

Circulação Geral dos Oceanos

Paulo S. Polito, Ph.D.

Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

São Paulo, 2021

Roteiro

11 Circulação Termohalina

- Para começo de conversa...
- Esteira Rolante
- Sobre a Formação
- Base Observacional no Atlântico
- WOCE no Pacífico e o Índico
- Síntese 3D da Circulação
- Porque eu me preocupo?

Roteiro

11 Circulação Termohalina

- Para começo de conversa...
- Esteira Rolante
- Sobre a Formação
- Base Observacional no Atlântico
- WOCE no Pacífico e o Índico
- Síntese 3D da Circulação
- Porque eu me preocupo?

Objetivos desta aula:

- Atualizar o conceito de circulação termohalina.
- Apresentar mecanismos de formação de águas de fundo e profundas.
- Visualizar esses mecanismos no diagrama TS e em modelos conceituais.
- Conectar a base observacional do WOCE com esses modelos.
- Apresentar a origem e o destino da NADW e AABW.
- Entender diagramas 3D da MOC.
- Discutir o modelo de caixas de Stommel.
- Apresentar as tendências de T, S e N.

Conhecimento prévio:

- Escalas da circulação forçada pelo vento.
- Equação de estado da água do mar.
- Interpretação do diagrama TS.
- Distribuição global de ventos, transporte de Ekman.

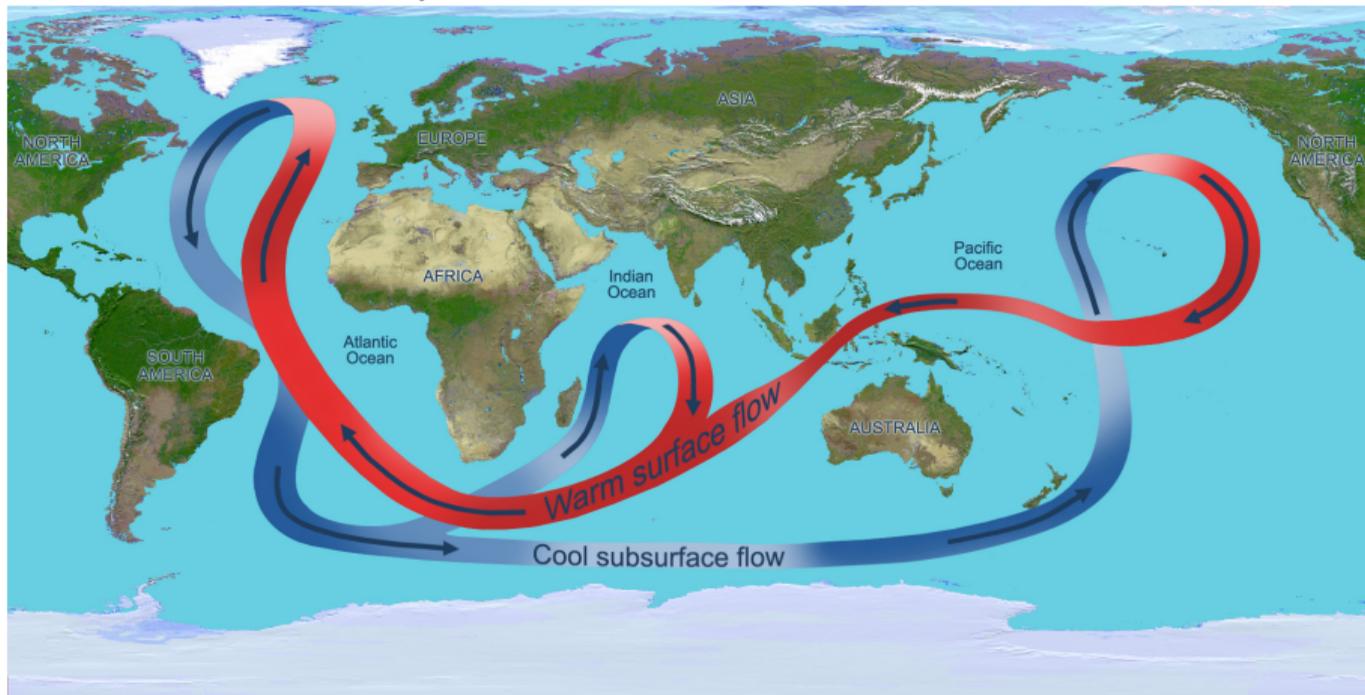
Roteiro

11 Circulação Termohalina

- Para começo de conversa...
- Esteira Rolante
- Sobre a Formação
- Base Observacional no Atlântico
- WOCE no Pacífico e o Índico
- Síntese 3D da Circulação
- Porque eu me preocupo?

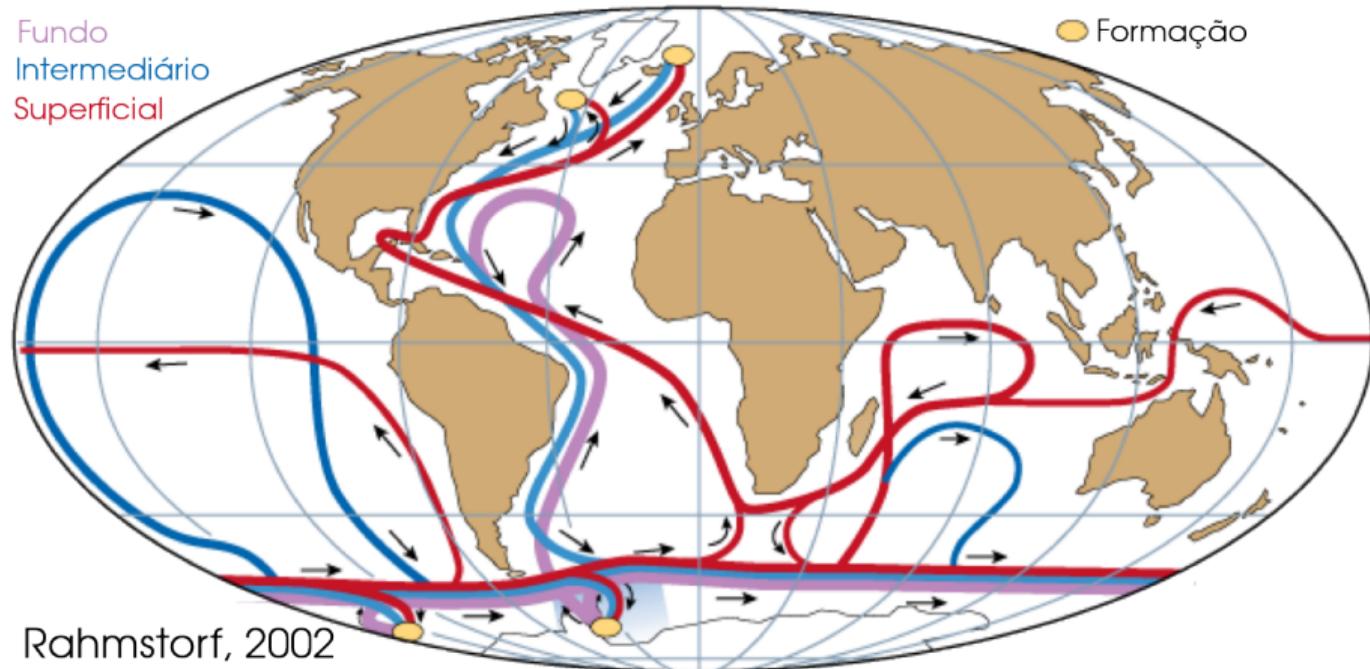
Wally Broecker

- Cunhou o termo "aquecimento global" em 1975, neste artigo.
- Concebeu a a circulação termohalina como esteira rolante.

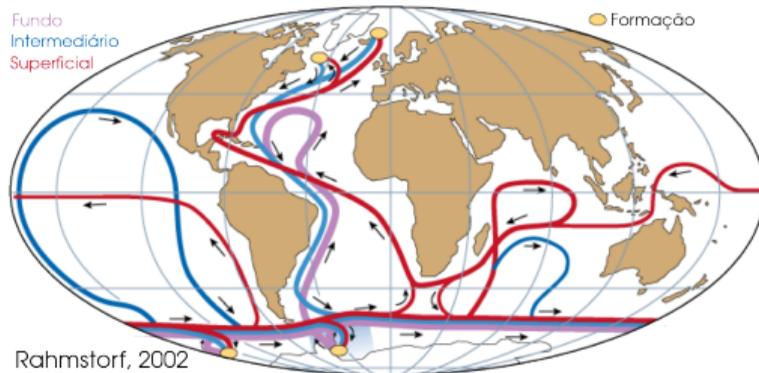
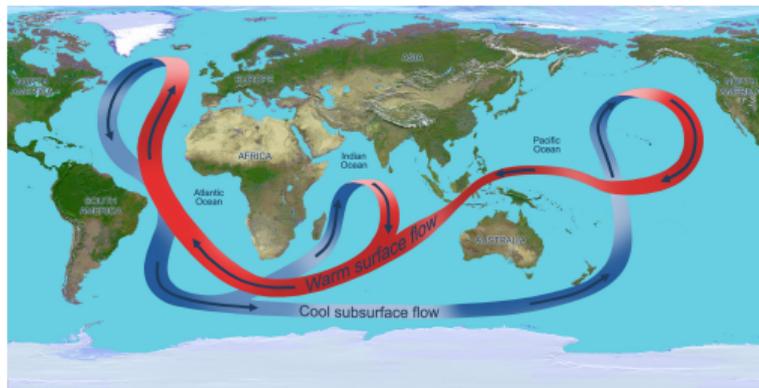


Sobre a esteira rolante

- Wallace Broecker era oceanógrafo químico, trabalhou com traçadores.
- Escala de tempo para dar a volta: 10^3 anos.



Comparação crítica



- Evite supersimplificações.
- Zonas de **formação** de águas profundas e de fundo.
- Papel do Oceano Austral como conector.
- Fluxo em três níveis.
- Correntes de contorno profundas.

Roteiro

11 Circulação Termohalina

- Para começo de conversa...
- Esteira Rolante
- Sobre a Formação
- Base Observacional no Atlântico
- WOCE no Pacífico e o Índico
- Síntese 3D da Circulação
- Porque eu me preocupo?

Siglas das massas d'água

AABW AntArctic Bottom Water = AFA Água de Fundo Antártica.

NADW North Atlantic Deep Water = APAN Água Profunda do Atl. Norte.

PDW Pacific Deep Water = APP Água Profunda do Pacífico.

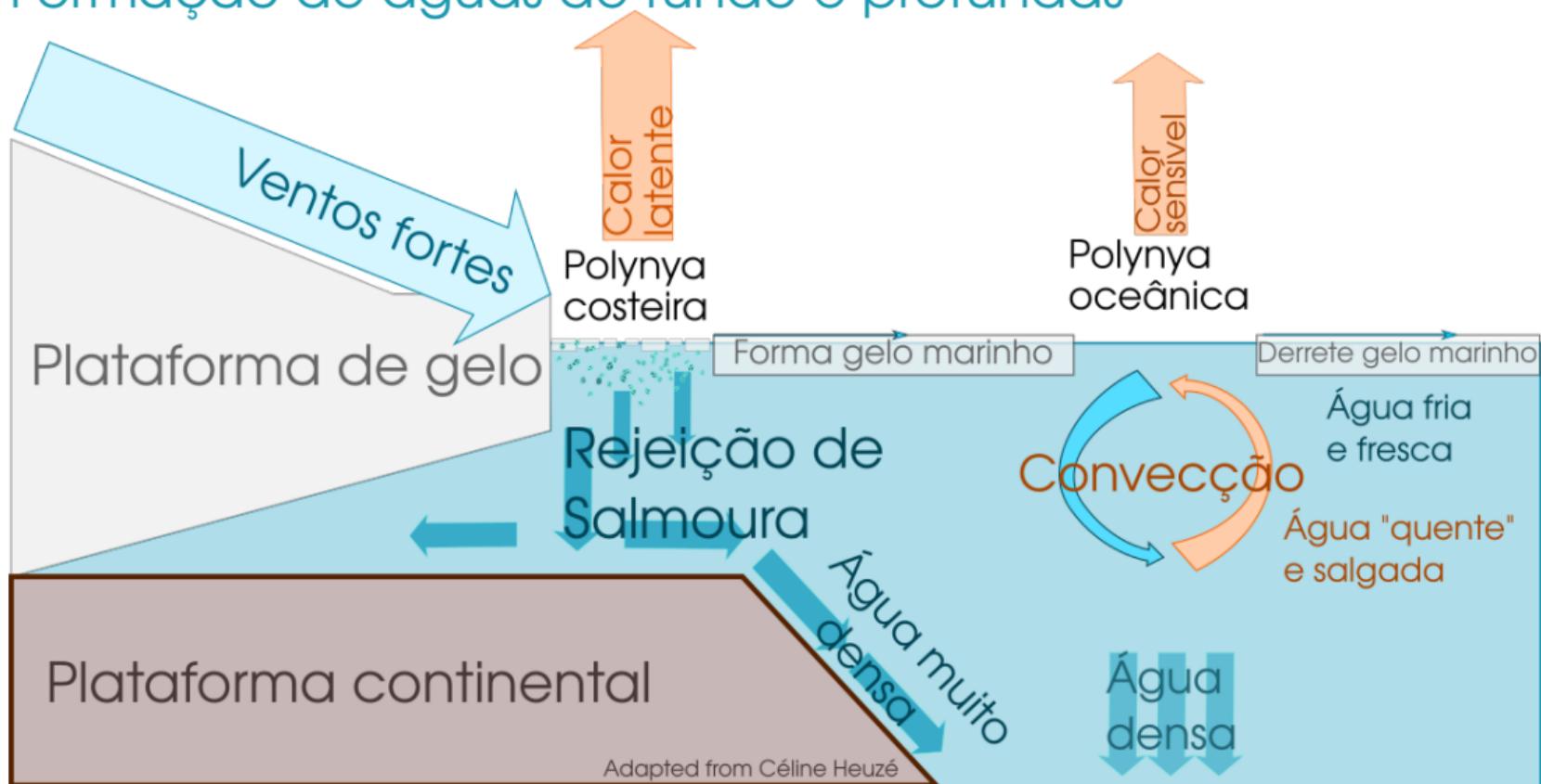
IDW Indian Deep Water = API Água Profunda do Índico.

