeja quadriculada de onde foram retirados em média 300 foraminíferos bentônicos manualmente e colocados em lâminas micropaleontológicas com auxílio de pincel número 5/0.

3.4 INDICES ECOLÓGICOS DE FORAMINÍFEROS BENTÔNICOS

Foram identificadas e contabilizadas as espécies oportunistas *Alabaminella weddellensis*, *Epistominella exigua* e *Globocassidulina subglobosa* além das espécies de

infauna *Uvigerina peregrina* e a *Bolivina* sp. Foram calculados dados como abundância, fluxo de espécies, índice de produtividade BFAR (*Benthic Foraminiferal Accumulation Rate*) de acordo com Herguera e Berger (2007). A taxa de acúmulo de foraminíferos bentônicos é baseada na equação de Guichard *et al.* (1997), que indica a variação da paleoprodutividade local:

$$\text{BFAR} = T_x \times \text{TS} \times \text{DE},$$

onde T_x é o número total de foraminíferos, TS a taxa de sedimentação da amostra e DE a densidade do sedimento. O resultado é expresso em $\text{ind.cm}^{-2}.\text{kyr}^{-1}$.

O fluxo das espécies *Alabaminella weddellensis*, *Epistominella exigua* e *Globocassidulina subglobosa* foi mensurado por meio da equação abaixo, onde TS é a taxa de sedimentação, DE é a densidade do sedimento e T_{sp} é a densidade de indivíduos da espécie:

$$\text{Fluxo (ind.cm}^{-2}.\text{ka}^{-1}) = \text{TS} \times \text{DE} \times T_{sp}$$

3.5 ANÁLISES SEDIMENTOLÓGICAS

Foram realizadas análises de tamanho médio de sedimento da fração *sortable silt* (10-63 μm) nos primeiros 870 cm de topo com resolução de 5 cm. Primeiramente foram descarboxatadas 5g de cada amostra, em seguida a matéria orgânica foi oxidada em peróxido de hidrogênio 30% e por último foi adicionado dispersante hexametáfosfato de sódio. As amostras foram analisadas no analisador de partículas a laser CILAS.

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram mensurados em 0,01g de amostras de sedimento descarboxatadas e maceradas em gral de ágata. As amostras foram encaminhadas em cápsulas de estanho para o Laboratório de Isótopos Estáveis da Universidade de Davis (EUA), sendo mensuradas em analisador elementar PDZ Europa ANCA-GSL acoplado a espectrômetro de massa de razão isotópica 20-20 PDZ Europa (SERCON Ltd., Cheshire UK).

Com relação ao teor de carbonato (CaCO_3), as análises foram realizadas por meio do método de perda de peso pela dissolução de carbonato com ácido clorídrico (HCL). A diferença entre o peso seco inicial da amostra e o peso seco final corresponde ao conteúdo de CaCO_3 da amostra (valores expressos em %).

4. RESULTADOS

4.1 SEDIMENTOLOGIA

Os resultados de *sortable silt* (SS) mostram que o tamanho médio do grão da fração 10-63 μm apresentou valores entre 10,73 μm e 27,05 μm . Desde o último glacial até o início do MIS 1, os resultados mostram uma tendência de aumento no tamanho médio da fração SS, com uma média de $15,31 \pm 2,96 \mu\text{m}$. Menores valores de SS foram observados no MIS 4 e maiores valores no MIS 2 e 1 (Figura 6).

4.2 GEOQUÍMICA DO SEDIMENTO

O teor de carbono orgânico total (COT) variou entre 1,04 % e 0,31 % apresentando valores médios de $0,53 \pm 0,11$ %. No MIS 4 nota-se valores baixos, com um média de $0,46 \pm 0,05$ %. Entretanto, no MIS 3, o COT começa a aumentar até atingir 0,83 % em 37 ka onde se inicia uma tendência decrescente. No MIS 2, os valores continuam diminuindo até o início do MIS 1, onde ocorre um pico e alcança os maiores valores da série (1,04%) (Figura 6).

Em relação aos teores de carbonato de cálcio (CaCO_3) os valores estiveram entre 54,09 % e 6,60 %, com uma média de $20,83 \pm 9,34$ %, ao longo de todo o testemunho. No MIS 4 os valores se mantiveram estáveis, apresentando uma média de $10,28 \pm 2,01$ %. A partir do início do MIS 3 os valores mostram uma tendência crescente até o início do testemunho (MIS 1) com uma média de $26,15 \pm 6,67$ %, alcançando os maiores valores no MIS 1 (Figura 6).

4.3 PALEOECOLOGIA

As espécies infaunais *Uvigerina peregrina* e *Bolivina* sp. apresentaram tendências distintas quanto a abundância. *Bolivina* sp. apresentou uma tendência geral crescente desde o glacial com valores entre 0,0 % e 17,06 % e média $5,97 \pm 3,52$ %. Durante o MIS 4 os valores mantiveram estabilidade mostrando valores médios de $4,01 \pm 1,68$ %. O MIS 3 apresentou uma tendência de aumento até 41 ka, atingindo o maior valor de abundância encontrado 17,1 %, seguido de uma queda até o final desse MIS. No MIS 2 e no MIS 1 os valores aumentam novamente, apresentando média de abundância do gênero $8,1 \pm 4,2$ %. Por outro lado, a *U. peregrina* apresenta uma tendência geral decrescente variando seus valores entre 0,0 e 9,24 %, com média $3,67 \pm 2,03$ %. No MIS 4, de 71 ka até 63 ka houve um aumento crescente dos valores até atingir 7,0 %, e a partir desse período houve uma tendência decrescente na abundância da *U. peregrina* atingindo até 0,5 % no início do MIS 1 (Figura 6).

