

Laura Kraft

EAH5003 - Redação Científica (2023-1)

Atividade final – Parte 1: Primeira versão do artigo

Título do artigo: Impactos da Terminação II no oeste do Atlântico equatorial e nordeste da América do Sul

Objetivo do artigo: Apresentar uma reconstituição de alta resolução temporal do aporte de sedimentos terrígenos proveniente da bacia de drenagem do rio Parnaíba e depositados na margem continental brasileira ao redor de 1°S com base em análises de FRX de sedimento total.

Veículo escolhido

- Revista: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology
- Editora: Elsevier
- Fator de impacto: 3565
- Qualis: A1
- Áreas de conhecimento: Geociências, Geologia Paleoambiental, e Paleoclimatologia
- Link da página de instruções:
<https://www.elsevier.com/journals/palaeogeography-palaeoclimatology-palaeoecology/0031-0182/guide-for-authors>
- Conselho editorial: https://www.sciencedirect.com/journal/palaeogeography-palaeoclimatology-palaeoecology/about/editorial-board?_ga=1*17fgz3i*_ga*MjA5ODI1MDU1My4xNjgzMTU1MDA2*_ga_4R527DM8F7*MTY4MzIzMDU2MC4zLjEuMTY4MzIzMDU5MS4wLjAuMA
- Editor: Mary Elliot

IMPACTOS DA TERMINAÇÃO II NO OESTE DO ATLÂNTICO EQUATORIAL E NORDESTE DA AMÉRICA DO SUL

*Laura Kraft*¹
*Marília de Carvalho Campos Garcia*²
*Cristiano Mazur Chiessi*³

RESUMO

O Nordeste da América do Sul é considerado um hotspot de mudanças climáticas devido à sua alta vulnerabilidade biológica e social às mudanças climáticas. A precipitação sobre esta região é altamente dependente do gradiente meridional das temperaturas da superfície do mar do Oceano Atlântico que controlam a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). O gradiente meridional das temperaturas da superfície do mar no Oceano Atlântico, por sua vez, é influenciado pela força da circulação meridional do Atlântico (CRMA). Considerando que a CRMA enfraqueceu ao longo das últimas décadas e deve enfraquecer ainda mais nas próximas décadas, conhecer antecipadamente os efeitos dessa redução sobre a precipitação do Nordeste do Brasil é uma questão crucial. No passado existiram eventos abruptos em escala milenar de enfraquecimento da CRMA conhecidos como Heinrich Stadials (HS) e ocorreram durante o final do Quaternário, sua investigação detalhada tem sido o foco de estudos recentes. Uma vez que o atual enfraquecimento do CRMA ocorre sob condições interglaciais (ou seja, o Holoceno), seria ideal conhecer os efeitos de eventos passados de enfraquecimento da CRMA sob condições de contorno semelhantes. HSs não foram relatados para o Holoceno. Em vez disso, alguns HS (HS10) foram registrados durante Estágios de Isótopos Marinhos (MIS) 5 (ou seja, o último período interglacial na história geológica da Terra). O HS10 é único neste contexto, pois foi o primeiro HS ocorrido após a penúltima deglaciação, sendo um estudo de enfraquecimento da CRMA. Aqui nós investigamos a resposta da superfície e profundidade do Atlântico Equatorial Ocidental, bem como a precipitação do NE da América do Sul ao HS10 com base em dados isotópicos estáveis de carbono e oxigênio de foraminíferos e dados elementares principais de sedimentos obtidos de um testemunho sedimentar marinho coletado no NE da América do Sul. Nossos novos registros indicam redução da ventilação em águas profundas e aumento da estratificação da coluna de água superior no Atlântico equatorial ocidental, sincronizados com o aumento da precipitação no NE da América

¹ Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo. Contato: laurakraft@usp.br

² Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Contato: marilia.carvalho.campos@usp.br

³ Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo. Contato: chiessi@usp.br

do Sul. Interpretamos esta cadeia de processos à luz das mudanças na intensidade CRMA e seus reflexos sobre o Atlântico equatorial ocidental e a ZCIT.

Palavras chaves: HS10, Terminação II, Zona de Convergência Intertropical e Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico.

ABSTRACT

Northeastern (NE) South America is considered a climate change hotspot due to its high biological and social vulnerability to climate change. Precipitation over this region is highly dependent on Atlantic Ocean meridional gradient of sea surface temperatures that control the Intertropical Convergence Zone (ITCZ). The meridional gradient of sea surface temperatures in the Atlantic Ocean, in turn, are influenced by the strength of the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC). Considering that the AMOC has weakened over the past few decades and is projected to weaken even more in the coming decades, knowing in advance the effects of this reduction over NE South America precipitation is a crucial issue. Several abrupt millennial-scale events of weak AMOC known as Heinrich stadials (HS) occurred during the late Quaternary and their detailed investigation has been the focus of recent studies. Since the current weakening of the AMOC occurs under interglacial conditions (i.e., the Holocene), it would be ideal to know the effects of past events of weak AMOC under similar boundary conditions. HSs have not been reported for the Holocene. Instead, some HS (i.e., HS10) were registered during substages of Marine Isotope Stage (MIS) 5 (i.e., the last interglacial period in the Earth's geological history). HS10 is unique in this context since it was the first HS that occurred after the penultimate deglaciation, being an ideal case study of the occurrence of an HS under warm boundary conditions. Here we investigate the response of the surface and deep western equatorial Atlantic as well as NE South America precipitation to HS10 based on foraminiferal carbon and oxygen stable isotopic data and bulk sediment major elemental data obtained from a marine sediment core collected off NE Brazil. Our new records indicate reduced deep-water ventilation and increased upper water column stratification in the western equatorial Atlantic synchronous to increased precipitation over NE South America. We interpret this chain of processes in light of changes in the AMOC intensity and their reflexes over the western equatorial Atlantic and the ITCZ.

Key-words: HS10, Termination II, Intertropical Convergence Zone, Atlantic Meridional Overturning Circulation.

DESTAQUES

- Redução da ventilação em águas profundas.
- Aumento da estratificação da coluna de água superior no Atlântico equatorial ocidental.
- Aumento da precipitação no NE da América do Sul.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas podem ser consideradas um dos maiores desafios para as atuais e próximas gerações, uma vez que em grande parte dos casos seus impactos ainda são desconhecidos. Assim, a preocupação com esses fenômenos tem se mostrado crescente nas últimas décadas. Grandes eventos de mudanças climáticas aconteceram ao longo da história geológica da Terra. Aprofundar o conhecimento a respeito desses eventos é essencial para melhor entender as mudanças climáticas em curso (TIERNEY, 2019). Diante disso, diversos estudos buscam no passado as causas e efeitos de mudanças climáticas como forma de compreender a variabilidade natural do sistema climático, aumentando assim, as chances de prever o clima futuro (IPCC, 2021). Projeções climáticas para a América do Sul apontam que as regiões tropicais serão as que mais sofrerão com as mudanças climáticas até o final do século XXI. Modelos climáticos regionais e globais sugerem um aumento generalizado da temperatura e mudanças nos padrões de precipitação nessas regiões (AMBRIZZI et al., 2007; LIU et al., 2020; PBMC, 2020). Tais mudanças tem o potencial de impactar de forma negativa ecossistemas e sociedades podendo resultar em aumento da severidade de ondas de calor, épocas de estiagem, inundações, deslizamentos, dentre outros (PBMC, 2020).