NPIW N. Pacific Intermediate Water = AIPN Água Intermediária do Pac. N.

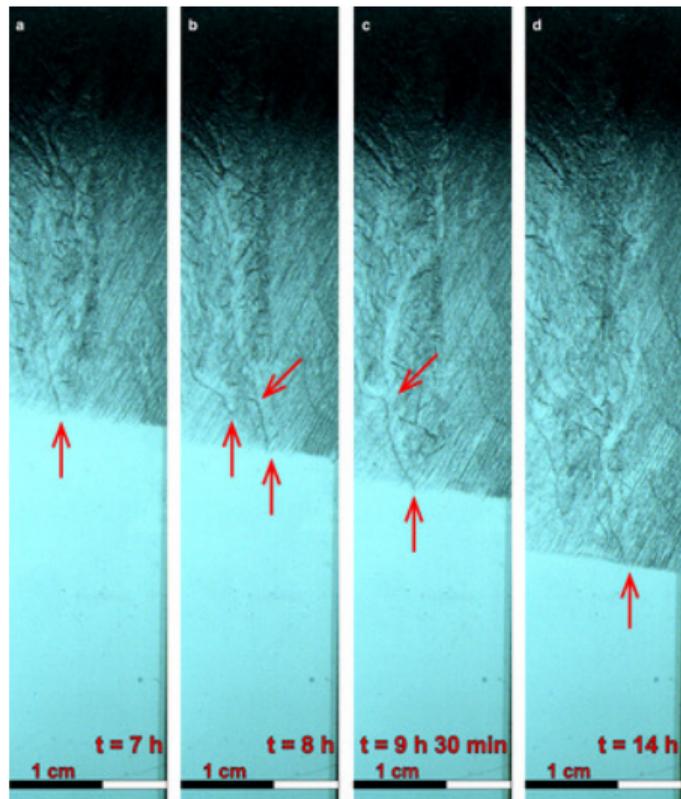
AAIW AntArctic Intermediate Water = AIA Água Intermediária Antártica.

SAMW SubAntarctic Mode Water = AMSA Água Modal SubAntártica.

Formação de águas de fundo e profundas

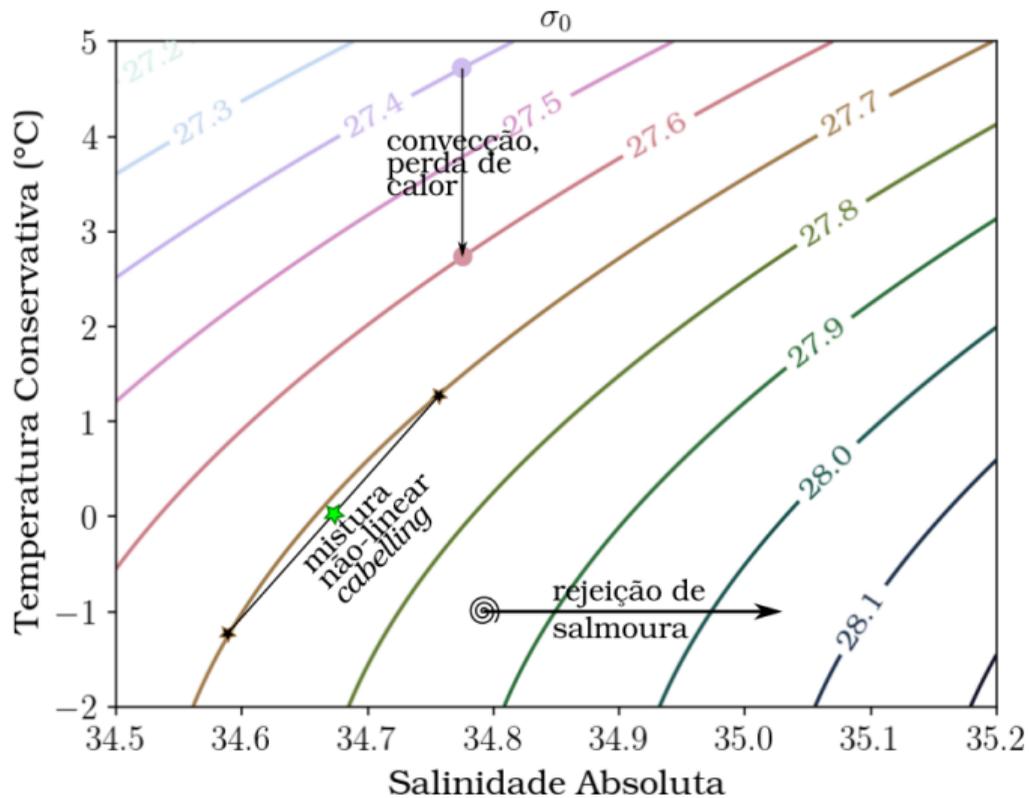


Rejeição de Salmoura



- Acontece se o gelo se forma **à partir da água salgada**.
- Canais verticais se formam, $O(1)$ mm.
- Água saturada de sal \Rightarrow extremamente densa escorre por eles.
- Convecção na interface gelo/água.
- Mais detalhes [aqui](#).

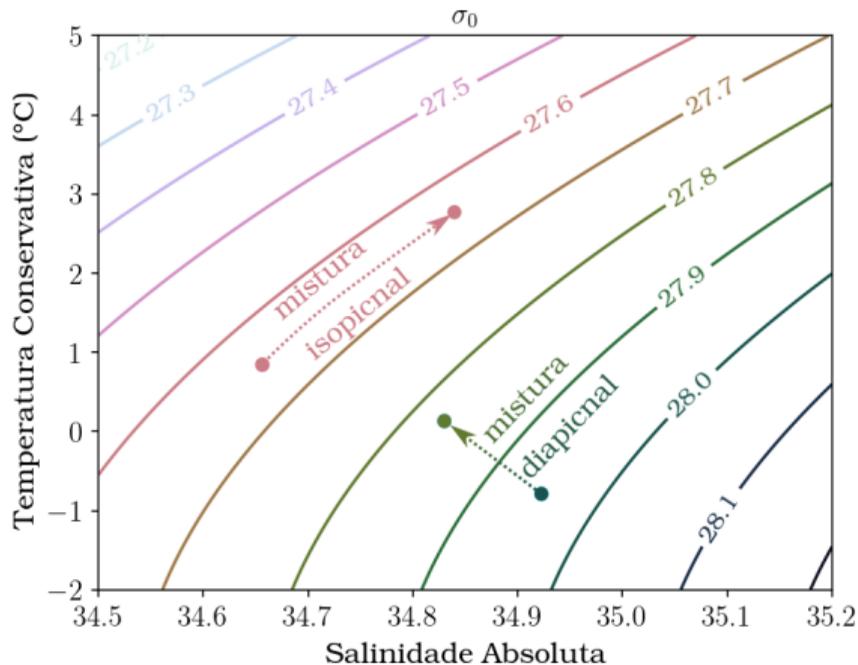
Processos no diagrama TS



- Perda de calor não muda a salinidade.
- Rejeição de salmoura não muda a temperatura.
- Mistura de águas de **mesma** densidade pode gerar água mais densa!

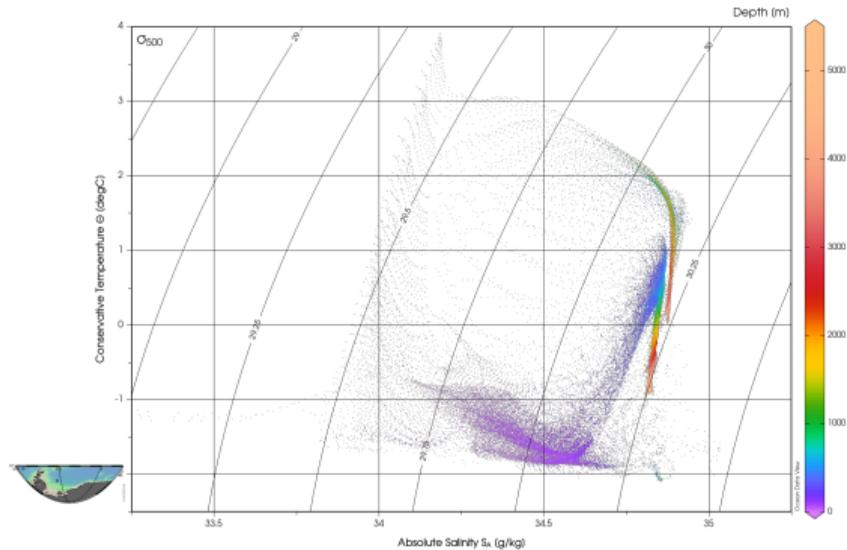
Processos no diagrama TS ... continuação

- Mistura isopícnal ocorre entre águas de mesma densidade, a partícula não muda sua energia potencial.
- Mistura diapícnal ocorre entre águas de densidades diferentes, demanda energia cinética para vencer a potencial.

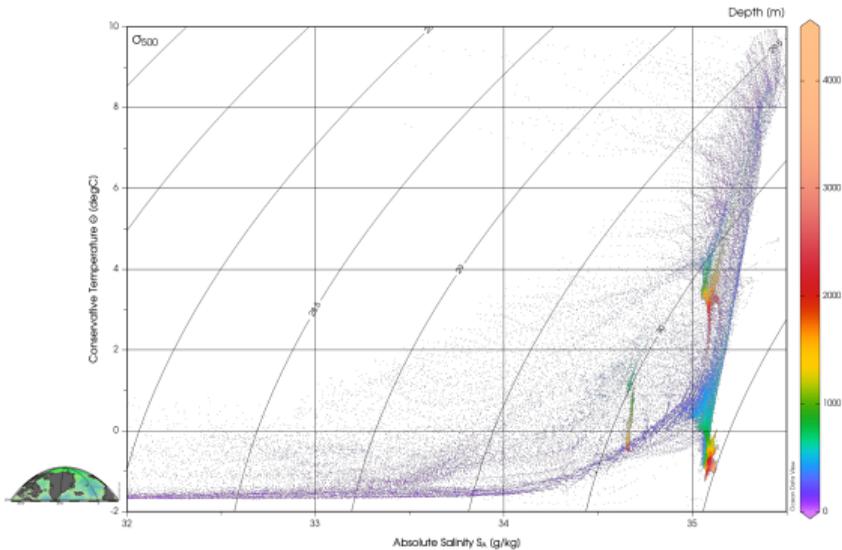


Processos no diagrama TS ... continuação

Região de formação da AABW



Região de formação da NADW

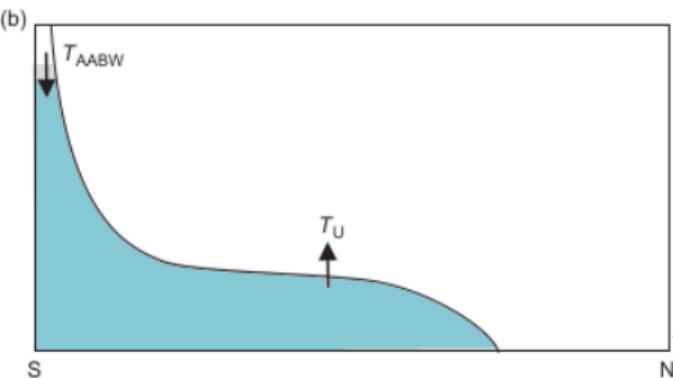
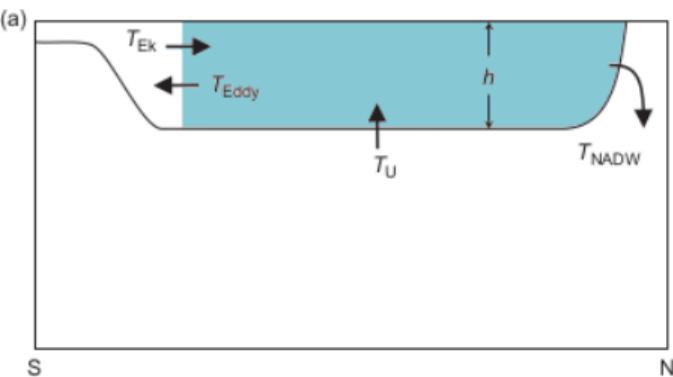


Fontes de Energia

- O oceano é aquecido por cima \Rightarrow estratificação estável \Rightarrow camada superior muito mais fina que a observada.
- Estratificação no interior demanda mistura mecânica, vento e marés \Rightarrow quebra de ondas internas (Munk & Wunsch 1998).
- Essa mistura turbulenta causa um transporte vertical para cima que compensa o transporte para baixo provocado pela formação de água de fundo e profunda (Gnanadesikan 1999).

Siedler et al. Ocean Circulation and Climate, Volume 103

Modelos esquemáticos



h Profundidade da piconclina.

T_{Ek} Transp. de Ekman no Oc. Austral.

T_{Eddy} Vórtices do Oc. Austral.

T_{NADW} Transporte/formação da NADW^a.

T_{AABW} Transporte/formação da AABW^b.