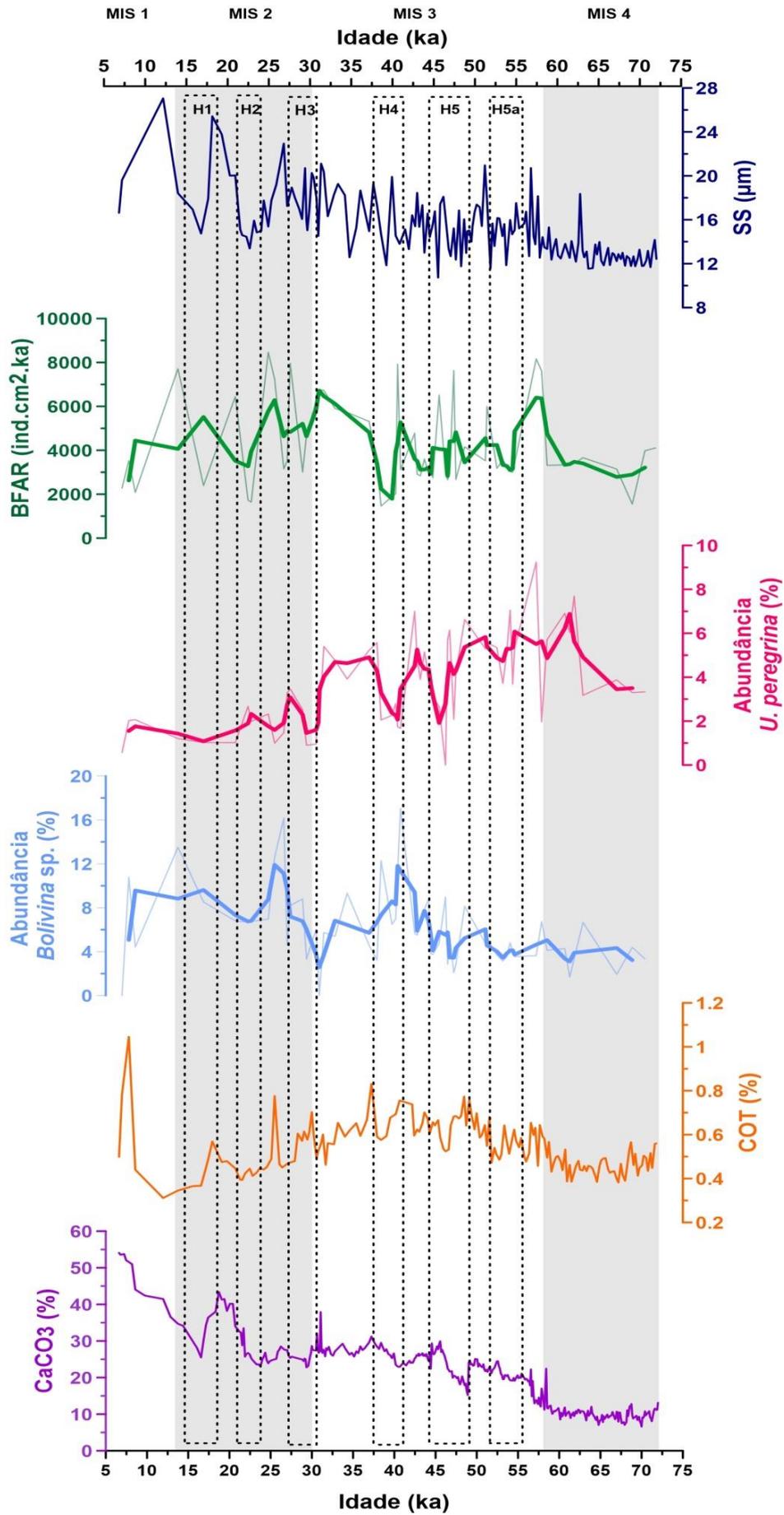


Figura 6 – Gráficos de abundância das espécies *Uvigerina peregrina* e *Bolivina* sp., BFAR, *sortable silt*, porcentagem de COT e CaCO₃ analisados no testemunho GL-1090. Os retângulos em branco representam o MIS 1 e 3, e os retângulos em cinza representam o MIS 2 e 3. Os triângulos tracejados representam os eventos Heinrich 1, 2, 3, 4, 5 e 5A, respectivamente.

A taxa de acúmulo de foraminíferos bentônicos (BFAR) no testemunho GL-1090 apresenta uma variação entre 8.468 e 1.458 ind.cm².ka, com média total de 4.195 ± 1.966 ind.cm².ka. O MIS 4 possui um BFAR com valores estáveis com uma média de 3.318 ± 736 ind.cm².ka, seguido de um pico entre o final do MIS 4 no início do MIS 3, onde chega até 8.167 ind.cm².ka (Figura 6).