Dois dos principais elementos do sistema climático que estão sendo afetado pelas mudanças climáticas são: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (CRMA). A CRMA é a circulação oceânica de larga escala responsável por levar calor do Atlântico Sul para o Atlântico Norte, exercendo grande influência sobre este oceano bem como sobre os continentes adjacentes (BRYDEN; LONGWORTH; CUNNINGHAM, 2005; RAHMSTORF et al., 2015; ARANTES, 2016). Recentemente, essa circulação foi incluída como um dos elementos do sistema climático que estão próximos de atingir um limiar crítico (LENTON et al., 2008). Enquanto o 6º Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas concluiu que é pouco provável que a CRMA passe por uma mudança abrupta ou colapso no século XXI (IPCC, 2021), alguns estudos sugerem que os modelos

climáticos usados para prever tal comportamento podem estar superestimando a estabilidade dessa circulação (e.g. BAKKER et al., 2016; LIU et al., 2017). O recente aumento da temperatura média global bem como do aporte de águas de baixa salinidade nas altas latitudes do Atlântico Norte estão influenciando para que haja uma redução da sua intensidade (CAESAR et al., 2021; CAESAR et al., 2021).

Na América do Sul tropical, diversos sistemas meteorológicos atuam na geração de chuvas, ZCIT um dos mais importantes, esse sistema apresenta um padrão de migração meridional sazonal, de acordo com as mudanças no gradiente de temperatura inter-hemisférica (UVO, 1989; WALISER e GAUTIER, 1993; FERREIRA, 1996; ABREU et al, 2019).

Um enfraquecimento/colapso da CRMA teria marcante impacto no clima, na fauna e flora globais, uma vez que implica na redução do transporte de calor superficial rumo às altas latitudes do Atlântico Norte e seu consequente acúmulo no Atlântico Sul, alterando, portanto, o gradiente térmico entre os hemisférios e a posição média latitudinal da ZCIT, com drásticas consequências tanto em escala global quanto para o clima dos continentes adjacentes (LIU et al., 2020; RAHMSTORF et al., 201; LENTON, 2013; PATZ et al., 2005; THOMAS et al., 2004).

Assim, um conhecimento detalhado sobre períodos pretéritos durante os quais a taxa e/ou magnitude das mudanças na CRMA foram, até certo ponto, comparáveis às mudanças presentes e futuras é de fundamental importância. A Terminação II (penúltima transição glacial-interglacial), que ocorreu entre ca. 120 e 110 mil anos antes do presente, é provavelmente um dos eventos análogos mais recentes da história geológica da Terra que propicia tal oportunidade (CHENG et al., 2009; LISIECKI e RAYMO, 2005). Entretanto, registros paleoclimáticos de alta resolução disponíveis para esse período de tempo são relativamente escassos.

Nesse contexto, o oeste do Atlântico equatorial é particularmente interessante, pois (i) está sob a influência da Corrente Norte do Brasil (CNB), que compreende um ramo fundamental da CRMA e, portanto, é sensível a variações na sua intensidade e (ii) está sujeito ao aporte de sedimentos terrígenos oriundos do NE da América do Sul, que é controlado pela posição da ZCIT que, por sua vez, é sensível a variações na intensidade da CRMA (CAMPOS et al. submetido; CHIESSI et al., 2021; MULITZA et al., 2017). No entanto, até o presente momento, nenhum registro marinho proveniente dessa região do Atlântico recobre a Terminação II com resolução temporal adequada para tratar desses temas (CHENG et al., 2013; GOVIN et al., 2014).

Para resolver esse problema, apresentamos novos dados isotópicos estáveis de carbono e oxigênio de foraminíferos e dados elementares principais de sedimentos obtidos de um núcleo de sedimento marinho coletado no talude continental do oeste do Atlântico equatorial próximo a desembocadura do rio Parnaíba afim de avaliar os impactos da Terminação II no oeste do Atlântico equatorial bem como no NE da América do Sul. Nossos novos registros indicam redução da ventilação em águas profundas e aumento da estratificação da coluna de água superior no Atlântico equatorial ocidental, sincronizados com o aumento da precipitação no NE do Brasil.

2. CONFIGURAÇÃO REGIONAL

O hidroclima no NE da América do Sul é controlado principalmente pela migração meridional da ZCIT. A ZCIT é um dos sistemas meteorológicos de larga escala mais importante que atua nos trópicos e é considerada crucial na caracterização de diversas condições climáticas dessa região (MOURA e VITORINO, 2012; FERREIRA, 1996). Ela é definida como uma zona de intensa atividade convectiva localizada próxima à faixa equatorial. Sua formação se dá através da interação, não necessariamente ao mesmo tempo, de um conjunto de características atmosféricas e oceânicas, como: a zona de confluência dos ventos alísios de sudeste (SE) e NE; a região do cavado equatorial (chamado cavado do Nordeste); a zona de máxima temperatura da superfície do mar; a zona de máxima convergência de massas de ar e a banda de máxima convergência de nuvens convectivas (UVO, 1989; FERREIRA, 1996). A interação entre esses fenômenos, sobretudo a confluência dos ventos alísios de SE e NE, dá origem a movimentos ascendentes de ar quente e úmido que, ao entrar em contato com temperaturas mais frias na atmosfera, sofre resfriamento e condensação ocasionando regiões de baixas pressões atmosféricas, intensa atividade convectiva e precipitação (UVO, 1989; FERREIRA, 1996; WALISER e GAUTIER, 1993; CARVALHO e OYAMA, 2013; SILVA et al, 2017). Em escala de tempo sazonal, a ZCIT migra em direção ao hemisfério de maior aquecimento, i.e. o hemisfério de verão (AIMOLA e MOURA, 2016).

Além disso, em escala planetária, a ZCIT está localizada no ramo ascendente da célula de Hadley e atua na transferência de calor e umidade dos níveis inferiores da atmosfera das regiões tropicais para níveis superiores da troposfera e, posteriormente sofre subsidência em latitudes médias (ao redor de 30° nos dois hemisférios), sendo um importante fator da manutenção do balanço térmico global (FERREIRA, 1996).