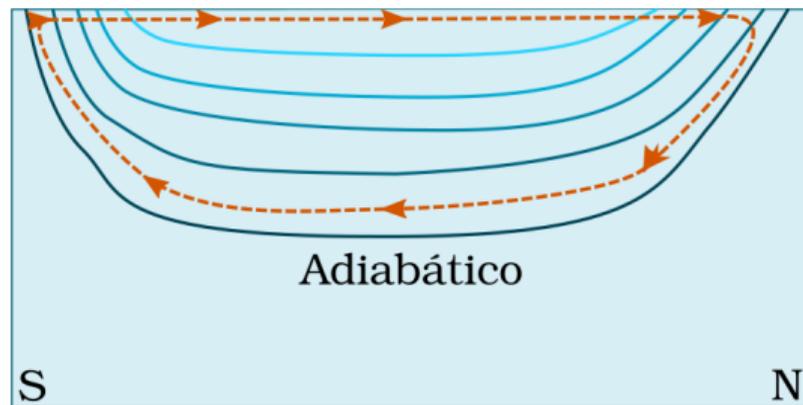
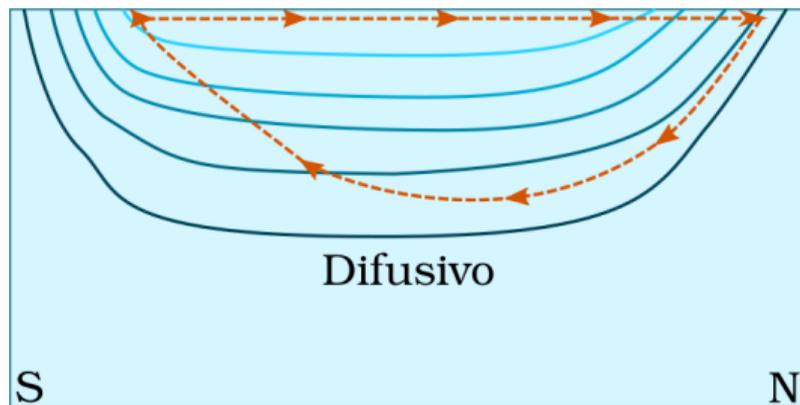
T_U Transporte vertical para cima, por mistura diapicnal turbulenta.

^aNort Atl. Deep Water = Água Profunda do Atl. Norte.

^bAntArctic Bottom Water = Água de Fundo Antártica.

Modelos esquemáticos ... continuação

- Mas transporte de Ekman \neq circulação termohalina (CTH).
- MOC = *Meridional Overturning Cell* ou célula de revolvimento meridional difere da CTH pois **inclui a parte forçada pelo vento**.
- Modelo difusivo da MOC: fluxo cruza curvas de densidade neutra.

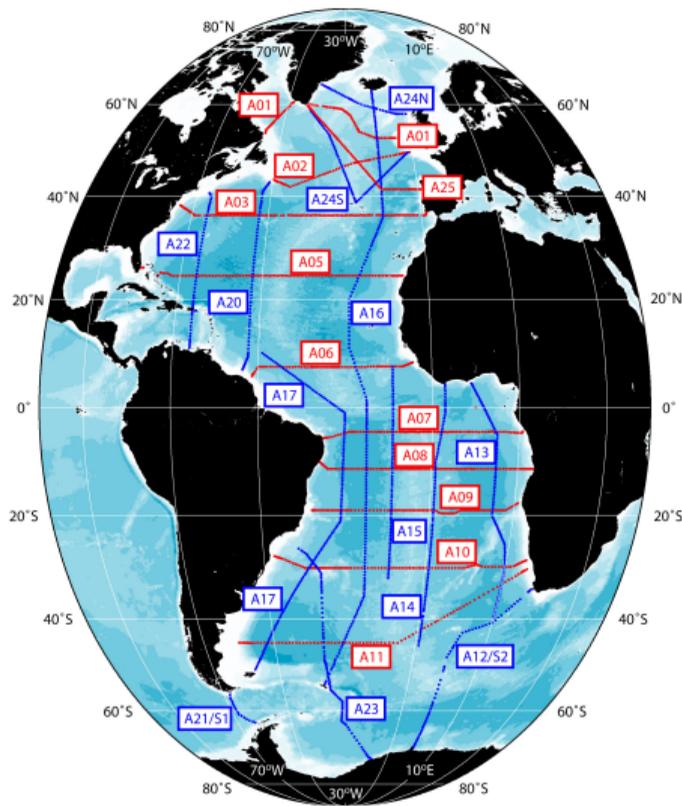


Roteiro

11 Circulação Termohalina

- Para começo de conversa...
- Esteira Rolante
- Sobre a Formação
- Base Observacional no Atlântico
- WOCE no Pacífico e o Índico
- Síntese 3D da Circulação
- Porque eu me preocupo?

WOCE A16



- World Ocean Climate Experiment.

- Consórcio global para coleta de dados oceanográficos.

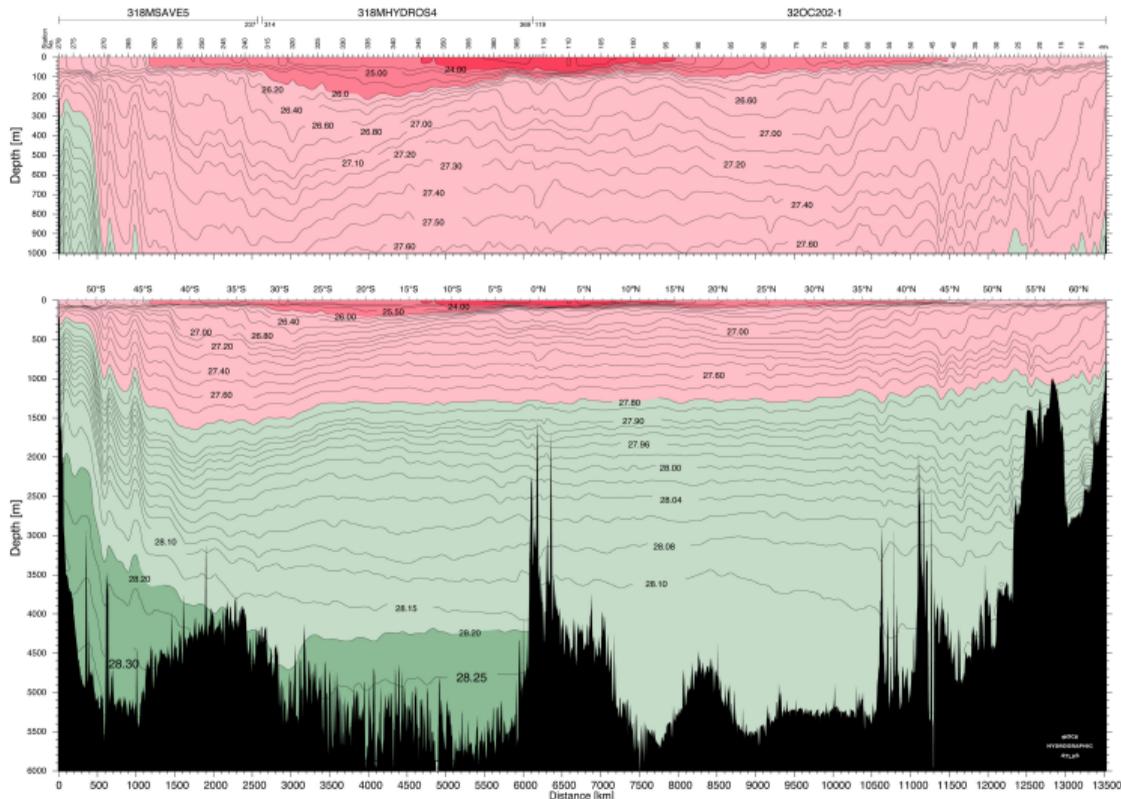
- Galeria iterativa de seções.

- Seções médias de 1990-2002.

- A16 cruza o Atlântico de norte a sul.

WOCE A16 γ^N Densidade Neutra

γ^N [kg/m³] for A16 25° W



■ Entre superfícies de γ^N o transporte é adiabático.

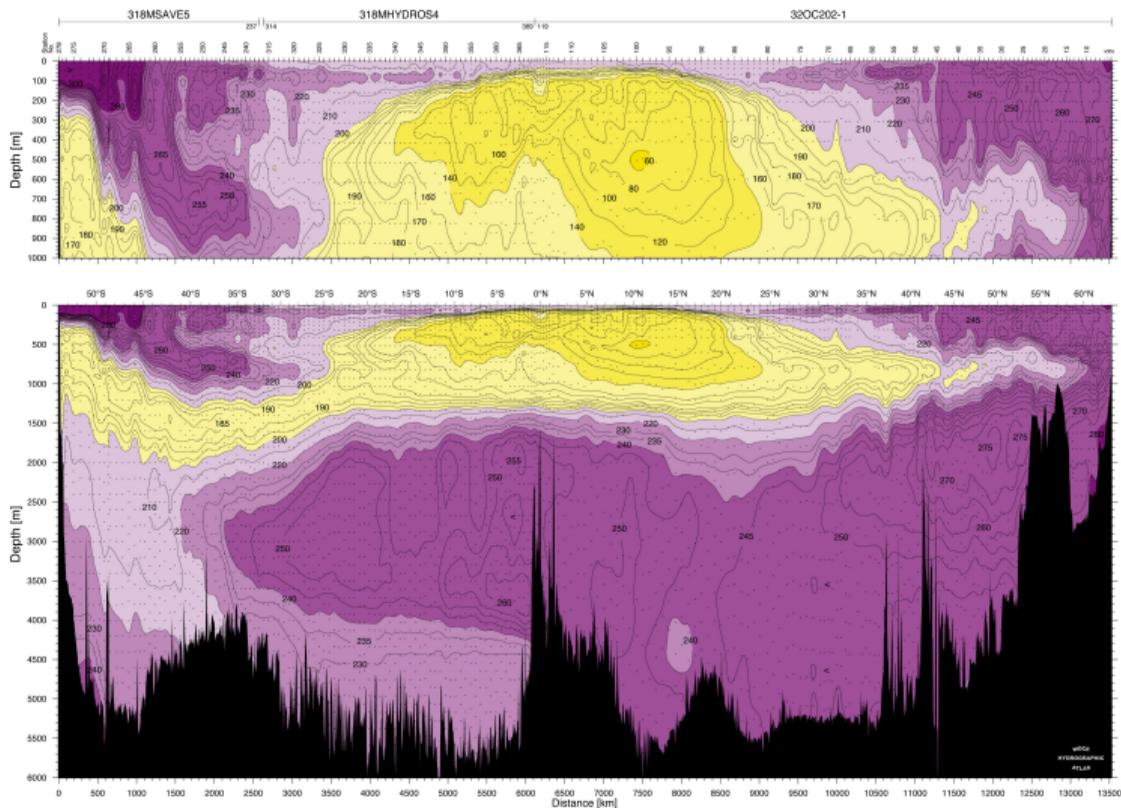
■ Figura (b) do Slide 17.

■ Ao sul: ABW ↓ preenche o lado W.

■ Ao norte: NADW ↓, preenche o outro.

WOCE A16 Oxigênio

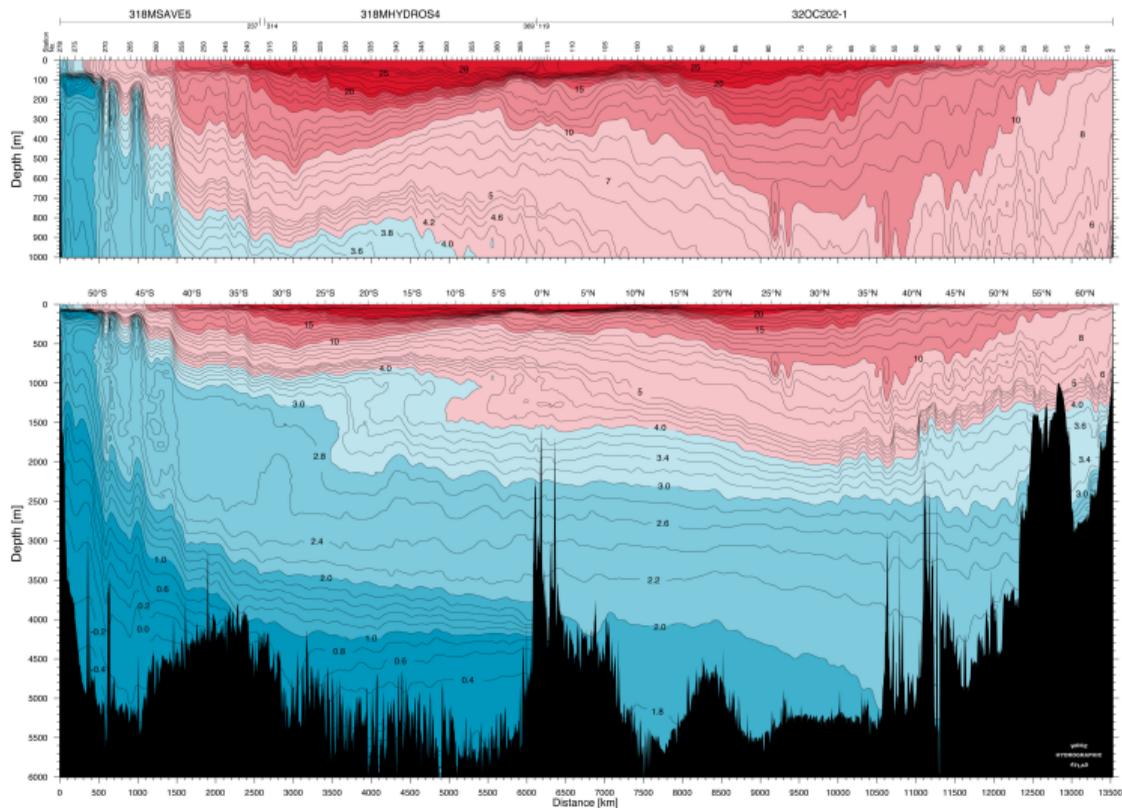
Oxygen [$\mu\text{M/kg}$] for A16 25° W



- Oxigênio mede idade.
- Amarelo = menos O₂.
- Processos de formação N/S são diferentes.
- NADW avança mais para o sul.