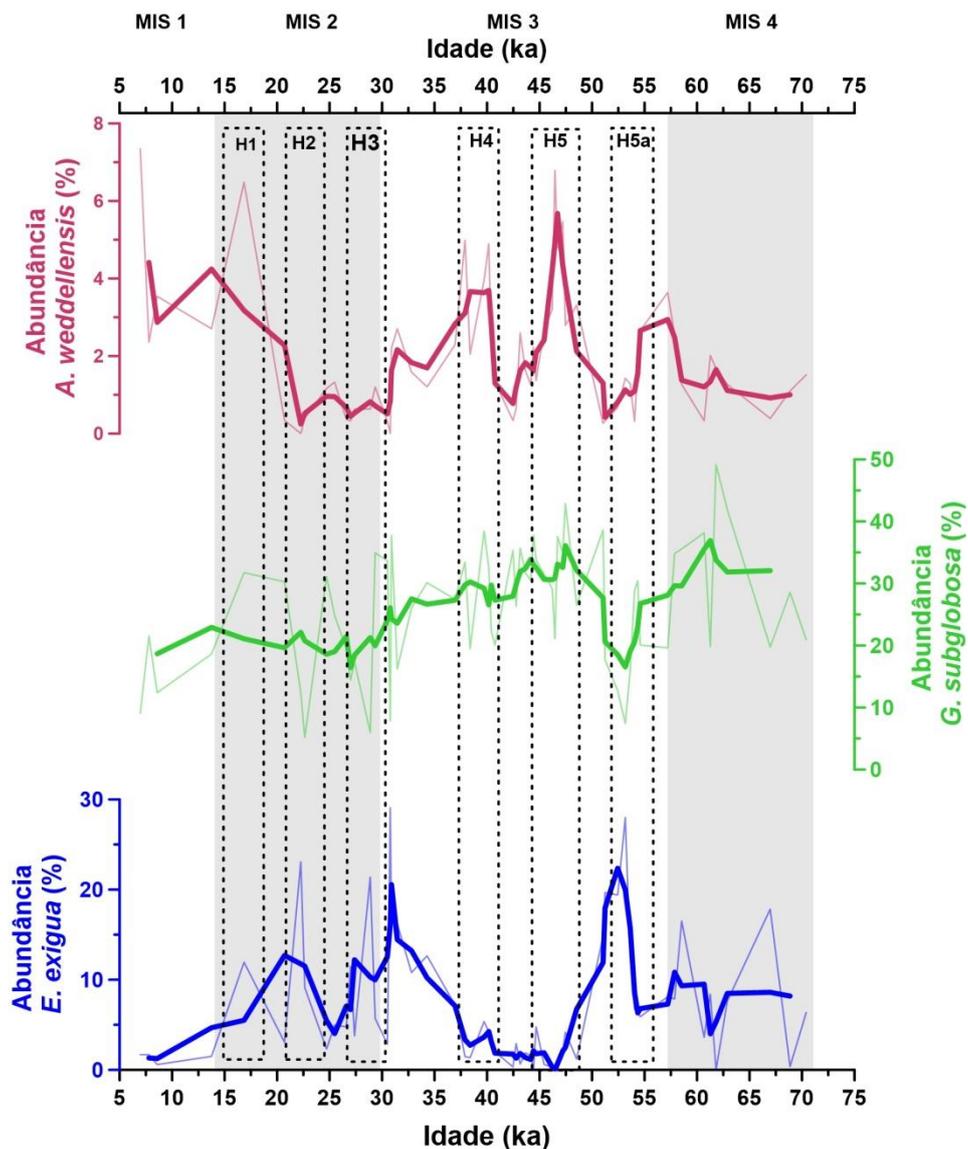


Figura 7 - Gráficos de abundância das espécies *Epistominella exigua*, *Globocassidulina subglobosa*, e *Alabaminella weddellensis*, analisadas no testemunho GL-1090. Os retângulos em branco representam o MIS 1 e 3, e os retângulos em cinza representam o MIS 2 e 3. Os triângulos tracejados representam os eventos Heinrich 1, 2, 3, 4, 5 e 5^a, respectivamente.

A abundância da espécie *Epistominella exigua* apresentou abundância entre 0 e 29,08 %, apresentando uma média de $7,17 \pm 7,32$ %. No MIS 4 encontram-se valores médios de $7,67 \pm 5,89$ %. No início do MIS 3 (53 ka) a abundância da espécie apresenta um pico de 28 %, seguido de uma queda abrupta até 34 ka, onde a abundância da espécie começa novamente a subir, mostrando outro pico em 31 ka, com o maior valor observado de 29,08 %. No MIS 2 os valores alteram entre 23 e 1,50 %, e no MIS 1 os valores são baixos próximos a 1,50 % (Figura 7).

Por outro lado, a *Globocassidulina subglobosa* foi a espécie estudada que apresentou maior abundância ao longo do testemunho, alcançando valores de até 49,16 %, e uma média de $26,16 \pm 10,19$ %. O MIS 4 se inicia com a abundância da espécie próxima a 20 %, entretanto em seguida os valores aumentam chegando aproximadamente a 40 %. Entre o MIS 4 e o MIS 3, percebe-se uma queda nos valores chegando até 7 %, seguido de um aumento em 51 ka onde alcança 40 %. A partir desse ponto, a *Globocassidulina subglobosa* apresenta uma tendência decrescente da sua abundância até o início do MIS 1 (Figura 7).

A espécie a *Alabaminella weddellensis* teve uma média da abundância de $2,03 \pm 1,73$ %, variando de 0 até 7,34 %. Durante o MIS 4 a espécie apresenta valores baixos e não muito variados, com uma média de $1,57 \pm 0,8$. Ao entrar no MIS 3 a abundância da espécie apresenta três picos, um aos 57 ka com maior valor (3,64%), outro aos 46 ka (6,7%) e por último aos 38 ka atingindo o valor de 4,9 %, seguindo uma tendência de diminuição até os 21 ka. Posteriormente a abundância da *A. weddellensis* volta a aumentar mostrando uma média de 4.4 % até o início do MIS 1 (Figura 7).

O fluxo das espécies oportunistas apresentaram uma tendência similar com a sua abundância. A *E. exigua* apresentou um fluxo com variação de $1934-0 \text{ ind.cm}^{-2}.\text{ka}^{-1}$. No MIS 4 apresentou valores médios de $345 \pm 239 \text{ ind.cm}^{-2}.\text{ka}^{-1}$. No MIS 3 a espécie apresenta um pico no início e outro no final do MIS, apresentado valores próximos a 0 entre 36 e 47 ka. Durante o MIS 2 e 1 a espécie apresenta uma tendência decrescente indo de 643 a 38 $\text{ind.cm}^{-2}.\text{ka}^{-1}$ (figura 8).

A *G. subglobosa* apresentou os maiores fluxos entre as espécies oportunistas, apresentado valores entre 2664 a 84 ind.cm⁻².ka⁻¹. No MIS 4 o fluxo tem uma média de 1188 ± 629 ind.cm⁻².ka⁻¹. Em seguida, no início do MIS 3, apresenta um pico negativo chegando a 264 ind.cm⁻².ka⁻¹. Logo, o fluxo apresenta um pico positivo em 47 ka chegando ao valor máximo de 2664 ind.cm⁻².ka⁻¹, onde começa a decair até alcançar 283 ind.cm⁻².ka⁻¹, e no final do MIS 3 as abundâncias aumentam novamente. No MIS 2 e 1 o fluxo da *G. subglobosa* mostra uma tendência decrescente (Figura 8).

A espécie *A. weddellensis* apresenta os menores fluxos entre as oportunistas, indo de 417 a 0 ind.cm⁻².ka⁻¹. O MIS 4 apresenta valores baixos durante grande parte com um pico bem acentuado no final chegando a 297 ind.cm⁻².ka⁻¹ em 57 ka. Em seguida, no início do MIS 3 apresenta um pico negativo no mesmo período da *G. subglobosa*, alcançando 9 ind.cm⁻².ka⁻¹, seguido de um pico positivo em 47 ka onde alcança o maior valor do fluxo, 417 ind.cm⁻².ka⁻¹. No final do MIS 3 a espécie apresenta outro aumento menos significativo nos valores do fluxo chegando a 181 ind.cm⁻².ka⁻¹. No início do MIS 2 os valores decaem, mas é notável um aumento a partir de 20 ka até o MIS 1 (Figura 8).