Mudanças nos padrões oceânicos superiores e nos padrões de circulação estão intimamente ligadas às mudanças na circulação atmosférica. A CRMA é o principal elemento do sistema climático global responsável por transportar calor entre os

hemisférios. Essa circulação de larga escala transporta águas superficiais relativamente quentes e salinas rumo às altas latitudes do Atlântico Norte, onde perdem calor para a atmosfera dessa região tornando-se mais frias e densas, sofrendo subducção e retornando como águas profundas e frias para o Atlântico Sul (BRYDEN; LONGWORTH; CUNNINGHAM, 2005; RAHMSTORF et al., 2015). Existem quatro ramos principais integrantes da CRMA, são eles: (i) processos de ressurgência que transportam volumes de água do fundo para a perto da superfície; (ii) correntes superficiais, que transportam águas de baixa densidade para o norte; (iii) regiões de formação de águas profundas, onde as águas ganham densidade e sofrem subducção; e (iv) corrente profundas, que transportam águas de alta densidade rumo ao sul (KUHLBRODT et al., 2007). Esses ramos formam um sistema de circulação de águas composto por duas células de revolvimento, uma profunda (com águas profundas do Atlântico Norte), e outra abissal (com águas Antárticas de fundo) e englobam todo o Atlântico em ambos os hemisférios (KUHLBRODT et al., 2007). Instabilidades na CRMA são refletidas globalmente devido a circulação integrada dos oceanos (HOOGAKKER et al., 2011; KUHLBRODT et al., 2007).

O Quaternário tardio foi marcado por vários ciclos glaciais-interglaciais com periodicidade aproximada de 100 mil anos (ka) (associados ao ciclo orbital de excentricidade). A penúltima transição glacial-interglacial, também chamada de Terminação II, marca a transição do Estágio de Isótopo Marinho (do inglês MIS) 6, que ocorreu entre ca. 191 e 130 ka antes do presente (AP), para o MIS 5, que ocorreu entre ca. 130 e 71 ka AP (LISIECKI e RAYMO, 2005). Sobrepostos a esses ciclos ocorreram eventos de mudanças climáticas abruptas de escala milenar, como os eventos Heinrich Stadial (HS) e Dansgaard-Oeschger (HEINRICH, 1988; DANSGAARD et al., 1993). Esses eventos tiveram duração aproximada de poucos milhares de anos e evidências apontam que atuaram como a força motriz do clima tropical da América do Sul em escala milenar (e.g. CAMPOS et al., 2019).

Além disso, tais eventos são caracterizados por uma mudança no contraste da temperatura da superfície do mar entre os hemisférios, com resfriamento das altas latitudes do Hemisfério Norte e aquecimento do Hemisfério Sul (BARKER et al., 2009; CHIESSI et al., 2015; CRIVELLARI et al., 2019). Essa marcante mudança ocorreu em virtude da redução da intensidade da CRMA, diminuindo, portanto, sua capacidade de transportar calor em direção ao Atlântico Norte (RAHMSTORF et al., 2015; MCMANUS et al., 2014). Arquivos paleoclimáticos registraram repetidos eventos de paralisação ou redução marcante na intensidade dessa circulação durante HS do Quaternário tardio (e.g., BÖHM et al., 2015, MCMANUS et al., 2014). Um dos eventos mais marcantes de

enfraquecimento da CRMA se deu na Terminação II, durante o HS10 (BÖHM et al., 2015; AIMOLA e MOURA, 2016).

A Bacia de drenagem do Rio Parnaíba (Fig 1) é considerada a segunda mais importante da região NE do Brasil, ocupando uma área de aproximadamente 334.000 km² e seu curso principal tem extensão aproximada de 1.400 km (RAMOS et al., 2014). O rio Parnaíba é a fonte dominante de águas fluviais e sedimentos para nossa área de estudo sob condições modernas e passadas (ZHANG et al., 2015). Os registros marinhos aqui compilados foram coletados no talude continental da bacia.

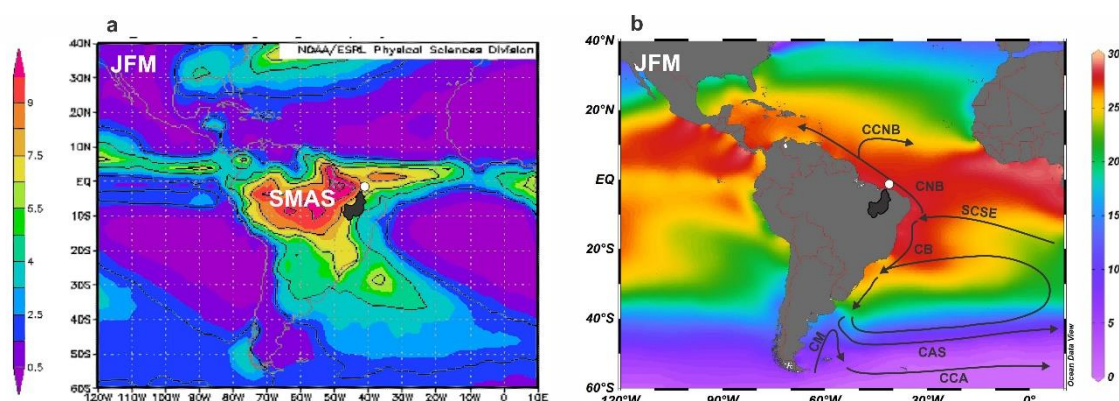


Fig.1. Localização do testemunho sedimentar marinho CDH-89 (círculo branco) que será investigado neste projeto de Mestrado e condições de verão austral (janeiro, fevereiro, março – JFM). **(a)** Precipitação (mm/dia) (Xie & Arkin, 1997). **(b)** Temperatura da superfície do mar (°C) (Locarnini et al., 2013). A área preta representa a bacia de drenagem do rio Parnaíba (NE da América do Sul). As setas pretas indicam as principais correntes superficiais da porção oeste do Atlântico Sul (Peterson & Stramma, 1991). SMAS – Sistema de Monção da América do Sul; SCSE – ramo sul da Corrente Sul Equatorial; CNB – Corrente Norte do Brasil; CCNB – Contracorrente Norte do Brasil; CB – Corrente do Brasil; CM – Corrente das Malvinas; CAS – Corrente do Atlântico Sul; CCA – Corrente Circumpolar Antártica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Testemunho sedimentar marinho

O testemunho sedimentar marinho CDH-89 (1,03 S, 42,74 W, 2846 m de profundidade, 2820 cm recuperação) foi coletado no talude continental do oeste do Atlântico equatorial, i.e. margem continental NE da América do Sul, próximo a desembocadura do Rio Parnaíba. Uma vez que nosso foco se baseia no eventos abrupto de escala milenar HS10 (ou seja, Estágios de Isótopos Marinhos (MIS) 5),

analisamos as profundidades do testemunho que cobrem a Terminação II, entre ca. 120 e 110 mil anos antes do presente.

