

FISB24

Distribuições típicas das
características das águas

Mauro Cirano





Sumário

- Introdução
- Distribuição da temperatura nos oceanos
- Distribuição da salinidade
- Distribuição da densidade
- Oxigênio dissolvido
- Nutrientes e outros traçadores
- Idade, tempo de retorno e taxa de ventilação
- Propriedades óticas



Introdução

- A ideia neste capítulo é destacar as distribuições que são comuns, por exemplo, ao longo dos Oceanos Atlântico, Pacífico e Índico, ou ao longo de regiões específicas (subtropical, equatorial, etc.)
 - Esta visão geral será importante para entender não só os fluxos de calor e água doce, mas também os detalhes da circulação e da distribuição das propriedades em cada bacia oceânica
- A maioria das propriedades da água é inicialmente definida na superfície do mar, sendo então modificada no interior do oceano através de um processo chamado de **ventilação**
 - A ventilação representa a conexão entre a superfície e o interior do oceano



Introdução

- O oceano é geralmente verticalmente estratificado na densidade e os fluxos no interior do oceano são predominantemente ao longo de superfícies isentrópicas
 - Em função disto, as propriedades da água são uteis para identificar o caminho dos fluxos da superfície para o interior do oceano e também para identificar as forçantes e os processos de mistura, assim como a sua localização
- É importante destacar que a maioria das características da água tem amplas variações na direção vertical, enquanto que as variações ao longo da horizontal ocorrem ao longo de distâncias bem maiores
 - No equador, a temperatura pode variar de 25°C (superfície) até 5°C (profundidade de 1000 m), enquanto que a mesma variação térmica na superfície só será encontrada numa distância de cerca de 5000 km ao norte ou ao sul



Introdução

- Entretanto, estas variações horizontais, mesmo que graduais, são importantes porque:
 - Diferenças horizontais de densidade estão associadas à diferenças horizontais de pressão, que geram a circulação horizontal. Esta circulação é muito mais intensa do que a circulação vertical
- Grande parte da variação geográfica das propriedades nos oceanos e na atmosfera ocorre na direção norte-sul (meridional). As propriedades são geralmente mais uniformes na direção leste-oeste (zonal)
 - Uma importante exceção a este padrão é a variação zonal que ocorre próxima aos contornos, principalmente no lado oeste dos oceanos



Introdução

- Em função das faixas de latitude, podemos dividir as regiões da seguinte forma:
 - A região **equatorial** se refere a zona próxima ao equador (poucos graus de latitude), enquanto que a região **tropical** se limita a região entre os trópicos (23°N – 23°S)
 - Na região equatorial o efeito da rotação da Terra é mínimo e o padrão de circulação é bem distinto
 - Na região tropical existe um fluxo de calor líquido em direção ao oceano, que o aquece
 - Estas duas regiões combinadas recebem o nome de **baixas latitudes**
 - Em contrapartida, as regiões próximas aos polos recebem o nome de **altas latitudes**
 - As regiões **subtropicais** referem-se às zonas de latitudes médias fora das regiões tropicais e que são caracterizadas por centros atmosféricos de alta-pressão



Introdução

- O termo **polar** é geralmente usado para as regiões Ártica e Antártica, onde existe uma perda líquida de calor do oceano para a atmosfera (esfriamento) e formação de gelo
- O termo **sub-polar** se refere a região entre as condições polares e aquelas de latitudes médias temperadas
- As maiores variações sazonais ocorrem em zonas **temperadas** (entre 30-60°N ou S)
- Uma importante conceito a ser introduzido é o de uma **massa de água:**
 - É um corpo de água que teve suas propriedades definidas por um único processo de identificação. Este processo imprime propriedades que identificam a massa de água a medida que ela é advectada e misturada ao longo do oceano. A maioria das massas de água é formada na superfície do mar, onde suas características de identificação estão diretamente relacionados às forçantes superficiais