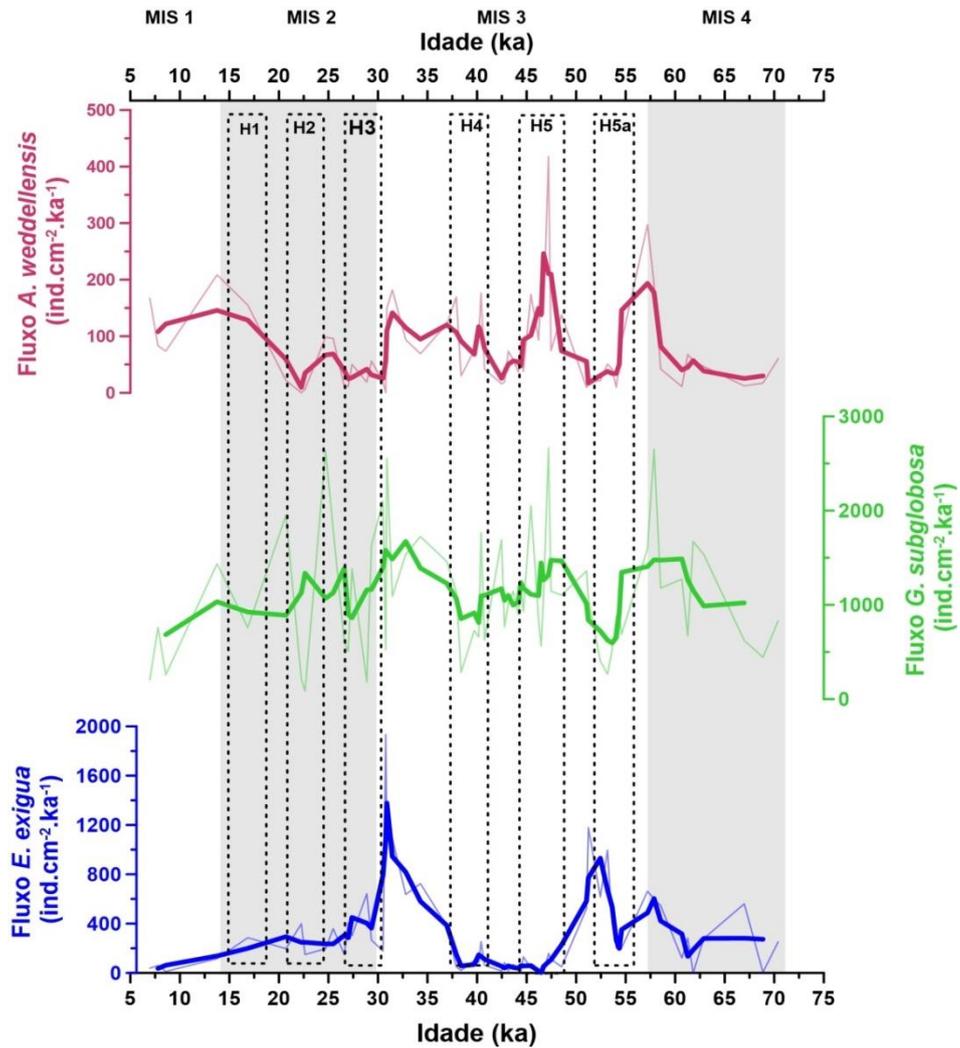


Figura 8 – Gráfico de fluxo de *Epistominella exigua*, *Globocassidulina subglobosa*, e *Alabaminella weddellensis* analisadas no testemunho GL-1090. Os retângulos em branco representam o MIS 1 e 3, e os retângulos em cinza representam o MIS 2 e 4. Os triângulos tracejados representam os eventos Heinrich 1, 2, 3, 4, 5 e 5A, respectivamente.

5. DISCUSSÃO

5.1 PRODUTIVIDADE ACUMULADA X PRODUTIVIDADE EXPORTADA AO LONGO OS ÚLTIMOS 70.000 ANOS

As assembleias foraminíferas bentônicas em todo o mundo registraram ciclos glaciais e interglaciais, os quais refletem mudanças na circulação de fundo (Thomas *et al.*, 1995; Schmiedl e Mackensen, 1997; Ohkushi *et al.*, 2000; Sun *et al.*, 2006). A produtividade primária das águas superficiais determina, em parte, o fluxo de matéria orgânica através da coluna d'água. No entanto, apenas uma porção chega ao fundo do mar e uma quantidade ainda menor é soterrada nos sedimentos (Rullkötter, 2000). A entrada de matéria orgânica, juntamente com a oxigenação da água de fundo, são os principais fatores que controlam as distribuições bentônicas no oceano profundo (Gooday, 2002; Altenbach *et al.*, 1999).

A espécie *Globocassidulina subglobosa*, espécie infaunal de pequeno tamanho, fitodetrítica e de ocorrência em sedimentos finos (Murray, 2006) apresentou as maiores abundâncias do testemunho (Figura 7). As altas abundâncias dessa espécie são comumente ligadas à habilidade dessa espécie de se reproduzir rapidamente sob a condição estressante da distribuição intensa de fitodetritos das na interface sedimento-água (Gooday *et al.*, 2010). Outros autores como Burone *et al.* (2011) encontram esta espécie em densidades muito elevadas na primeira camada superficial do sedimento da plataforma sudeste brasileira, indicando a relação da espécie com episódios de deposição de fitodetritos e rápido consumo do material orgânico na superfície do sedimento. Logo, a espécie foi destacada como indicador de água oligotrófica e bem oxigenada (Eichler *et al.*, 2008; Nagai *et al.*, 2009). No testemunho amostrado, a espécie apresentou uma tendência decrescente o que sugere uma diminuição do aporte de fitodetrítico e remineralização desde o MIS4 até o MIS1.

Gooday (1988) relatou que as espécies *Alabaminella weddellensis* e *Epistominella exigua*, possuem o protoplasma esverdeado, sugerindo que esses táxons são consumidores de fitodetritos. Essas espécies respondem a pulsos de matéria orgânica lábil o que as proporciona rápido crescimento e reprodução. Um estudo realizado por Schmiedl e Mackensen (1997), mostrou que altos fluxos de alta matéria orgânica sem fortes mudanças sazonais limitam a distribuição da *E. exigua*. Logo, os registros paleontológicos dessas espécies podem ser usados para identificar intervalos com produtividade sazonal, e conseqüentemente, deposição

sazonal de fitodetritos (Smart *et al.*, 1994). No testemunho GL-1090 encontramos tendências opostas dessas espécies, o que é interpretado por alguns pesquisadores como uma diferença sutil em suas preferências ambientais (Gooday e Turley, 1990). No noroeste da África, Fariduddin e Loubere (1997), descobriram que *A. weddellensis* era dominante em regiões de alta produtividade superficial e à medida que a produtividade reduz, a abundância dessa espécie diminui, dando espaço para o aumento da *E. exigua*. No Atlântico Norte a abundância de *A. weddellensis* foi associada a uma área de maior produtividade, enquanto a *E. exigua* foi associada a regiões de maior estacionalidade (Sun *et al.*, 2006). Ferreira *et al.* (2014), também relataram uma tendência oposta entre essas espécies ao longo de dois testemunhos na margem continental brasileira. Possivelmente a *A. weddellensis* seja mais comum durante a deposição de fitodetritos com uma alta proporção de diatomáceas em forma de agulha (King *et al.*, 1998; Ohkushi *et al.*, 2000).