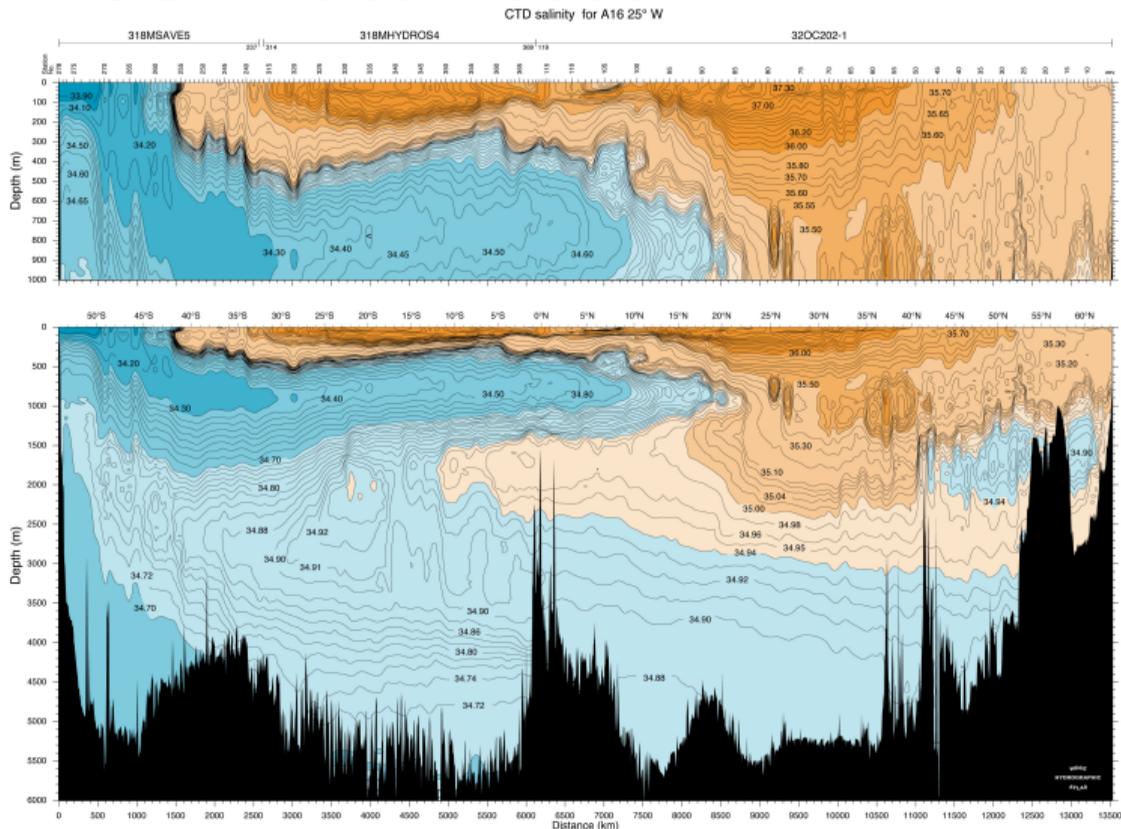
WOCE A16 θ

Potential Temperature [°C] for A16 25° W



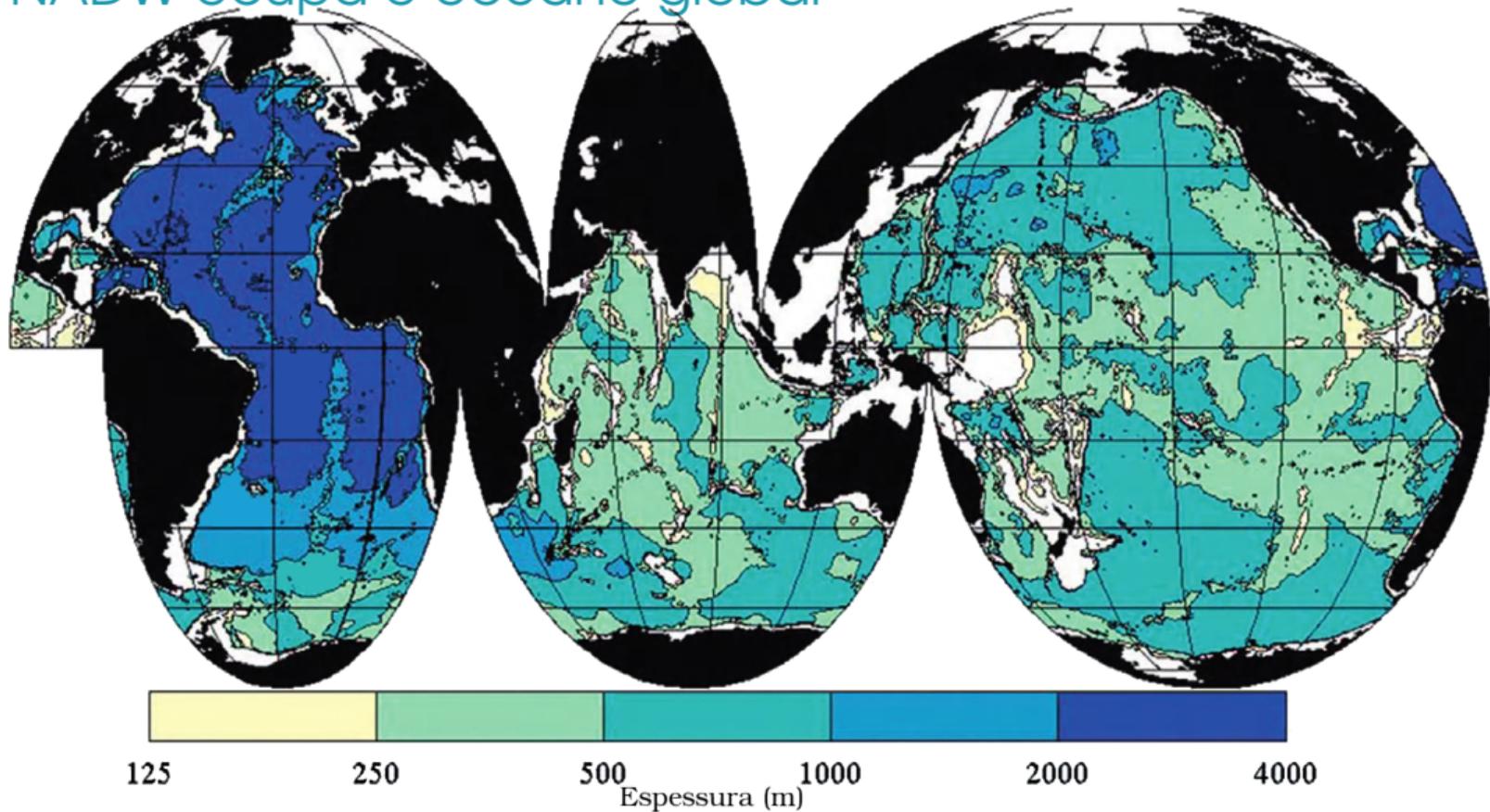
- Temperatura potencial.
- Difere + de γ^N no HN.
- Mediterrâneo, o salgado.
- Insuficiente para determinar densidade.

WOCE A16 Salinidade

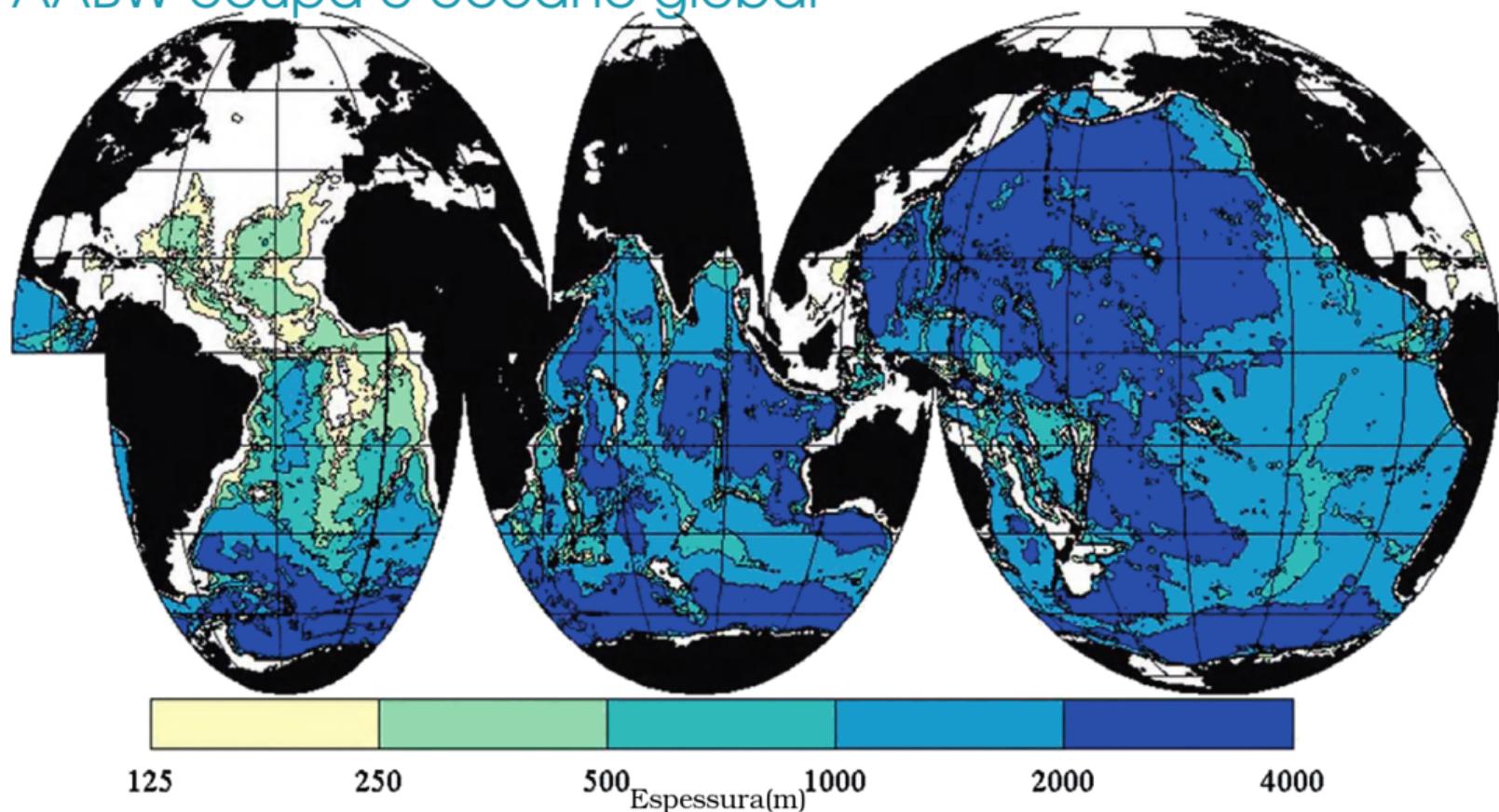


- Salinidade *in-situ*.
- Menor correlação com γ^N .
- Mediterrâneo muito evidente.
- Oceano Austral menos salgado.