3.2 Análises de fluorescência de raios-X convencional em amostras de sedimento total

Eventos de marcante precipitação sobre o continente ou redução do nível do mar estão associados com maior aporte de sedimentos terrígenos desde sua área fonte (e.g. bacia de drenagem do rio Parnaíba) até seu sítio final de deposição (e.g. oeste do Atlântico equatorial). Assim, em sedimentos marinhos, a presença de camadas ricas (pobres) em elementos terrígenos pode indicar eventos de aumento (redução) na precipitação continental e/ou redução (aumento) do nível do mar (ARZ et al., 1998; CAMPOS et al., 2019; MULITZA et al., 2017). A análise de FRX envolve a detecção dos raios-X emitidos pelos elementos que estão presentes na amostra analisada. Uma de suas técnicas é a fluorescência de raios-X por dispersão de energia (ED-XRF), que é realizada através do bombardeamento por raios-X das amostras de sedimento, assim, ionizando os elementos presentes nas amostras que, ao retornarem ao seu estado inicial, emitem uma radiação característica, que permite a identificação da sua proporção na amostra (FILHO, 1999).

A razão elementar Ti/Ca e Mn foram usadas para reconstituir mudanças na precipitação sobre o NE da América do Sul e variações no nível do mar. Análises de FRX convencional foram executadas a cada 5 cm em amostras discretas do trecho de interesse do testemunho sedimentar marinho CDH-89 com um espectrômetro Malvern Panalytical Epsilon 1, instalado no Laboratório de Paleoceanografia e Paleoclimatologia (P2L) da Escola de Artes, Ciências e Humanidades (Universidade de São Paulo, Brasil).

3.3 Análises de isótopos estáveis de oxigênio e carbono em foraminíferos

Os foraminíferos são organismos oceânicos que possuem testas (carapaças) que são calcificadas agregando os elementos químicos do ambiente em que viveram, após a sua morte, essas testas são secretadas e depositadas no fundo oceânico (PETRÓ, 2018). Por esse motivo as testas de foraminíferos são comumente utilizadas para estudos de reconstituição paleoambiental como portadoras dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^{13}\text{C}$ das massas de água nas quais sofreram calcificação (CHIESSI et al., 2007; ROHLING e COOKE, 2003).

O $\delta^{18}\text{O}$ contido nas testas de foraminíferos reflete o $\delta^{18}\text{O}$ das massas oceânicas e é principalmente controlado pela temperatura e salinidade das massas de água onde as testas calcificam (EMILIANI, 1955). Temperaturas mais altas produzem excursões

negativas de $\delta^{18}\text{O}$, enquanto salinidades mais altas produzem excursões positivas de $\delta^{18}\text{O}$ (ROHLING E COOKE, 2003). A reconstituição do $\delta^{13}\text{C}$ são utilizadas para identificar mudanças no ciclo do carbono oceânico para compreender o teor de nutrientes e a distribuição das massas de água no interior do oceano, excursões negativas de $\delta^{13}\text{C}$ apontam para redução da ventilação das águas de fundo (ZARDIN, 2021).

Para as análises de $\delta^{18}\text{O}$ foram coletadas manualmente sob um microscópio binocular testas de foraminíferos planctônicos *Globigerinoides ruber white* e *Neoglobobulimina dutertrei* e bentônicos *Cibicides wuellerstorfi* e para as análises de $\delta^{13}\text{C}$ foram coletadas testas de foraminíferos bentônicos *Cibicides wuellerstorfi* cada 5 cm em amostras discretas do trecho de interesse do testemunho sedimentar marinho CDH-89, foi utilizado o espectrômetro de massa Thermo Fischer Scientific MAT 253 equipado com um dispositivo automático de preparação de carbonatos do tipo Kiel IV, instalados no Laboratório de Paleooceanografia e Paleoclimatologia (P2L) da Escola de Artes, Ciências e Humanidades (Universidade de São Paulo, Brasil).

4. RESULTADOS

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ de *G. ruber* (branco) variaram entre 0.8 e 1.6 ‰ durante a TIL, tendo o seu menor pico durante o HS10. Enquanto os valores de $\delta^{18}\text{O}$ de *N. dutertrei* variaram entre -0.4 e 0.8 ‰, tendo o seu maior pico durante o HS10. Como a espécie *G. ruber* habita a porção superior da coluna d'água enquanto a espécie *N. dutertrei* habita a camada de mistura, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ da razão entre elas, variando entre 0.8 e 1.6 ‰, indicam um aumento na estratificação oceânica durante o HS10. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ de *C. wuellerstorfi* variaram entre 2.8 e 4, apresentando o seu menor pico no início do HS10.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ de *C. wuellerstorfi* variaram entre 0 e 1.2‰. Excursões negativas de $\delta^{13}\text{C}$ são observadas nos períodos que compreendem os intervalos de recorrência do HS10. Os valores de Mn obtidos através das análises de FRX variaram entre 0.08 e 0.028 mmol/mol. Ambos indicam que houve uma redução na formação de águas profundas do Atlântico Norte, com o seu maior pico de redução durante o HS10, como consequência da desintensificação da CRMA.

Por fim os valores da razão elementar $\ln(\text{Ti}/\text{Ca})$ variaram entre -1,5 e -4,5 mmol/mol. Os valores do MIS5 são relativamente maiores que do MIS5e. Anomalias positivas em $\ln(\text{Ti}/\text{Ca})$ e são observadas durante o evento de mudança climática abrupta milenar HS10 indicando maior aporte de sedimentos terrígenos no talude continental devido há

intensificação da precipitação, provavelmente causado pelo deslocamento da ZCIT para Sul durante neste período.