Por outro lado, a abundância das espécies *G. subglobosa* e *E. exigua* apresentam uma relação inversa, o que já foi observado por outros autores (Mamo *et al.*, 2013). Nota-se um aumento geral de *G. subglobosa* enquanto ocorre a diminuição de *E. exigua* (Figura 7). Entretanto em alguns dos eventos Heinrich (H2, H3, H5 e H5a) essa relação ocorre de forma contrária, favorecendo a *E. exigua*. Essa associação pode ser explicada pelo possível favorecimento da exportação de produtividade primária durante os eventos Heinrich devido a eventos de ressurgência de massas d'água de sub-superfície. Dessa forma, a *E. exigua* e a *G. subglobosa* apresentam claramente uma relação de competição por esse carbono orgânico lábil onde a *E. exigua* é favorecida. Essa relação pode ser confirmada também pelo fluxo das espécies (Figura 8).

As espécies *G. subglobosa* e *A. weddellensis* reagem rapidamente ao carbono orgânico lábil exportado para a superfície do sedimento. Essas espécies r-estrategistas se colonizam a partir de agregados de fitodetritos na superfície do sedimento, e juntamente com a *E. exigua*, obtêm vantagem em relação as outras espécies que respondem mais devagar aos inputs de alimento (Heinz *et al.*, 2001). A tendência similar apresentada pelas abundâncias da *G. subglobosa* e da *A. weddellensis* indicam maior input fitodetrítico e remineralização durante o MIS 4 e 3 (MIS mais produtivos), que pode ser relacionado à diminuição da velocidade da AMOC (Figura 7). Entretanto, a *A. weddellensis* apresenta abundância mais elevada no fim do

MIS 2 e início do MIS 1, o que pode ser explicado possivelmente por um maior aporte de diatomáceas em forma de agulha nesse período (King *et al.*, 1998; Ohkushi *et al.*, 2000).

A *Uvigerina peregrina* é uma espécie infaunal rasa de ampla distribuição, hábito detritívoro, de ocorrência em sedimentos finos e é a espécie indicadora global de águas com alto teor de nutrientes (Murray, 2006). A espécie é descrita na literatura como táxon que possui grande afinidade com o fluxo de carbono orgânico em várias partes do mundo (Jian *et al.* 2001; Leuschner 2005; Schmiedl e Mackensen 1993) incluindo a plataforma continental da costa brasileira (Nagai *et al.*, 2010). Além disso, a espécie também foi descrita como indicadora de eventos de ressurgência (Eichler, *et al.* 2008) e diminuição do oxigênio nas águas de fundo (Murdmaa *et al.*, 2010). A depleção do oxigênio na interface sedimento-água pode ser causada pelo aumento da atividade biológica, que é desencadeada principalmente por grandes fluxos de matéria orgânica (Pedersen *et al.*, 1988). No testemunho GL-1090 a espécie apresentou o mesmo comportamento geral que a *G. subglobosa*, apresentando uma tendência de diminuição na abundância dos últimos 72ka até os dias atuais (Figura 6), indicando os MIS 4 e 3 com maior produtividade, mas MIS 2 e 1 menos produtivos.

Por outro lado, as espécies do gênero infaunal intermediário/profundo *Bolivina* são consideradas tolerante ao estresse, suportando uma eutrofização crescente (Bernhard e Sem Gupta, 1999). Bornmalm (1997) e Jorissen (1999) indicam que todas as espécies do gênero *Bolivina* são indicadores de baixas concentrações de oxigênio, sendo mais hipoxicas que a *U. peregrina* (Balestra *et al.*, 2017). No testemunho GL-1090, esta espécie apresentou uma tendência crescente na sua abundância do MIS 4 ao 1, responde de forma contrária a *U. peregrina* (Figura 6). O pico que a espécie apresenta na metade do MIS 3 pode ser indicativo uma de uma produtividade acentuada no período, gerando alta remineralização e condições de menores concentrações de oxigênio de fundo, favorecendo as espécies do gênero *Bolivina*. Esse aumento de produtividade pode ser confirmado também pelos maiores teores de COT no período (Figura 6). Por outro lado, durante o MIS 1 e 2 o aumento da abundância da espécie possivelmente está relacionado a outras questões não relacionadas à baixa oxigenação, como por exemplo, o aumento das condições de estresse pela intensificação da velocidade de massas de fundo mostradas pelo aumento do SS (figura 6).

A taxa de acumulação de foraminíferos bentônicos (BFAR) foi sugerida como *proxy* de paleoprodutividade (Herguera e Berger, 1991). No entanto, outros estudos indicam que a

obtenção de uma estimativa quantitativa da produção primária ou da exportação de carbono orgânico lábil a partir de valores de BFAR pode ser limitada por vários fatores, incluindo a dissolução do carbonato de cálcio e mudanças na taxa de sedimentação (Jorissen *et al.*, 2007). A falta de relação entre o índice BFAR no testemunho GL-1090 e demais *proxies* de produtividade sugere que as mudanças na taxa de sedimentação ao longo do testemunho possam estar interferindo na resposta do BFAR, impedindo assim sua utilização na reconstrução das mudanças tróficas da Bacia de Santos com o índice.

5.2 CIRCULAÇÃO DE FUNDO E CICLO DO CARBONO DA BACIA DE SANTOS

A Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) é uma importante massa d'água de fundo gerada pela conversão de águas quentes a águas frias na parte superior da AMOC (Worthington, 1976). Estudos anteriores que usaram *proxies* de nutrientes como traçadores de massas d'água (como o $\delta^{13}\text{C}$) indicam, uma redução no volume da APAN durante o último máximo glacial (Oppo e Curry, 2012). Esse fato associado à mudanças no transporte de calor entre Atlântico Sul e Norte indicam um enfraquecimento da AMOC no período glacial (Bohm *et al.*, 2014).

O enfraquecimento da circulação da AMOC durante o período glacial também pode ser observado no resultado de outros *proxies*. O tamanho médio do grão do sedimento da fração *sortable silt* (SS) atua como um proxy físico para determinar a velocidade de fluxo das correntes de fundo e tem sido amplamente utilizado no Oceano Atlântico. Como as partículas muito finas tentem a se agregar, o tamanho de 10-63 μm foi proposto como a faixa de tamanho representativa para examinar as mudanças nas velocidades da água de fundo pretéritas. Segundo Praetorius *et al.* (2008), com uma circulação de fundo mais enfraquecida, os sedimentos mais finos da fração SS conseguem ser depositados. Dessa forma, nota-se uma tendência do aumento do tamanho da fração SS desde o último glacial até os dias atuais. Durante os eventos Heinrich o SS apresenta picos negativos indicando redução nas velocidade de fundo, apresentando um pico negativo bem acentuado no H2 e H1.