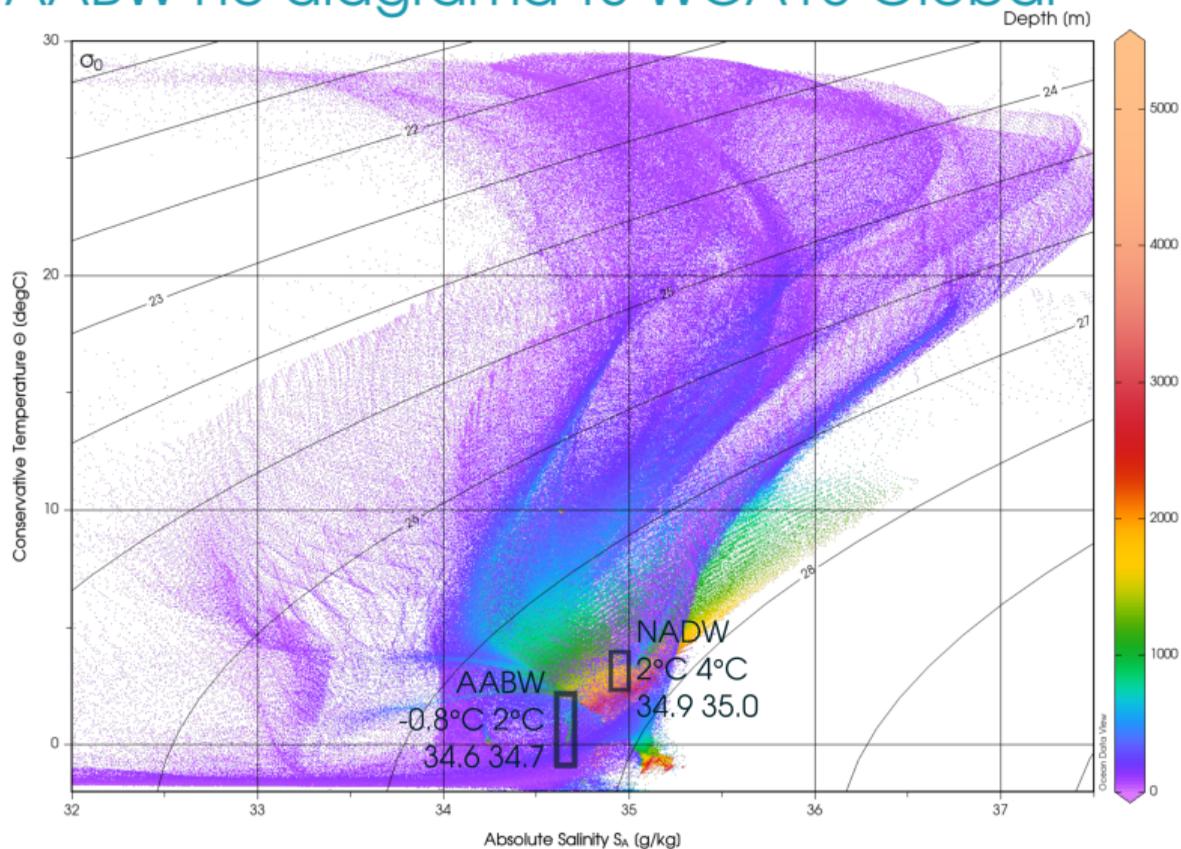
NADW ocupa o oceano global



AABW ocupa o oceano global



NADW e AABW no diagrama TS WOA18 Global

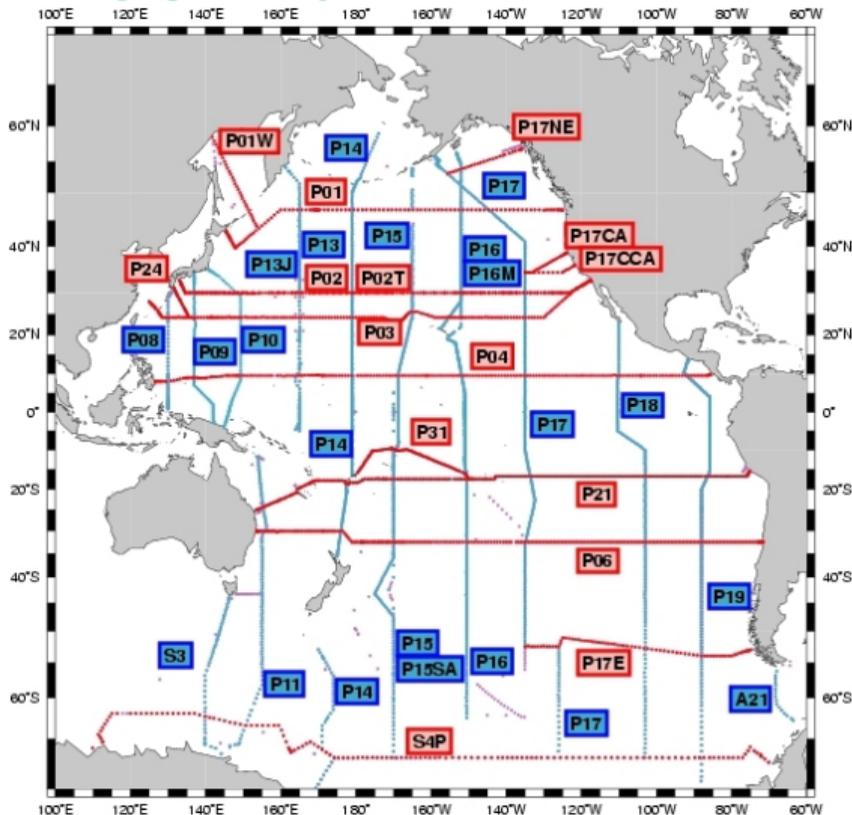


Roteiro

11 Circulação Termohalina

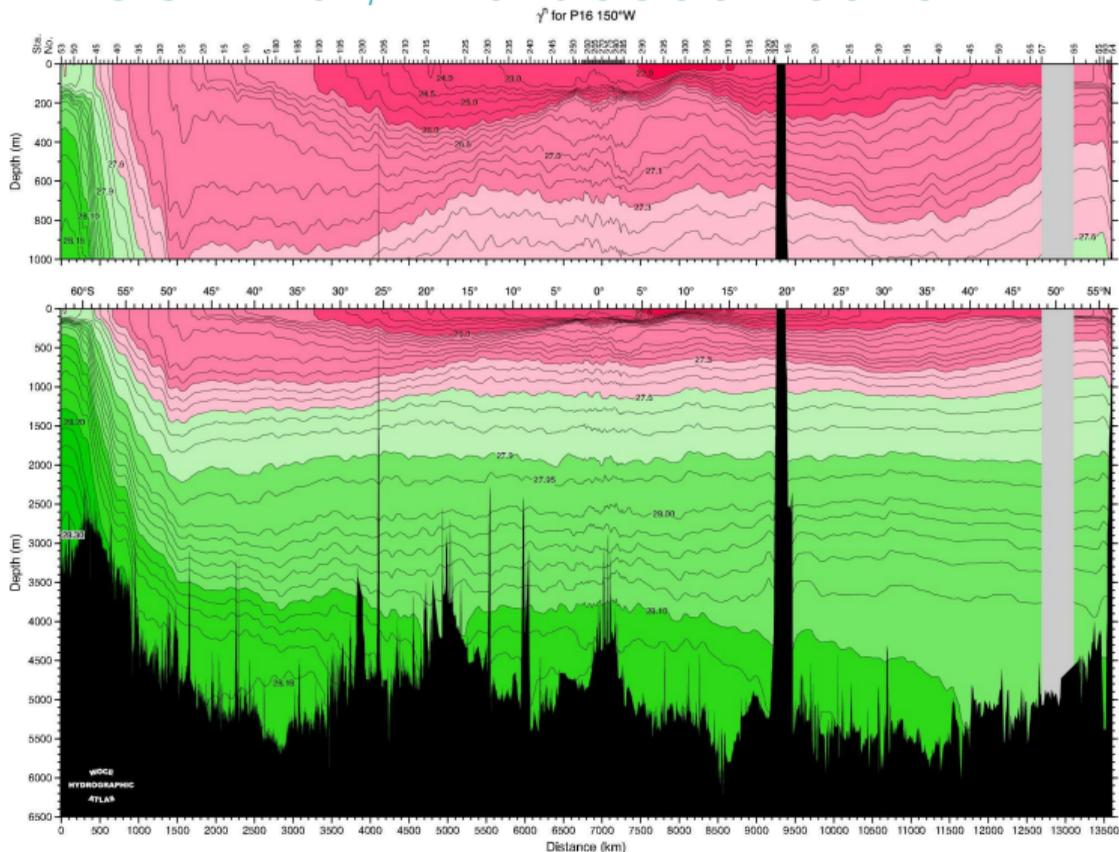
- Para começo de conversa...
- Esteira Rolante
- Sobre a Formação
- Base Observacional no Atlântico
- WOCE no Pacífico e o Índico
- Síntese 3D da Circulação
- Porque eu me preocupo?

WOCE P16



- ODV: Alfred Wegener Institute, baixe o software e os dados.
- Excelente ferramenta exploratória, feito por/para oceanógrafos.
- Figuras de boa qualidade, cálculos precisos.
- P16 cruza o Pacífico de norte a sul.

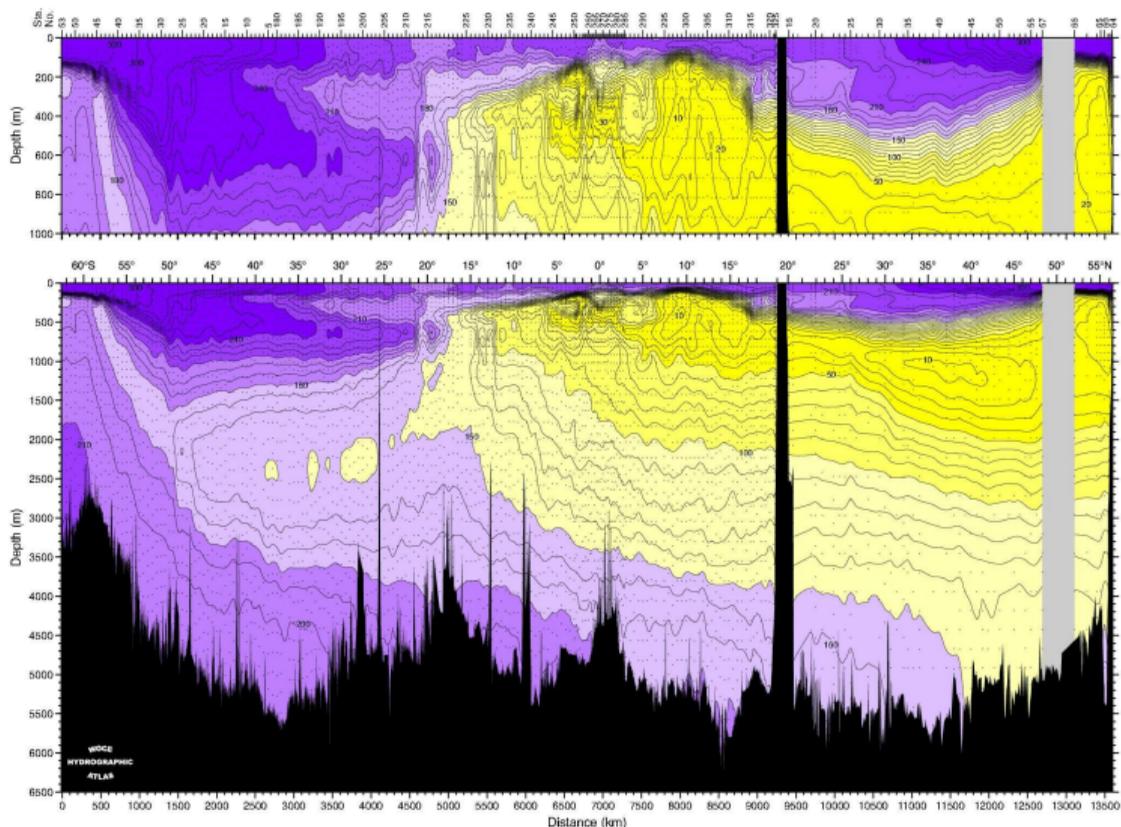
WOCE P16 γ^N Densidade Neutra



- Lado sul semelhante ao Atlântico.
- Lado norte é bem diferente.
- AABW se estende bem ao norte.
- Aloha!

WOCE P16 Oxigênio

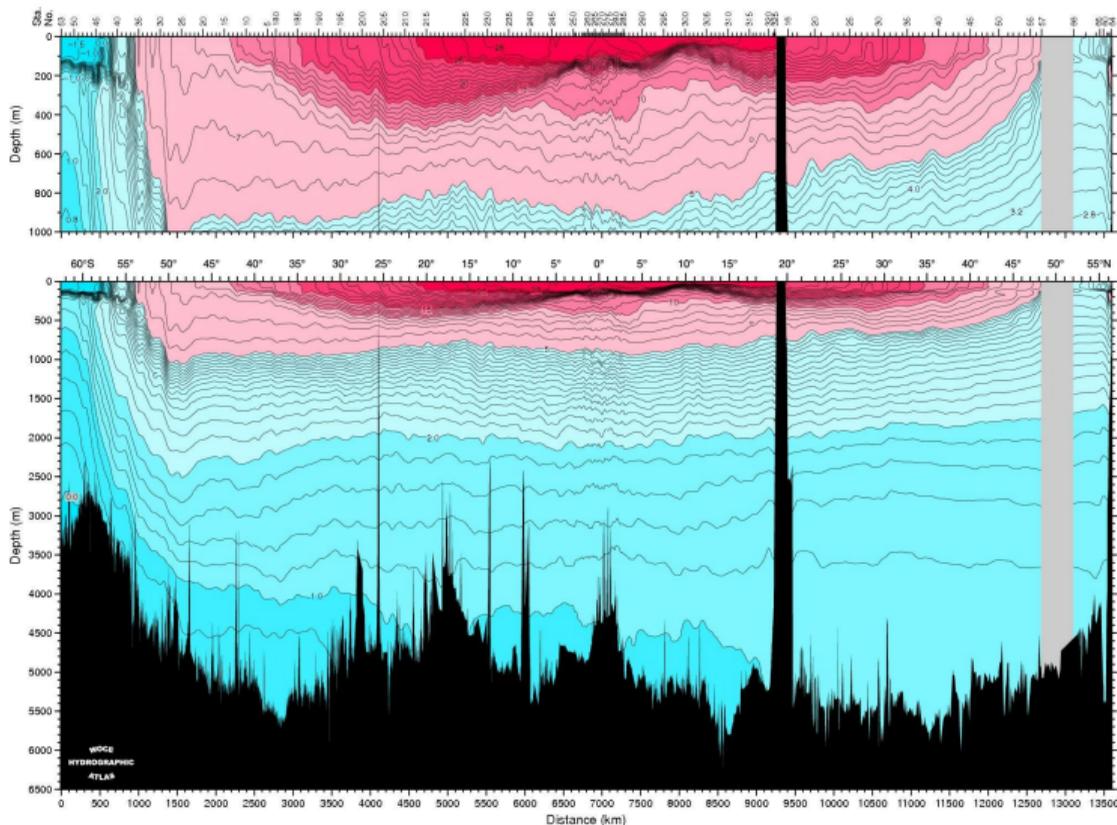
Oxygen ($\mu\text{mol/kg}$) for P16 150°W



- Roxo = mais recente.
- Amarelo = menos O₂.
- Assimetria N/S mais acentuada que no Atlântico
- AABW avança mais para o norte.