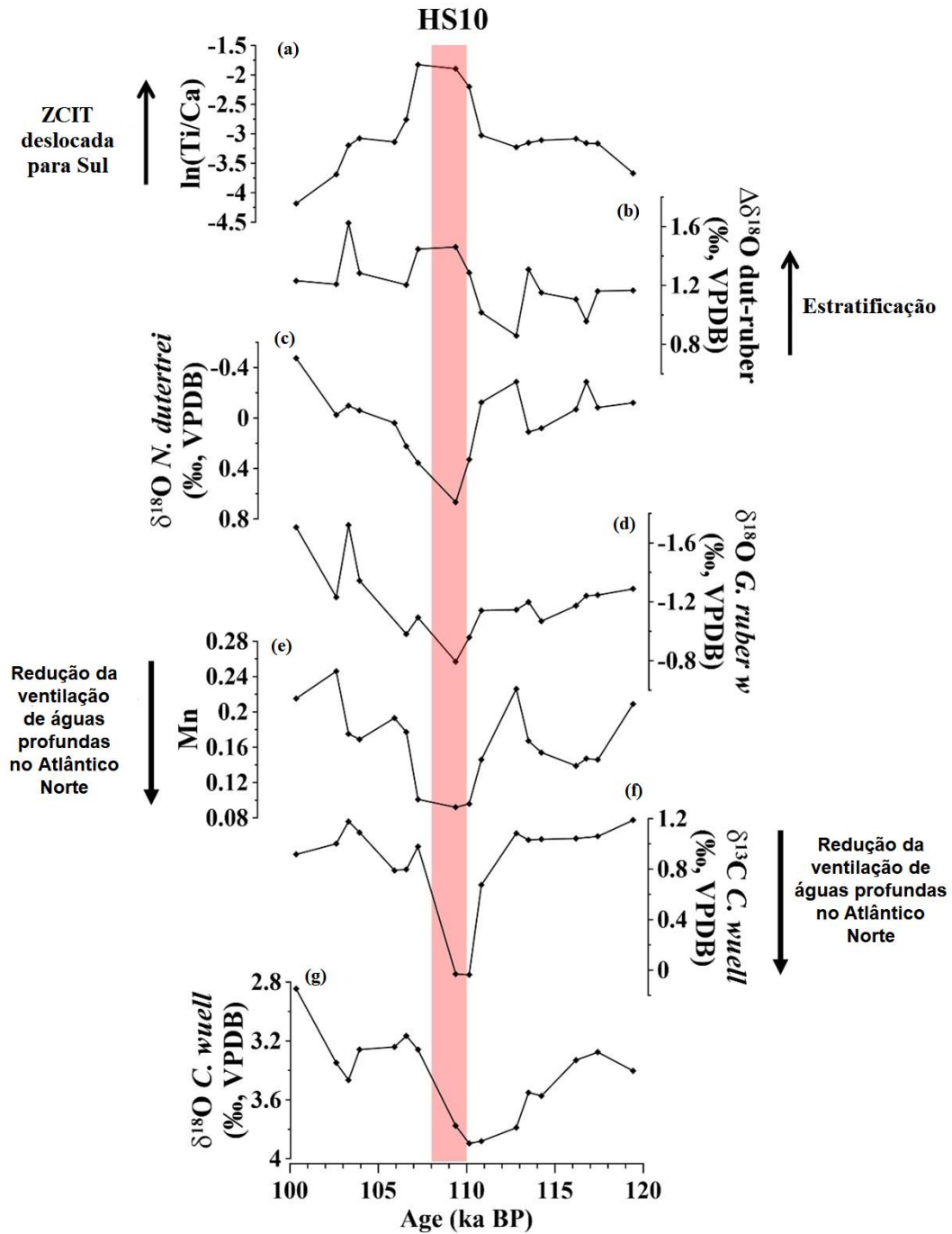


Fig.2. Registros paleoclimáticos do testemunho sedimentar marinho CDH-89 para o período entre 100 a 120 ka AP. Barra vertical cor-de-rosa representa o evento abrupto de escala milenar Heinrich Stadial (HS) 10. **(a)** Scanner de núcleo XRF de Ti/Ca; **(b)** razão entre $\delta^{18}O$ de *Neogloboquadrina dutertrei* e *Globigerinoides ruber white* **(c)** $\delta^{18}O$ de *Neogloboquadrina dutertrei*; **(d)** $\delta^{18}O$ de *Globigerinoides ruber white*; **(e)** Scanner de núcleo XRF de Mn; **(f)** $\delta^{13}C$ de *Cibicidoides wuellerstorfi*; **(g)** $\delta^{18}O$ de *Cibicidoides wuellerstorfi*.

5. DISCUSSÃO

Os HS são eventos de mudanças climáticas abruptas de escala milenar que influenciaram de forma significativa o hidroclima da América do Sul tropical durante o Quaternário Tardio. Tais eventos foram marcados pela redução da intensidade da CRMA (HEINRICH, 1988; DANSGAARD et al., 1993; MCMANUS et al., 2004; BÖHM et al., 2015), provavelmente provocada por descargas de icebergs nas altas latitudes do Atlântico Norte. Tais descargas foram identificadas a partir da formação de depósitos de ice-rafted debris (IRD) em sedimentos marinhos do Atlântico Norte (i.e. detritos terrígenos transportados por icebergs e depositados no fundo oceânico após o derretimento do gelo) (LISIECKI e STERN, 2016). O aporte de água doce no Atlântico Norte associado às descargas de icebergs diminui a densidade das águas superficiais e, portanto, reduz a subsidência de águas nessa região, reduzindo a ventilação em águas profundas no Atlântico Norte e aumentando a estratificação da coluna de água superior (GONI e HARRISSON, 2010; KUJIPERS et al. 2014; BÖHM et al., 2015; LISIECKI e STERN, 2016).

Como a CRMA é um dos principais elementos do sistema climático atuantes no balanço de calor entre os hemisférios, seu enfraquecimento reduz o transporte de calor oceânico rumo ao Atlântico Norte, que fica acumulado no Atlântico Sul alterando, portanto, o gradiente térmico entre os hemisférios. Como a ZCIT migra sazonalmente em direção ao hemisfério mais quente, sua posição média latitudinal é marcadamente afetada pela alteração do gradiente de temperatura superficial no Atlântico (AIMOLA e MOURA, 2016; MULITZA et al., 2017). Assim, períodos de redução na intensidade da CRMA associados com os eventos HS estão relacionados com o deslocamento para sul da posição média da ZCIT. Tal deslocamento promove um fortalecimento (enfraquecimento) dos ventos alísios de NE (SE) em resposta ao fortalecimento (enfraquecimento) da célula de Hadley do Hemisfério Norte (Sul) (VENANCIO et al., 2018; RODRIGUES et.al., 2007; CAMPOS, 2016).

Dessa forma, diversos estudos apontam que o enfraquecimento da CRMA durante os HS foi responsável não apenas pela diminuição do transporte de calor oceânico rumo ao norte, mas também pelo deslocamento para sul da ZCIT e consequente anomalias positivas de precipitação sobre o NE da América do Sul, especialmente sobre a bacia de drenagem do Rio Parnaíba (ZHANG e DELWORTH 2005; CAMPOS, 2016; MULITZA et al., 2017; AIMOLA e MOURA, 2016). Tal fenômeno é bem conhecido para o período que compreende a Terminação I, no

entanto, este não é o caso para a Terminação II. Tal carência de estudos é devida a dificuldade de se obter registros paleoclimáticos com resolução e extensão temporal adequadas para tratar desse período. Os dados obtidos neste estudo revelam aumentos significativos da razão $\ln(\text{Ti}/\text{Ca})$ durante o evento HS10.