A grande maioria dos foraminíferos bentônicos utilizam CaCO_3 para formar sua carapaça, com exceção dos aglutinantes (Blackmon e Todd, 1959). Logo, a disponibilidade de carbonato durante o MIS 4 pode ter influenciado na precipitação das carapaças do foraminíferos e/ou dissolução de testas depositadas (Costa *et al.*, 2016). Mesmo com baixos

teores de CaCO_3 no MIS 4, a alta remineralização de material orgânico indicado pela abundância de *G. subglobosa* e *U. peregrina* confirma o acúmulo de carbonato nas águas de fundo. Espécies oportunistas não indicam alta exportação vertical de carbono neste período, confirmando a estratificação vertical de massas d'água pela redução da circulação da AMOC e o transporte advectivo do carbono. No entanto, durante o MIS 3, as espécies oportunistas *A. weddellensis* e *E. exigua* mostram um aumento da exportação vertical de carbono lábil. Assim, não somente o carbono orgânico do transporte advectivo (lateral), mas também o carbono orgânico exportado não remineralizado contribuíram para o aumento do conteúdo de carbono orgânico nos sedimentos. O aumento da remineralização do carbono durante a metade do MIS 3 pode ter ocasionado a diminuição da oxigenação de fundo, favorecendo abundância das espécies do gênero *Bolivina*. No MIS 2 há um aumento da hidrodinâmica de fundo o que reduz a produtividade pois não permite que grande parte do carbono orgânico lábil chegue ao fundo do oceano pelos intensos fluxos das correntes, reduzindo assim a abundância de algumas espécies como *U. peregrina* e *E. exigua*. No MIS 1 a hidrodinâmica de fundo fica ainda mais intensa o que impede a deposição de carbono orgânico lábil, o que pode ser confirmado pela baixa abundância das espécies oportunistas nesse período. .

O carbono orgânico acumulado nos sedimentos marinhos (representado pelo teor de COT) indica o MIS 3 como um período de maior produtividade devido a entrada e acúmulo de material orgânico. Por outro lado, mesmo ainda sendo um estágio isotópico do período glacial, o MIS 2 apresenta menores teores de COT, o que poderia ser explicado pelo aumento da hidrodinâmica das águas de fundo e início do reestabelecimento da circulação da AMOC. Essa intensificação pode ter impedido a sedimentação de carbono orgânico exportado.

Dessa forma, nos períodos glaciais (MIS 4 e 3) a baixa hidrodinâmica de fundo pela desintensificação da AMOC propicia uma maior deposição de fitodetritos e acúmulo de material orgânico nos sedimentos. Por outro lado, no MIS 2 e 1 (interglacial atual) o transporte advectivo intensificado, não favorece o acúmulo de material orgânico na interface sedimento-água. Com isso, as espécies oportunistas apresentam uma maior abundância durante os glaciais, devido maior exportação de matéria orgânica nesse período. Assim, uma maior eficiência da bomba biológica é observada durante períodos de uma AMOC menos intensa no último glacial (Figura 9). Por outro lado, as tendências similares da *U. peregrina* com a *G. subglobosa* e *A. weddellensis*, mostram uma relação direta entre essas espécies.

Logo, mesmo que as espécies oportunistas remineralizem rapidamente o material orgânico na superfície do sedimento, a quantidade exportada é muito grande em determinados períodos como o MIS 3, o que possibilita que uma quantidade significativa de carbono orgânico seja acumulado no sedimento, permitindo grandes abundâncias de *U. peregrina*.

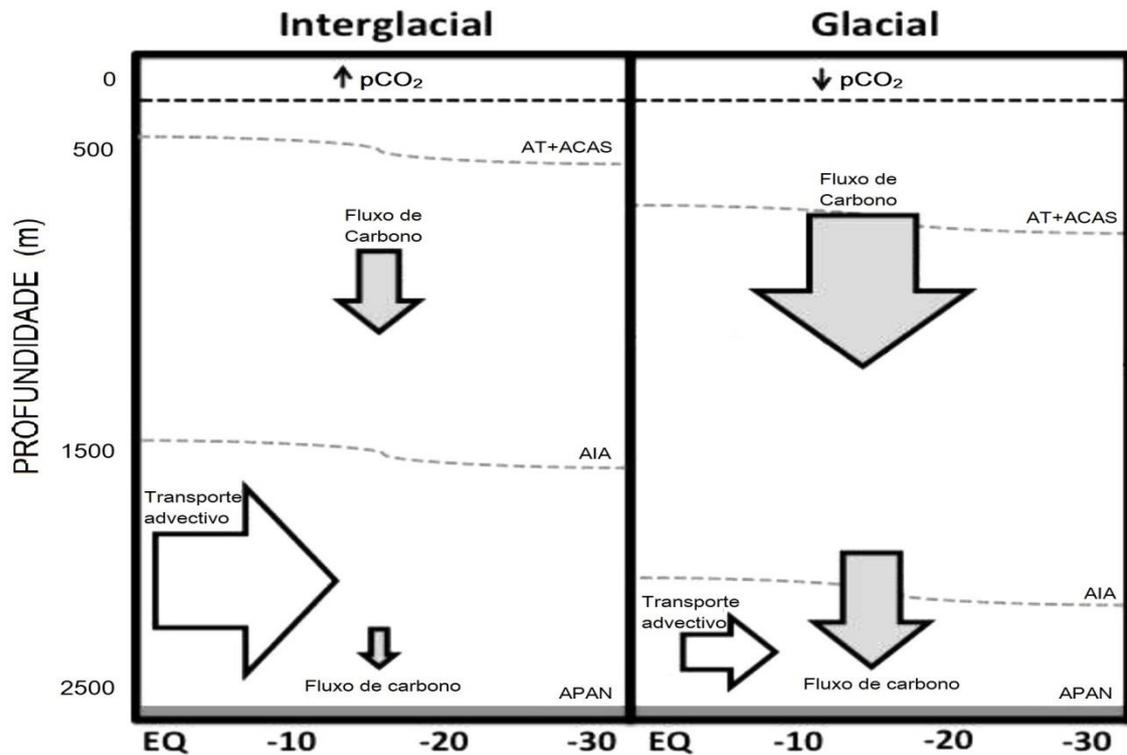


Figura 9 – Modelo conceitual proposto que resume a circulação profunda na margem oeste do Atlântico Sul desde o último interglacial. A espessura das setas cinzas indica a quantidade de material orgânico em deposição na zona eutrófica e no sedimento. A espessura das setas brancas representa a intensidade da circulação da água de fundo/transporte advectivo. AT – Água Tropical, ACAS – Água Central do Atlântico Sul, APAN – Água profunda do Atlântico Norte e AGIAN – Água Glacial Intermediária do Atlântico Norte.