WOCE P16 θ

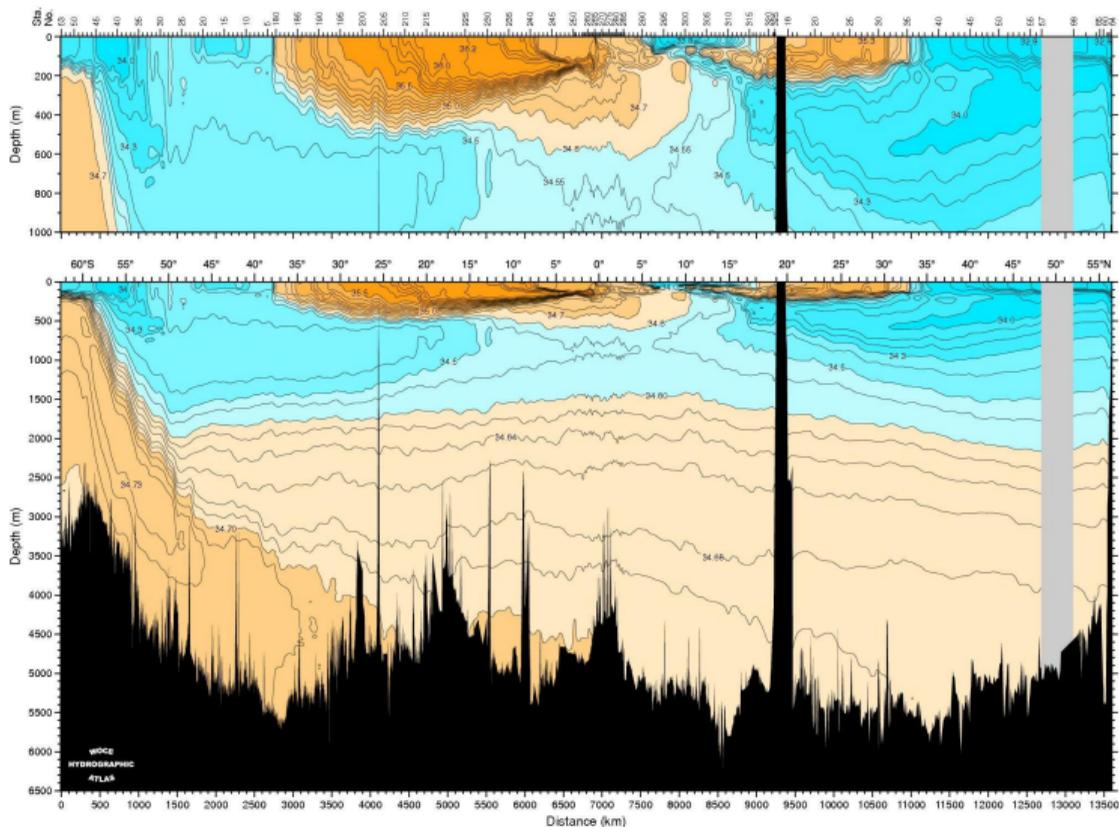
Potential Temperature (°C) for P16 150°W



- Muito correlacionada com γ^N .
- Temperatura domina o campo de densidade.
- Difere do Atlântico inclusive nas extremidades

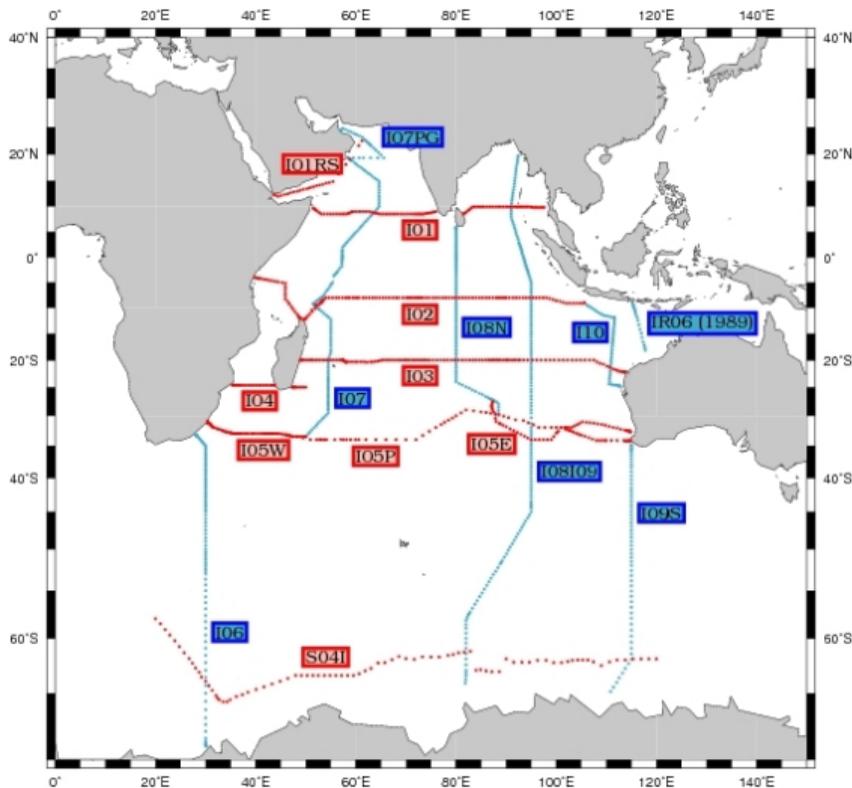
WOCE P16 Salinidade

CTD Salinity for P16 150°W



- E-P domina, dá até para achar a ITCZ
- Distinta do Atlântico, simetria NS.
- Baixa correlação com γ^N
- Mais fresco.

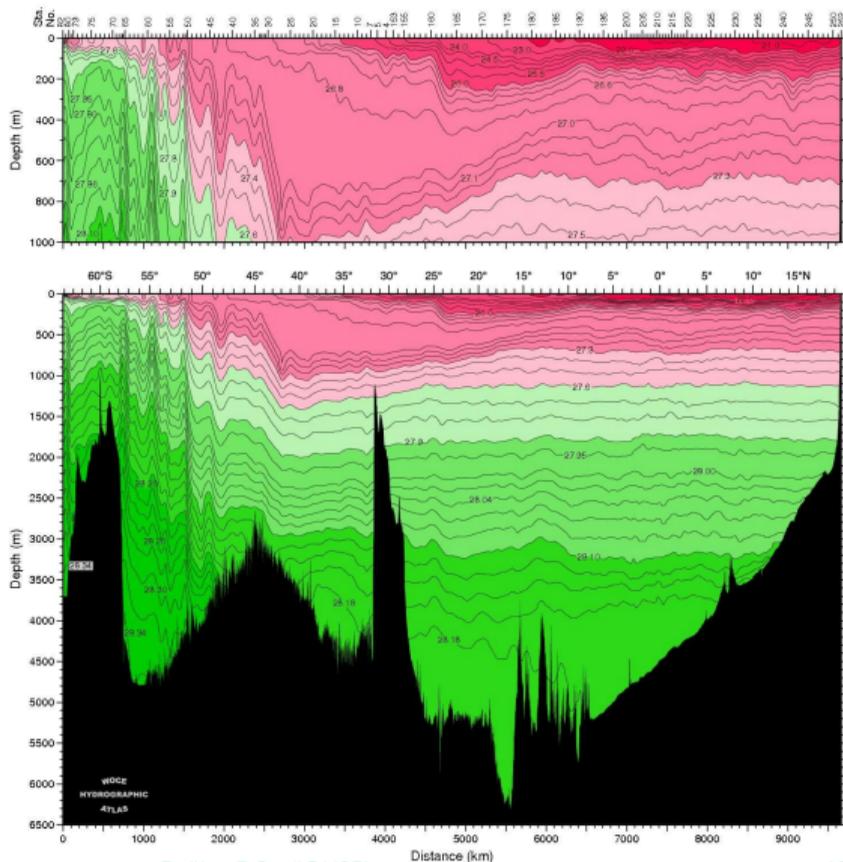
WOCE I08I09



- Vai da Antártica ao Golfo de Bengala.
- Não toca na costa da Antártica.
- Chega só até 20°N, trópicos.
- Note o vazio de dados no Oceano Austral.

WOCE I08109 γ^N Densidade Neutra

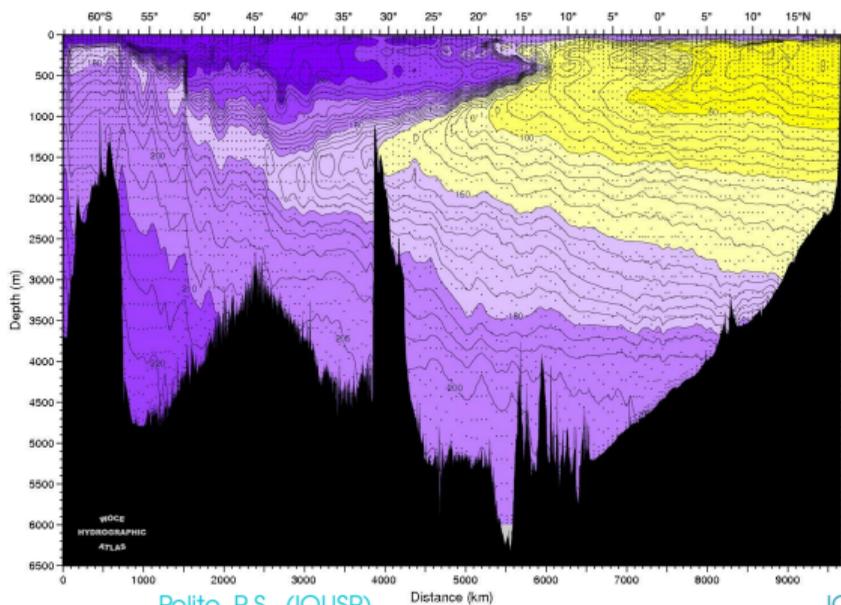
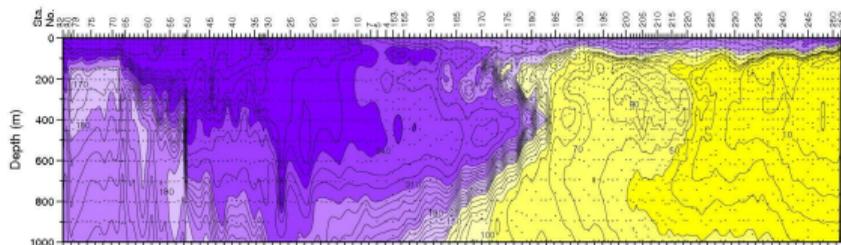
Neutral Density (kg/m^3) for 1819 95°E



- Lado sul: afundamento das isopicnais mais suave
- Lado norte parece que foi cortado.
- AABW se estende pela bacia toda, vide Slide 26.
- Pelo que vimos no Slide 25 a NADW também.

WOCE I08I09 Oxigênio

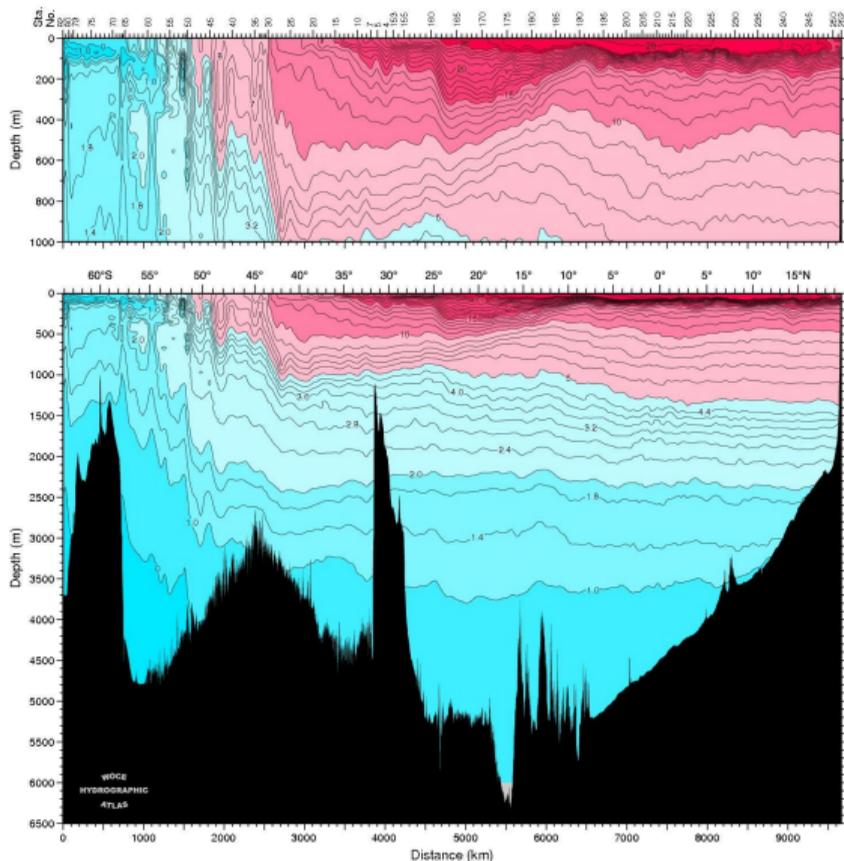
Oxygen ($\mu\text{mol/kg}$) for I819 95°E



- Roxo = mais recente.
- Amarelo = menos O₂.
- Assimetria N/S como a do Pacífico.
- AABW avança mais para o norte que no Atlântico.

WOCE I08109 θ

Potential Temperature (°C) for I08109 95°E



Polito, P.S. (IOUSP)

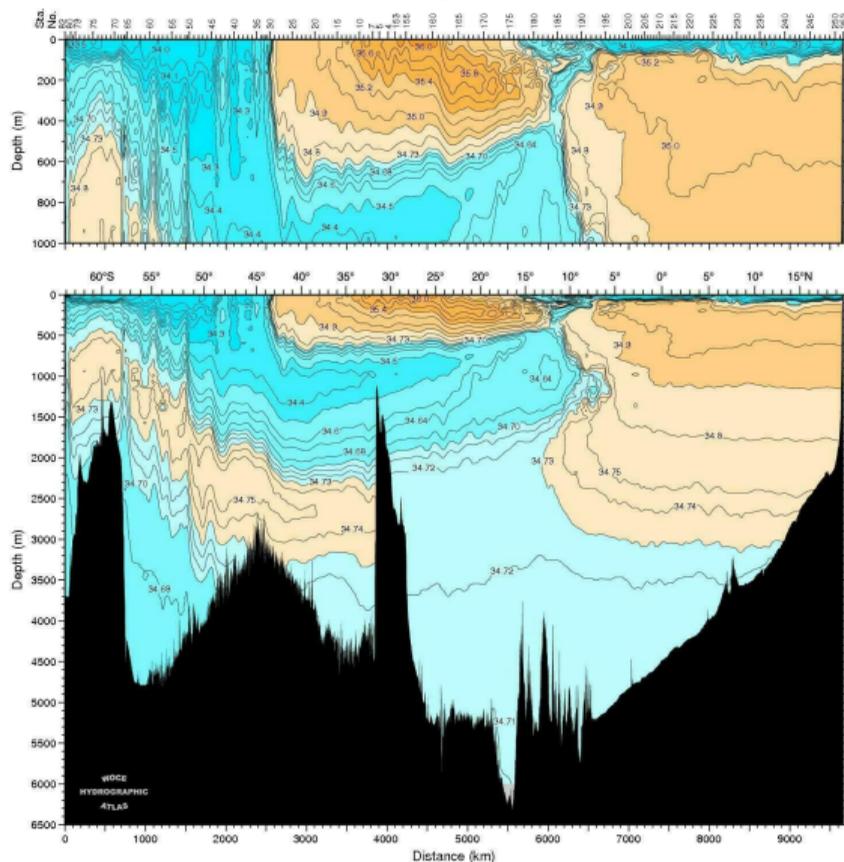
IOF1223

- Muito correlacionada com γ^N .
- Temperatura domina o campo de densidade.
- Difere do Atlântico inclusive na Antártica.
- Razoável para determinar densidade.