Esta é a primeira vez que tais anomalias positivas são observadas em um registro paleoclimático da margem continental NE da América do Sul para a Terminação II e comprova que a redução da intensidade da CRMA durante o HS10 esteve relacionada com um deslocamento para sul da ZCIT e consequente aumento de precipitação sobre o NE da América do Sul. A Terminação II marca a transição de um clima glacial (i.e. MIS6) para um clima interglacial (MIS5e). Tal mudança global para um clima mais quente implica em alterações marcantes no sistema climático tais como aumentos significativos na concentração de CO_2 atmosférico e no nível relativo do mar. A intensificação das atividades antrópicas das últimas décadas está provocando o aumento da temperatura média global e consequente derretimento das geleiras polares. Tal fenômeno aumenta o aporte de água doce no Atlântico Norte e é tido como um dos responsáveis pela redução da intensidade da CRMA observada nas últimas décadas (RAHMSTORF et al., 2015). Alguns estudos que envolvem projeções climáticas futuras indicam que a intensidade dessa circulação pode sofrer redução drástica e não descartam a possibilidade do seu total colapso (e.g. BAKKER et al., 2016; LIU et al., 2017).

Os dados apresentados aqui sugerem que tais mudanças na intensidade da CRMA poderão implicar em alterações significativas nos padrões de precipitação sobre o NE da América do Sul e, portanto, devem ser consideradas na tomada de decisão a respeito das medidas de prevenção, mitigação e adaptação relacionadas aos possíveis impactos de mudanças climáticas abruptas.

6. CONCLUSÃO

Os dados isotópicos estáveis de carbono e oxigênio de foraminíferos e dados elementares principais de sedimentos obtidos de um testemunho sedimentar marinho coletado no NE do Brasil aqui apresentados mostram que durante o evento HS10 (que está contido na Terminação II) houve uma redução da ventilação de águas profundas no Atlântico Norte e aumento da estratificação da coluna de água superior no Atlântico equatorial ocidental, indicando aumento da precipitação no NE da América do Sul. A comparação dos resultados obtidos com outros registros paleoclimáticos disponíveis na literatura sugerem que há uma relação com a desintensificação da CRMA e consequente deslocamento para sul da ZCIT, afetando

diretamente a precipitação sobre a bacia de drenagem do Rio Parnaíba. Tais resultados são de grande relevância pois são dados inéditos para essa região da América do Sul durante a Terminação II, período que apresentou condições climáticas similares às aquelas projetadas para o final do século.

Ademais, tendo em vista que a intensificação das atividades antrópicas tem exercido cada vez mais pressão sobre o sistema climático e que uma redução da intensidade da CRMA já está em curso e prevista para ser acentuada nas próximas décadas, o melhor entendimento a respeito da consequência desses episódios para o clima do NE da América do Sul se faz extremamente necessário para auxiliar na criação de medidas de prevenção, mitigação e adaptação eficientes para lidar com os possíveis impactos de mudanças climáticas abruptas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a dois revisores anônimos por seus comentários e sugestões que melhoraram o manuscrito. Novos dados aqui mostrados são arquivados em Pangea. L. Kraft, M.C.C Campos e C.M Chiessi agradecem o apoio financeiro da CAPES (88887.686748/2022-00) e FAPESP (2018/15123-4). O material de amostra foi fornecido pela Universidade de São Paulo, Brasil. Esta pesquisa utilizou dados adquiridos no espectrômetro Malvern Panalytical Epsilon 1 e espectrômetro de massa Thermo Fischer Scientific MAT 253 equipado com um dispositivo automático de preparação de carbonatos do tipo Kiel IV - Laboratório de Paleoceanografia e Paleoclimatologia (P2L) da Escola de Artes, Ciências e Humanidades (Universidade de São Paulo, Brasil).

REFERÊNCIAS

- 1) ABREU, L.P.; MUTTI, P.R.; LIMA, K.C. Variabilidade espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba: Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Meio Ambiente, [S.L.]: v. 7, n. 2, p. 82-97, jan. 2019.
- 2) AIMOLA, L.; MOURA, M. A Influência da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico na Definição da Posição Média da ZCIT ao Norte do Equador. Uma Revisão. Revista Brasileira de Meteorologia, [S.L.]: v. 31, n. 41, p. 555-563, dez. 2016.
- 3) AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P.; MARENGO, J.A.; PISNITCHENKO, I.; NUNES, L.A.; FERNANDEZ, J.P.R. Cenários regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI: Projeções de clima usando três modelos regionais. Ministério Do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas–SBF, Diretoria De Conservação Da Biodiversidade. São Paulo: v. 3., 2007

- 4) ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. CBH Parnaíba. 2020.
- 5) ARANTES, J. T. Aquecimento poderá reduzir em 44% a grande circulação das águas do Atlântico. 2016. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/aquecimento-podera-reduzir-em-44-a-grande-circulacao-das-aguas-doatlantico/23015/>. Acesso em: 21 mar. 2022
- 6) ARZ, H.W.; PÄTZOLD, J.; WEFER, G. Correlated Millennial-Scale Changes in Surface Hydrography and Terrigenous Sediment Yield Inferred from LastGlacial Marine Deposits off Northeastern Brazil. *Quaternary Research*, v. 50, n. 2, p. 157–166, 1998.
- 7) BAKKER, P.; SCHMITTNER, A.; LENAERTS, J.; ABE-OUCHI, A. et al. Fate of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting. *Geophysical Research Letters*, v.43, n. 23, p. 12,252-212,260, 2016.
- 8) BÖHM, E., LIPPOLD, J., GUTJAHR, M., FRANK, M., BLASER, P., ANTZ, B., FOHLMEISTER, J., FRANK, N., ANDERSEN, M.B., DEININGER, M. Strong and deep Atlantic meridional overturning circulation during the last glacial cycle. *Nature* v.517, p.73–76, 2015.
- 9) BRYDEN, H.L.; LONGWORTH, H.R.; CUNNINGHAM, S.A. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25N. *Nature*. V. 438, 2005.
- 10) CAESAR et al.,. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium (<https://www.nature.com/articles/s41561-021-00699-z#citeas>). 2021
- 11) CAESAR et al.,. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation (<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5>). 2018.
- 12) CAMPOS, M.C. Variabilidade milenar da Corrente do Brasil e do clima da América do Sul durante o último período glacial. 2016. Tese.(Mestrado) - Sustentabilidade, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo: 2016.
- 13) CAMPOS, M.C., CHIESSI, C.M., PRANGE, M., MULITZA, S., KUHNERT, H., PAUL, A., VENANCIO, I.M., ALBUQUERQUE, A.L.S., CEUZ, F.W., BAHR, A. A new mechanism for millennial scale positive precipitation anomalies over tropical South America. *Quat. Sci.* n.225, 2019.
- 14) CAMPOS, M.C. Penúltima transição glacial-interglacial no nordeste da América do Sul e no oceano adjacente. 20 f. Projeto de Pós-Doutorado, Instituto de Geociências (IGC), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo: 2019.
- 15) CAMPOS, M.C.; CHIESSI, C.M.; VENANCIO, I.M.; PINHO, T.M.L.; CRIVELLARI, S.; KUHNERT, H.; SCHMIEDL, G.; DÍAZ, R.A.; ALBUQUERQUE, A.S.; PORTILHO-RAMOS, R.N; BAHR, A.; MULITZA, S. Constraining Millennial Scale