6. CONCLUSÃO

As análises realizadas no testemunho GL-1090 permitiram o estudo das mudanças do carbono orgânico exportado na borda sudoeste do Atlântico desde os últimos 72 mil anos e as respostas desse processo às variações da circulação de fundo.

- As espécies oportunistas *G. subglobosa* e *A. weddellensis* responderam rapidamente à exportação do carbono orgânico para interface água-sedimento, se reproduzindo rapidamente e apresentando grande abundância em períodos mais produtivos e de maior remineralização (períodos glaciais).
- A espécie *E. exigua* também responde de forma rápida a exportação de carbono orgânico, entretanto, possui uma relação de competição com a *G. subglobosa*.
- A *U. peregrina* e as espécies do gênero *Bolivina* não apresentaram abundâncias similares ao longo do testemunho. No entanto a tendência similar de *U. peregrina* e *G. subglobosa* sugere que a primeira espécie representa condições de maior produtividade no testemunho. Mesmo que o carbono orgânico seja remineralizado na interface água-sedimento, em períodos mais produtivos (períodos glaciais), o carbono orgânico é acumulado no sedimento.
- As tendências de abundância das espécies estudadas podem estar relacionada com as mudanças no transporte advectivo das massas de fundo. Uma vez que em períodos glaciais ocorre a desintensificação da AMOC, uma menor velocidade das massas de fundo permite maior exportação de carbono orgânico para a interface sedimento-água, onde as espécies r-estrategistas conseguem se reproduzir rapidamente aumentando sua abundância durante esses períodos.

7. REFERÊNCIAS

- Bernhard, J.M., Sen Gupta, B.K. Foraminifera of oxygen depleted environments. In: Sen Gupta, B.K. (Ed.), *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers, Great Britain, pp. 201–216, 1999.
- Blackmon, P. D. & Todd, R. Mineralogy of Some Foraminifera as Related to Their Classification and Ecology. *Journal of Paleontology*, 33, 1–15. 1959.
- Bohm, E., Lippold, J., Gutjahr, M., Frank, M., Blaser, P., Antz, B., Fohlmeister, J., Frank N., Andersen, M.B. e Deininger, M. Strong and deep Atlantic meridional overturning circulation during the last glacial cycle. *Nature*. 10.1038, 2014.
- Bornmalm, L. Taxonomy and paleoecology of late Neogene benthic foraminifera from the Caribbean Sea and eastern equatorial Pacific Ocean. *Fossils Strata* 41, 11–80, 1997.
- Corliss, B. H., Emerson, S. Distribution of rose Bengal stained deep-sea benthic foraminifera from the Nova Scotian continental margin and Gulf of Maine. *Deep-Sea Research*, v. 37, p. 381-400, 1990.
- Costa, K.B., Cabarcos, E., Santarosa A.C.A., Battaglin, B.B.F., Toledo, F.A.L. A multiproxy approach to the climate and marine productivity variation along MIS 5 in SE Brazil: A comparison between major components of calcareous nannofossil assemblages and geochemical records. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 449, 275-288, 2016.
- Curry, W.B., Oppo, D.W. Glacial water mass geometry and the distribution of $\delta^{13}C$ of ΣCO_2 in the western Atlântic Ocean. *Paleoceanography*, 20, 1-13. 2005.
- Corliss, B.H., Brown, C.W., Sun, X., Showers, W.J. Deep-sea benthic diversity linked to seasonality of pelagic productivity. *Deep-Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 56(5), 835-841, 2009.
- Eichler, P. P. B., Gupta, B. K. S.; Eichler, B. B.; Braga, E. S.; Campos, E. J. Benthic foraminiferal assemblage of the South Brazil: Relationship to water masses and nutrient distributions. *Continental Shelf Research*, v. 28, p. 1674-1686, 2008.

Emiliani, C. Pleistocene temperatures. University of Chicago, 1995.

Enge, A.J., Nomaki, H., Ogawa, N.O., Witte, U., Moeseneder, M.M., Lavik, G., Ohkouchi, N., Kitazato, H., Kučera, M., Heinz, P. Response of the benthic foraminiferal community to a simulated short-term phytodetritus pulse in the abyssal North Pacific. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 438(1992), 129-142, 2011.

Fariduddin, M., Loubere, P. The surface ocean productivity response of deeper water benthic foraminifera in the Atlantic Ocean. *Mar. Micropaleontol.* 32, 289–310, 1997.

Ferreira, F., Frontalini, F., Leão, C., Leipnitz, I.I. Changes in the water column structure and paleoproductivity in the western South Atlantic Ocean since the middle Pleistocene: evidence from benthic and planktonic foraminifera. *Quat. Int.* 352, 111–123, 2014.

Gooday, A.J. A response by benthic Foraminifera to the deposition of phytodetritus in the deep sea. *Nature* 332, 70–73. 1988.

Gooday, A.J., Turley, C.M. Responses by benthic organisms to inputs of organic material to the ocean floor: a review. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 331, 119–138, 1990.

Gooday, A.J., Malzone, M.G., Bett, B.J., Lamont, P.A. Decadal-scale changes in shallow-infaunal foraminiferal assemblages at the Porcupine Abyssal Plain, NE Atlantic. *Deep-Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 57(15), 1362-1382, 2010.

Guichard, S., Jorissen, F., Bertrand, P., Gervais, A., Martinez, P., Peypouquet, J. P., Pujoul, C., Vergnaud-Grazzini, C. Foraminifères benthiques et paléoproduktivité: réflexions sur une carotte de l'upwellinf (NW African). *Académie des sciences, Paris*, v. 325, p. 65-70, 1997.

Hallock, P., Lidz, B. H., Cockey-Burkhard, E. M. & Donnelly, K. B. Foraminifera as bioindicators in coral reef assessment and monitoring: The foram index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 81, 221–238. 2003.

Heinrich, H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Res.* 29: 142–152, 1988.