São Paulo, 2021

WOCE I08I09 Salinidade

CTD Salinity for I08I09 95° E



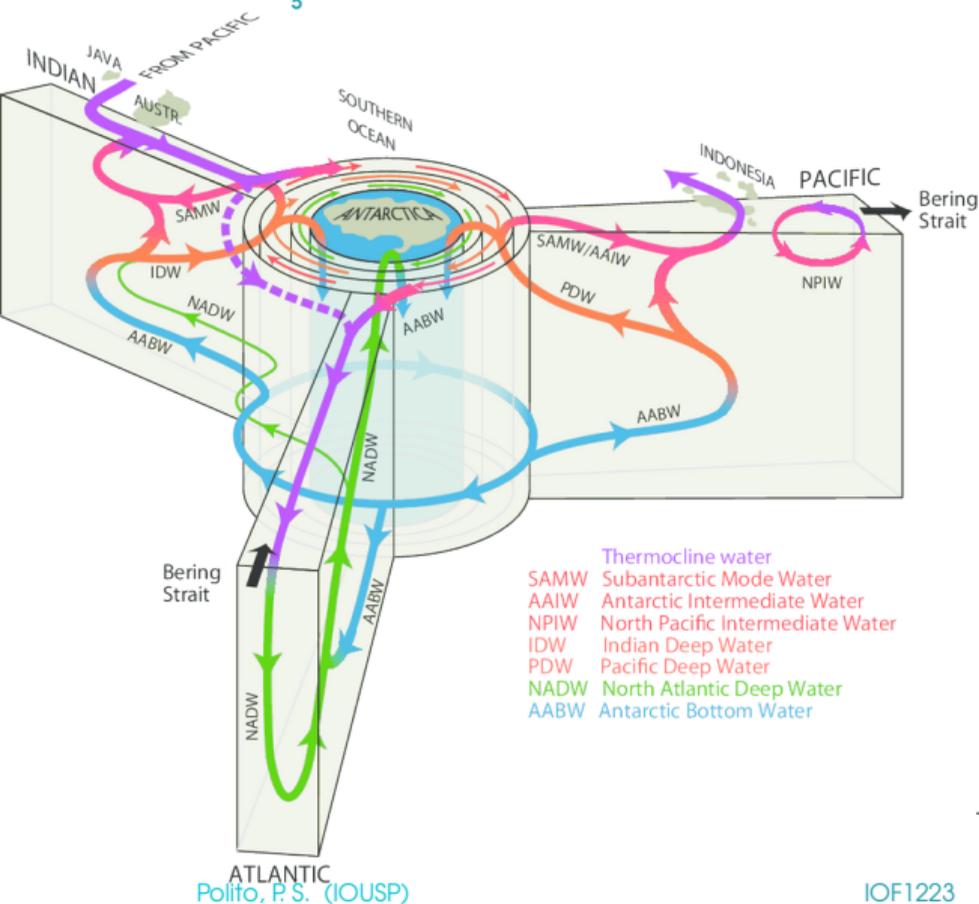
- E-P domina.
- Assimetria em relação ao equador.
- Máximo de precipitação em 7°S-15°S
- Ganges e Bhramaputra → Golfo de Bengala.

Roteiro

11 Circulação Termohalina

- Para começo de conversa...
- Esteira Rolante
- Sobre a Formação
- Base Observacional no Atlântico
- WOCE no Pacífico e o Índico
- Síntese 3D da Circulação
- Porque eu me preocupo?

Circulação termohalina 3D



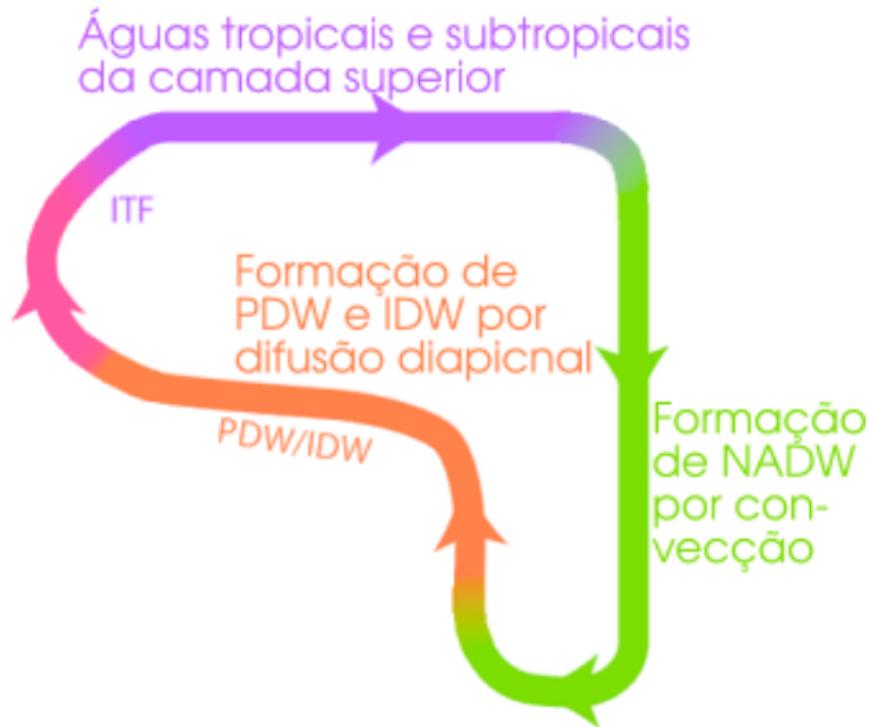
- Oceano Austral barotrópico.
- Conecta as 3 bacias^a.
- AABW no fundo.
- NADW sobre ela.
- Os circuitos (y, z) fecham por diversos processos.
- Tempo: (10^2 - 10^3) anos.

^aSchmitz 1996, mod.: Talley 2013

Detalhamento dos processos Oceano Austral até baixas latitudes do Indo-Pacífico

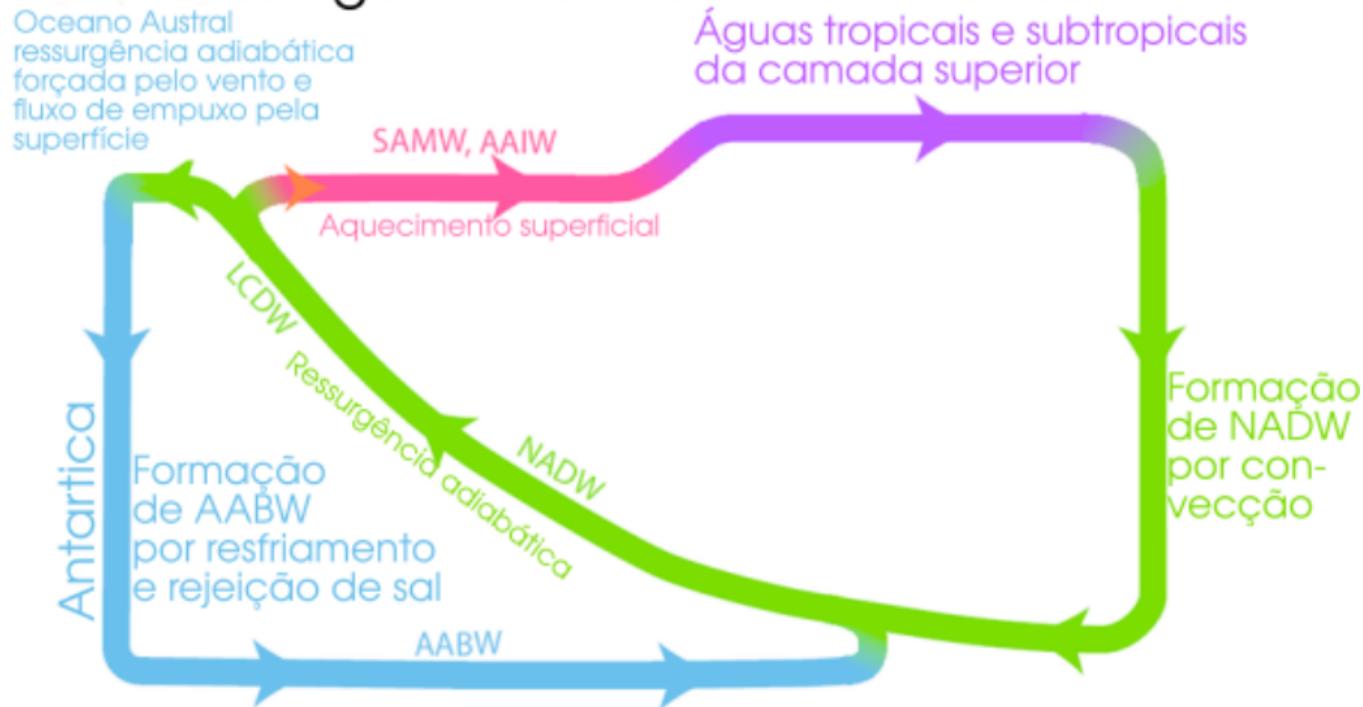


Detalhamento dos processos Baixas latitudes do Indo-Pacífico sem o Oceano Austral



Detalhamento dos processos

Ressurgência no Oceano Austral sem a ressurgência em baixas latitudes



De onde vem esses diagramas?

- Cálculo do transporte de volume \vec{V} e de massa M .
- Cálculo do transporte de calor \vec{Q} , sendo a massa conservada.

$$U = \int_z \int_y u \, dz \, dy \quad V = \int_z \int_x v \, dz \, dx \quad W = \int_x \int_y \nabla_h \cdot \vec{V}_h \, dx \, dy$$

$$Q_i = \int_z \int_y \rho c_p T u \, dz \, dy \quad Q_j = \int_z \int_x \rho c_p T v \, dz \, dx \quad Q_k = \int_x \int_y \nabla_h \cdot \vec{Q}_h \, dx \, dy$$

c_p Calor específico (J/kgK).

h Componentes horizontais.

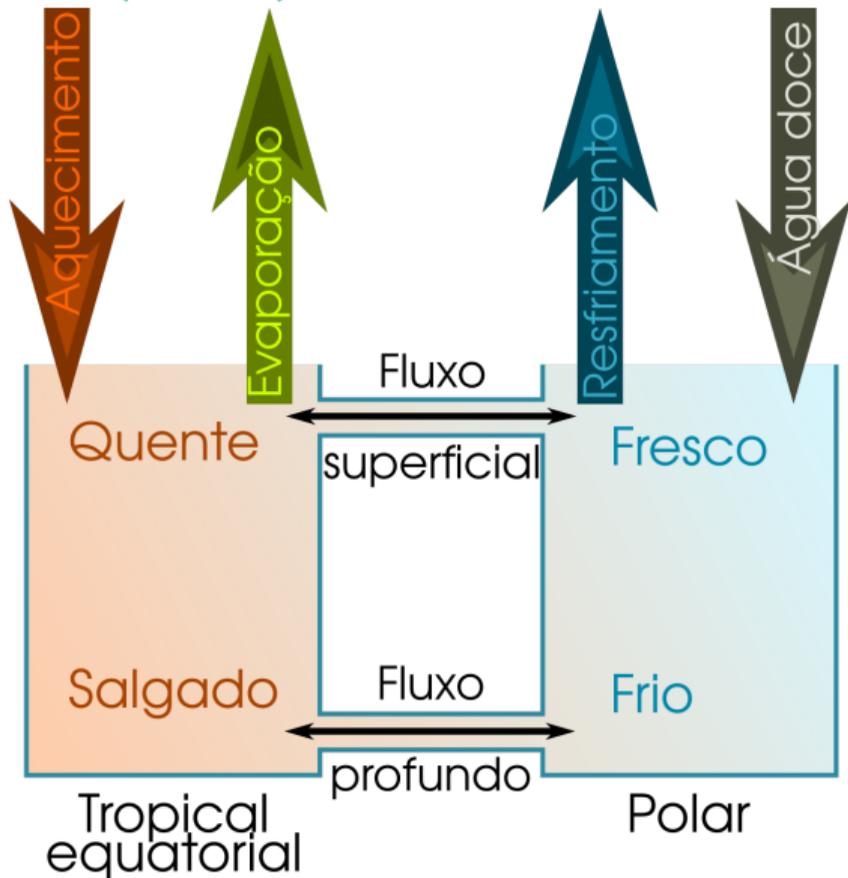
T Temperatura em Kelvin.