- Changes in Northern Component Water Ventilation in the Western Tropical South Atlantic. *Paleoceanography And Paleoclimatology*, [s. l], v. 35, n. 7, 2020.
- 16) CAMPOS, M.C.; CHIESSI, C.M.; NOVELLO, V.F.; CRIVELLARI, S.; CAMPOS, J.L.P.S.; ALBUQUERQUE, A.L.S.; VENANCIO, I.M.; SANTOS, T.P.; MELO, D.B.; CRUZ, F.W.; SAWAKUCHI, A.O.; MENDES, V.R. South American precipitation dipole forced by interhemispheric temperature gradient. *Scientific Reports*, [S.L], v. 12, n. 10527, 2022.
 - 17) CAMPOS, M.C.; CHIESSI, C.M.; NOVELLO, V.F.; CRIVELLARI, S.; CAMPOS, J. L.P.S.; ALBUQUERQUE, A.L.S.; VENANCIO, I.M.; SANTOS, T.P.; MELO, D.B.; CRUZ, F.W.; SAWAKUCHI, A.O.; MENDES, V.R. South American precipitation dipole forced by interhemispheric temperature gradient. *Scientific Reports*. (submetido).
 - 18) CARVALHO, M.A.V; OYAMA, M.D. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical atlântica: aspectos observacionais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [S.L.], v. 28, n. 3, p. 305-316, set. 2013
 - 19) CHENG H., EDWARDS, R. L., BROECKER, W. S., DENTON, G. H., KONG , X., WANG, Y., et al. Ice age terminations. *science*, 326(5950), 248-252, 2009.
 - 20) CHENG, H.; SINHA, A.; CRUZ, F. W.; WANG, X. et al. Climate change patterns in Amazonia and biodiversity. *Nature communications*, 4, n. 1, p. 1-6, 2013
 - 21) CHENG H., EDWARDS, R. L., BROECKER, W. S., DENTON, G. H., KONG , X., WANG, Y., et al. Ice age terminations. *science*, 326(5950), 248-252, 2009.
 - 22) CHIESSI, C., MULITZA, S., TANIGUCHI, N., PRANGE, M., CAMPOS, M., HÄGGI, C., et al. Mid-to Late Holocene Contraction of the Intertropical Convergence Zone Over Northeastern South America. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36(4). 2021.
 - 23) CHIESSI, C.M., ULRICH, S., MULITZA, S., PÄTZOLD, J., WEFER, G. Signature of the Brazil-Malvinas Confluence (Argentine Basin) in the isotopic composition of planktonic foraminifera from surface sediments. *Mar. Micropaleontol.* 64, 52–66. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2007.02.002>. 2007.
 - 24) CRIVELLARI, S.; CHIESSI, C. M.; KUHNERT, H.; HÄGGI, C. et al. Thermal response of the western tropical Atlantic to slowdown of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Earth and Planetary Science Letters*, 519, p. 120-129, 2019.
 - 25) 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., Evidence for general

- instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*. v.364, p.218-220. 1993.
- 26) EMILIANI, C. Pleistocene Temperatures. *J. Geol.* 63, 538–578. <https://doi.org/10.1086/626295>. 1955.
- 27) FERREIRA, N. S. Zona de convergência intertropical. *Boletim do Climanálise Especial – INPE. Comemoração dos 10 anos*, São Paulo: 1996.
- 28) FILHO, V.F.N. Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios-x por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF). Departamento de Ciências Exatas/ESALQ. Laboratório de Instrumentação Nuclear/CENA. 32 p., 1999
- 29) GONI, M. F.; HARRISON, S. Millennial-scale climate variability and vegetation changes during the Last Glacial: Concepts and terminology. *Quaternary Science Reviews*, v. 19, p.2823-2827, 2010.
- 30) GOVIN, A.; HOLZWARTH, U.; HESLOP, D.; KEELING, L.F.; ZABEL, M.; MULITZA, S.; COLLINS, J.A.; CHIESSI, C.M. Distribution of major elements in Atlantic surface sediments (36°N-49°S): imprint of terrigenous input and continental weathering. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 1-23, jan. 2012.
- 31) GOVIN, A., CHIESSI, C.M., ZABEL, M., SAWAKUCHI, A.O., HESLOP, D., HORNER, T., ZHANG, Y., MULITZA, S. Terrigenous input off northern South America driven by changes in Amazonian climate and the North Brazil Current retroflexion during the last 250 ka. *Clim. Past*. n.10, p.843–862, 2014.
- 32) GRANT, K., ROHLING, E., BAR-MATTHEWS, M., AYALON, A., MEDINA-ELIZALDE, M., RAMSEY, C. B., et al. Rapid coupling between ice volume and polar temperature over the past 150,000 years. *Nature*. v.491. p.744-747, 2012.
- 33) HEINRICH, H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*, v. 29, n. 2, 142– 152, 1988.
- 34) HOOGAKKER, B. A. et al. Dynamics of north atlantic deep water masses during the holocene. *Paleoceanography*, Wiley Online Library, v. 26, n. 4. 2011
- 35) KÖHLER, P.; NEHRBASS-AHLES, C.; SCHMITT, J.; STOCKER, T.F.; FISCHER, H. A 156 kyr smoothed history of the atmospheric greenhouse gases CO₂, CH₄, and N₂O and their radiative forcing. *Earth System Science Data*. Copernicus GmbH. [S.L.]: v. 9, n. 1, p. 363-387, 20 jun. 2017.
- 36) KUHNBRODT, T.; GRIESEL, A.; MONTOYA, M.; LEVERMANN, A. et al. On the driving processes of the Atlantic meridional overturning circulation. *Reviews of Geophysics*, 45, n. 2, 2007.