- Heinz, P. Response of deep-sea benthic foraminifera from the Mediterranean Sea to simulated phytoplankton pulses under laboratory conditions, *J. Foraminifer. Res.* 31(3), 210-227, 2001.
- Herguera, J.C., Berger, W.H. Paleoproductivity from benthic foraminifera abundance: Glacial to postglacial change in the west-equatorial Pacific. *Geology*, 19, 1173–1176. 1991.
- Hodell, D.A.; Channell, James E. T.; Curtis, Jason H.; Romero, Oscar E.; Röhl, Ursula. Onset of “Hudson Strait” Heinrich events in the eastern North Atlantic at the end of the middle Pleistocene transition (~640 ka)? *Paleoceanography*. 23 (4), 2008.
- Jian, Z., Huang, B., Kuhnt, W., Lin, H. Late Quaternary upwelling intensity and east asian monsoon forcing in the South China Sea. *Quaternary Research*, v. 55, p. 363-370, 2001.
- Jorissen, F. J., De Stigter, H. C., Widmark, J. G. V. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Marine Micropaleontology*, v. 26, p. 3-15, 1995.
- Jorissen, F.J. Benthic foraminiferal microhabitats below the sediment–water interface. In: Sen Gupta, B.K. (Ed.), *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers, Great Britain, pp. 161–179, 1999.
- Jorissen, F. J., Fontanier, C. & Thomas, E. *Paleoceanographical Proxies Based on Deep-Sea Benthic Foraminiferal Assemblage Characteristics*. Elsevier, 263–325. 2007.
- King, S.C., Murray, J.W., Kemp, A.E.S. Palaeoenvironments of deposition of Neogene laminated diatom mat deposits from the eastern equatorial Pacific from studies of benthic foraminifera. *Micropaleontol.* 35, 161–177, 1998.
- Lisiecki, L.E. e Raymo, M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, VOL. 20, PA1003, 2005.
- Murdmaa, I. O., Kazarina, G. H.; Beaufort, L., Ivanona, E. V.; Emelyanov, E. M., Kravtsov, V. A., Alekhina, G. N., Vasileva, V. E. Upper Quaternary laminated sapropelic sediments from the continental slope of Baja California. *Litologiya Poleznye Iskopaemye*, v. 2, p. 171-191, 2010.

Murray, J. W. Ecology and Applications of Benthic Foraminifera. Cambridge University Press. 2006.

Nagai, R. H., Mello e Sousa, S. H.; Lourenço, R. A., Bicego, M. C., Mahiques, M. M. Paleoproductivity changes during the Late Quaternary in the Southeastern Brazilian upper continental margin of the Southwestern Atlantic. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58, p. 31-41, 2010.

Ohga, T., Kitazato, H., Seasonal changes in bathyal foraminiferal populations in response to the flux of organic matter. *Terra Nova*, 9, 33–37. 1997.

Ohkushi, K., Thomas, E., Kawahata, H., Abyssal benthic foraminifera from the northwestern Pacific (Shatsky Rise) during the last 298 kyr. *Marine Micropaleontology*, 38, 199-147. 2000.

Oppo, D.W. e Curry, W.E. Deep Atlantic Circulation During The Last Glacial Maximum and Deglaciation. *Nature Education Knowledge* 3(10):1, 2012.

Pedersen, T. F., Pickering, M., Vogel, J. S., Southon, J. Nelson, D. E., The response of benthic foraminifera to productivity cycles in the eastern equatorial Pacific: fauna and geochemical constraints on glacial bottom water oxygen levels. *Paleoceanography* 3, 157–168, 1988.

Praetorius, S. K., McManus, J. F., Oppo, D. W., Curry, W. B. Episodic reductions in bottom-water currents since the last ice age. Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, 2008.

Rühlemann, C., Mulitza, S., Müller, P.J., Wefer, G., Zahn, R. Warming of the tropical Atlantic Ocean and slowdown of thermohaline circulation during the last deglaciation. *Nature*, 402, 511-514. 1999.

Santos, P.T., Lessa O.D., Venancio, I.M., Chiessi, C.M., Mulitza, S., Kuhnert, H., Machado, T., Costa, K.B., Toledo, F., Dias, B.B., Albuquerque, A.L.S. Prolonged warm of the Brazil Current precedes deglaciation. *Earth and Planetary Letters*, 463, 1-12. 2017.

Sarnthein, M. et al. Changes in east Atlantic deepwater circulation over the last 30,000 years: Eight time slice reconstructions. *Paleoceanography* 9, 209–267, 1994.

Schmiedl, G., Mackensen, A. Late Quaternary paleoproductivity and deep water circulation in the eastern South Atlantic Ocean, evidence from benthic foraminifera. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 130, 43–80, 1997.

Silveira, I.C.A., Schmidt, A.C.K., Campos, E.J.D., Godoi, S.S. & Ikeda, Y., A Corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 48, 171-183. 2000.

Smart, C.W., King, S.C., Gooday, A.J., Murray, J.W., Thomas, E. A benthic foraminiferal proxy of pulsed organic matter paleofluxes. *Mar. Micropaleontol.* 23, 89–99, 1994.

Sun, X., Corliss, B.H., Brown, C.W., Showers, W.J. The effect of primary productivity and seasonality on the distribution of deep sea benthic foraminifera in the North Atlantic. *Deep-Sea Res. I* 53, 28–47, 2006.

Thomas, E., Booth, L., Maslin, M., Shackleton, N.J. Northeastern Atlantic benthic foraminifera during the last 45,000 years: changes in productivity seen from the bottom up. *Paleoceanography*, 10, 545–562. 1995.

Toggweiler, J.R. Variation of atmospheric CO₂ by ventilation of the ocean's deepest water. *Paleoceanography*, 14, 571-588. 1999.

Van Der Zwaan, G. J., Duijnste, I. A. P., Dulk, M., Ernst, S. R., Jannink, N. T., Kouwenhoven, T. J. Benthic foraminifera: proxies or problems? A review of paleoecological concepts. *Earth-Science Reviews*, v. 46, p. 213-236, 1999.

Worthington, L. V. On the North Atlantic Circulation .John Hopkins Press, Baltimore, London, 1976.

8. APÊNDICE I – TAXONOMIA

Apêndice taxonômico das espécies de foraminíferos bentônicos do testemunho GL-1090

Espécie

<i>Alabaminella weddellensis</i>	Earland, 1936
<i>Bolivina sp.</i>	d'Orbigny, 1843
<i>Epistominella exigua</i>	Brady, 1884
<i>Globocassidulina subglobosa</i>	Brady, 1881
<i>Uvigerina peregrina</i>	Cushman, 1923