Roteiro

11 Circulação Termohalina

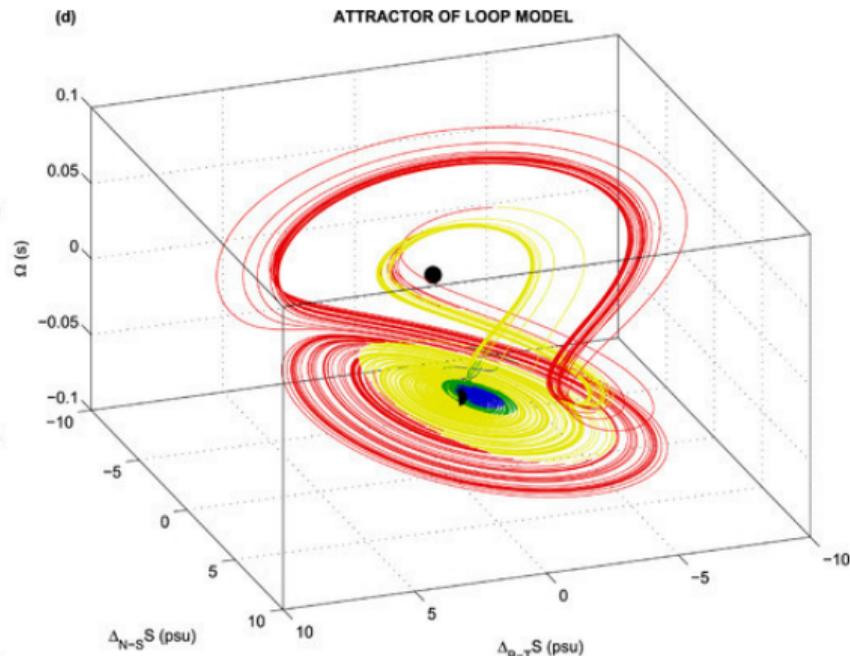
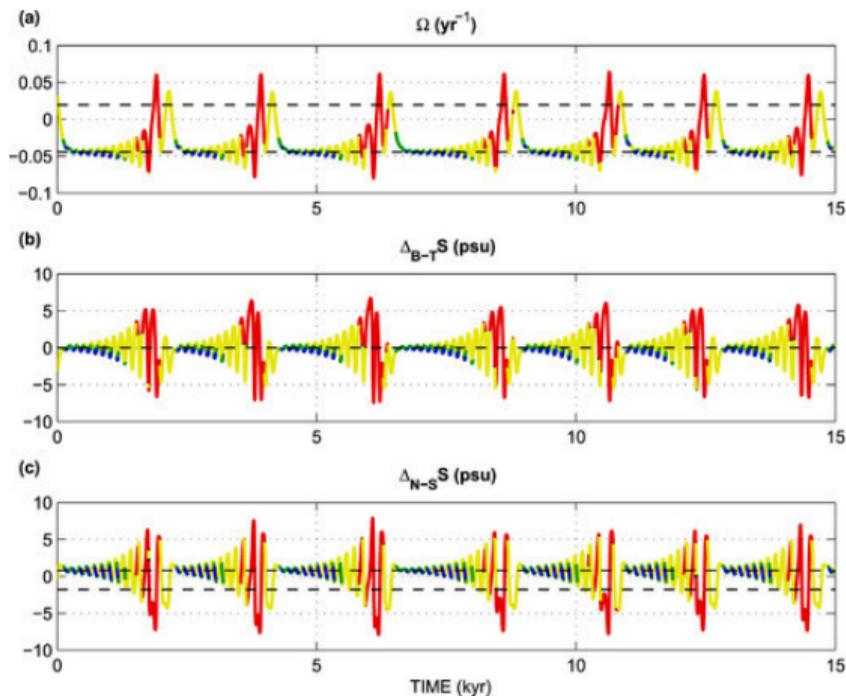
- Para começo de conversa...
- Esteira Rolante
- Sobre a Formação
- Base Observacional no Atlântico
- WOCE no Pacífico e o Índico
- Síntese 3D da Circulação
- Porque eu me preocupo?

O (outro) modelo de Stommel



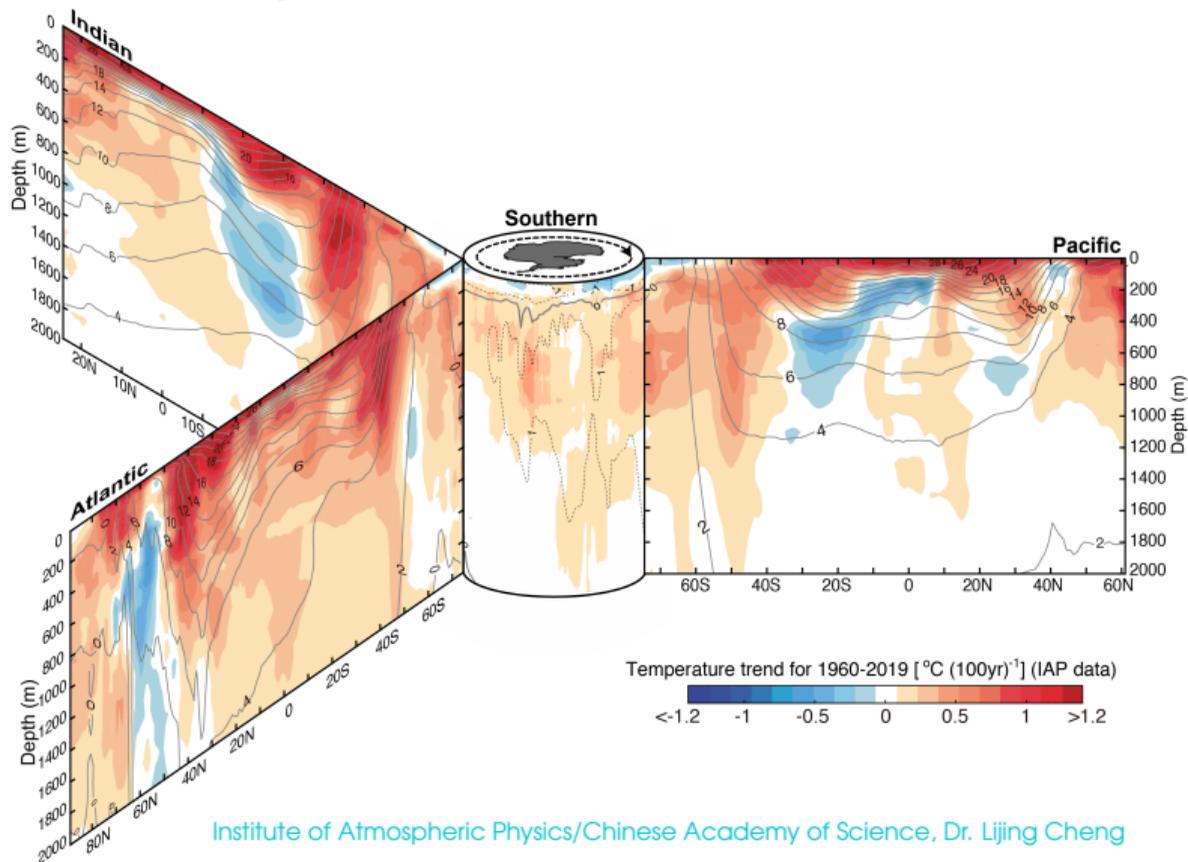
- Modelo livre tem feedback negativo, diferenças diminuem.
- Depende das trocas na superfície, da difusão de sal e calor e das condições iniciais.
- **Tem estados estáveis e instáveis.**

Modelo simples, solução caótica



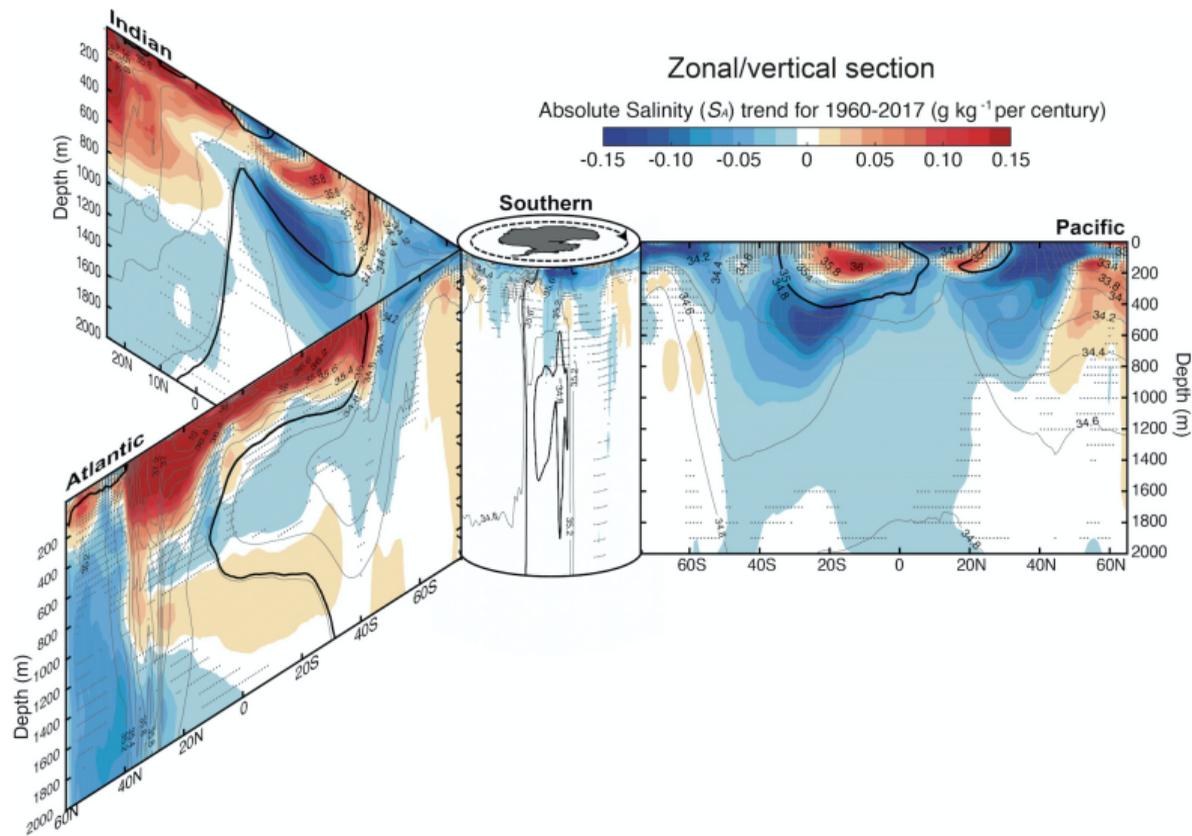
Florian Sévellec and Alexey V. Fedorov, JC 2014

Mudanças na temperatura 1960-2019

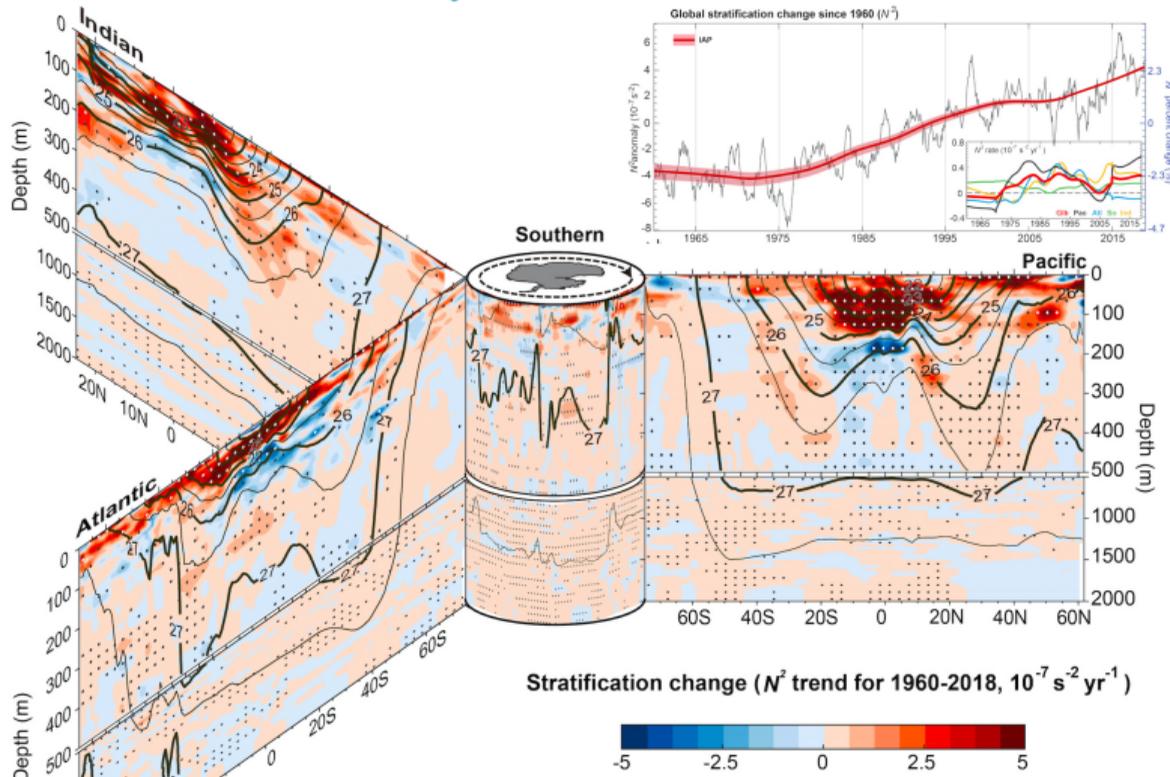


Institute of Atmospheric Physics/Chinese Academy of Science, Dr. Lijing Cheng

Mudanças na salinidade 1960-2017



Mudanças na estratificação 1960-2018



Pontos a ponderar

- O conceito de **célula de revolvimento meridional (MOC)** é mais amplo e adequado do que o de que circulação termohalina.
- Não é uma questão de “água mais densa afunda e menos densa boia”.
- A disponibilização de energia potencial põe o sistema em movimento.
- Vários processos físicos contribuem:
 - mistura e difusão (diapinal ou isopicnal),
 - ressurgência e advecção (diabática ou adiabática),

Pontos a ponderar ... continuação

- fluxos de calor e sal pela superfície,
 - mudança de estado e
 - rejeição de salmoura.
-
- Águas de fundo e profundas só se formam nas regiões polares do Atlântico e do Oceano Austral.
 - O transporte de calor e sal entre as bacias é crucial, caro e difícil de medir.
 - Investimento de longo termo é necessário.

Pontos a ponderar ... continuação

- O modelo de caixinhas de Stommel (1961) é no mínimo intrigante.
- Ele sugere que a transição entre estados estáveis pode ser relativamente rápida e difícil de prever.
- Observações de 1960 para cá mostram variações significativas em T, S e N.