- 37) KUIJPERS, A.; KNUTZ, P.; MOROS, M. Ice-Rafted Debris (IRD). Encyclopedia Of Marine Geosciences, Springer Netherlands. [S.L.], p. 1-7, 2014.
- 38) IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896. 2021
- 39) LENTON, T. M., HELD, H., KRIEGLER, E., HALL, J. W., LUCHT, W., RAHMSTORF, S., & SCHELLNHUBERchellnhuber, H. J. Tipping elements in the Earth's climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(6), 1786-1793, 2008
- 40) LENTON, T. Tipping elements from a global perspective. In: Addressing Tipping Points for a Precarious Future: British Academy, 2013.
- 41) LISIECKI, L.; STERN, J. Regional and global benthic $\delta^{18}\text{O}$ stacks for the last glacial cycle. Paleoceanography, v. 31, n. 10, p.1368-1394, 2016.
- 42) LISIECKI, L.E., RAYMO, M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, Paleoceanography, v.20, 2005.
- 43) LIU, W.; FEDOROV, A. V.; XIE, S.-P.; HU, S. Climate impacts of a weakened Atlantic Meridional Overturning Circulation in a warming climate. Science advances, 6, n. 26, p. eaaz4876, 2020.
- 44) LIU, W.; XIE, S.P.; LIU, Z.; ZHU, J. Overlooked possibility of a collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in warming climate. Science Advances. v.3, n. 1, p. 1601-666, 2017.
- 45) MCMANUS, J.F, FRANCOIS, R., GHERARDI, J.M., KEIGWIN, L.D., BROWN-LEGER, S., Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. Nature, v. 428, p.834–837. 2004.
- 46) MMA, Ministério do Meio Ambiente. Caderno da Região Hidrográfica do Parnaíba. Secretaria de Recursos. Hídricos. – Brasília: MMA. 184 p., 2006.
- 47) MOURA, M.N.; VITORINO, M.I. Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à Zona de Convergência Intertropical. Revista Brasileira de Meteorologia, [S.L.]: v. 27, n. 4, p. 475-483, dez. 2012.
- 48) MULITZA, S., CHIESSI, C.M., SCHEFUß, E., LIPPOLD, J., WICHMANN, D., Antz, B., MACKENSEN, A., PAUL, A., PRANGE, M., REHFELD, K., WERNER, M., BICKERT, T., FRANK, N., KUHNERT, H., LYNCH-STIEGLITZ, J., PORTILHORAMOS, R.C., SAWAKUCHI, A.O., SCHULZ, M., SCHWENK, T.,

- TIEDEMANN, R., VAHLENKAMP, M., ZHANG, Y. Synchronous and proportional deglacial changes in Atlantic meridional overturning and northeast Brazilian precipitation. *Paleoceanography*. V.32, p.622–633, 2017.
- 49) SILVA, M.J.; GALVÍNIO, J.D.; COSTA, V.S.O. Abordagem interdisciplinar sobre a influência da Zona de Convergência Intertropical — ZCIT no Nordeste brasileiro. *Revista Movimentos Sociais e Dinâmicas Espaciais*. Recife: v. 6, n. 2, p. 107-117, dez. 2017
- 50) PATZ, J. A.; CAMPBELL-LENDRUM, D.; HOLLOWAY, T.; FOLEY, J. A. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438, n. 7066, p. 310-317, 2005.
- 51) PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Capítulo 9- Mudanças ambientais de curto e longo prazo: projeções, reversibilidade e atribuição.: COPPE Rio de Janeiro: p.322-346, 2020.
- 52) PETRÓ, Sandro Monticelli Introdução ao estudo dos Foraminíferos. Sandro Monticelli Petró. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS. [53 f.] il. 2018.
- 53) RAHMSTORF, S.; BOX, J.; FEULNER, G.; MANN, M. E. et al. Erratum: Corrigendum: Evidence for an exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning. *Nature.Climate Change*. V.5, n. 10, p. 956-956, 2015.
- 54) RAMOS, T. P. A.; RAMOS, R. T. d. C.; RAMOS, S. A. Q. A. Ichthyofauna of the Parnaíba River Basin, Northeastern Brazil. *Biota Neotrop*. v.14, p.1-8. 2014.
- 55) RODRIGUES, R. R., ROTHSTEIN, L. M., e WIMBUSH, M. Seasonal variability of the south equatorial current bifurcation in the Atlantic Ocean: A numerical study. *Journal of Physical Oceanography*. v.37. p.16–30, 2007.
- 56) ROHLING, E.J., COOKE, E. Stable oxygen and carbon isotopes in foraminiferal carbonate shells, in: *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers, pp. 239–259. 2003.
- 57) ROHLING, E.J., COOKE, S. Stable Oxygen and Carbon Isotopes in Foraminiferal Carbonate Shells, in: *Modern Foraminifera*. Springer Netherlands, Dordrecht, p. 384. <https://doi.org/10.1007/0-306-48104-9>. 2003.
- 58) THOMAS, C. D.; CAMERON, A.; GREEN, R. E.; BAKKENES, M. et al. Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, n. 6970, p. 145-148, 2004
- 59) TIERNEY, J. E. et al. Past climates inform our future. *Science* 370, eaay3701 (2020). 3 Seth, A. et al. Monsoon responses to climate changes—connecting past, present and future. *Current Climate Change Reports* 5, 63-79 (2019).
- 60) UVO, C. B. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro. 81p. (INPE - 4887 -

TDL/378). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: 1989.

- 61) VENANCIO, I.M., MULITZA, S., GOVIN, A., SANTOS, T.P., LESSA, D.O., ALBUQUEQUE, A.L.S., CHIESSI, C.M., TIEDERMANN, R., VAHLENKAMP, M., BICKERT, T., SCHULZ, M. Millennial- to orbital-scale responses of western equatorial Atlantic thermocline depth to changes in the trade wind system since the Last Interglacial. *Paleoceanogr. Paleoclimato*. 2018.
- 62) VENANCIO, Igor M.; NASCIMENTO, Rodrigo A.; SANTOS, Thiago P.; BELEM, Andre L.; LESSA, Douglas O.; TIEDEMANN, Ralf; CHIESSI, Cristiano M.; MULITZA, Stefan; ALBUQUERQUE, Ana Luiza S.. Tropical South American Rainfall Response to Dansgaard-Oeschger Stadials of Marine Isotope Stage 5. *Frontiers In Earth Science*, [S.L.], v. 10, 2022.
- 63) WALISER, E. W. C.; GAUTIER, C. A Satellite-derived Climatology of the ITCZ. *Journal of Climate*, v.6. p.2162-2174, 1993.
- 64) ZARDIN, T. N. Paleotemperatura: os principais proxies baseados em foraminíferos planctônicos. *Terræ Didactica*, 17(Publ. Contínua), 1-18, e021047. doi: 10.20396/ td.v17i00.8667166. 2021.
- 65) ZHANG, Y.; CHIESSI, C.M.; MULITZA, S.; ZABEL, M.; TRINDADE, R.I.F.; HOLLANDA, M.H.B.M.; DANTAS, E.L.; GOVIN, A.; TIEDEMANN, R.; WEFER, G. Origin of increased terrigenous supply to the NE South American continental margin during Heinrich Stadial 1 and the Younger Dryas. *Earth And Planetary Science Letters*, [S.L.]: v. 432, p. 493-500, dez. 2015.