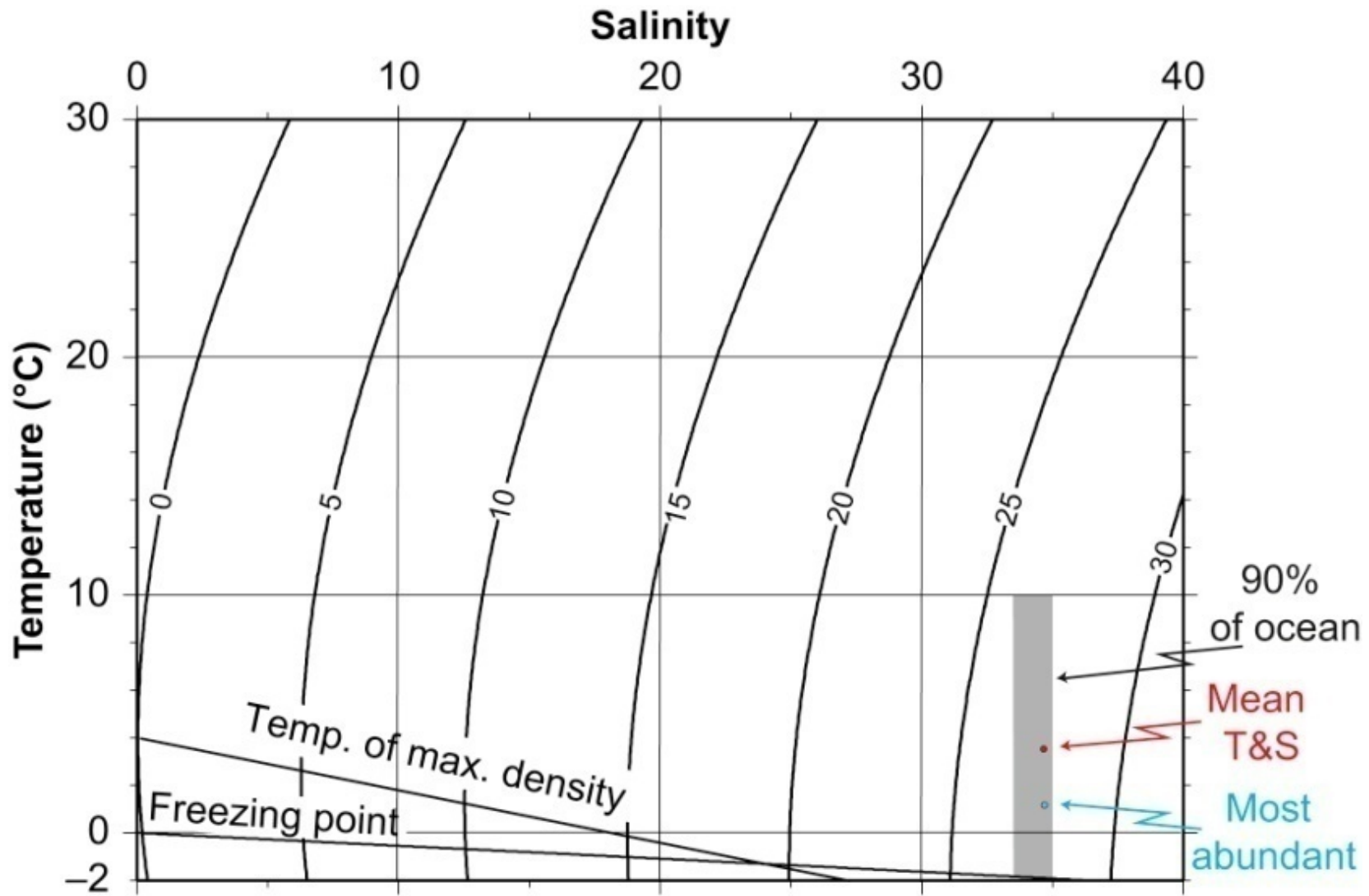
Introdução

- Os nomes das massas de água são geralmente expressos com iniciais em letras maiúsculas
- Uma **água tipo** é um ponto no espaço da propriedade, geralmente definido por uma temperatura e uma salinidade.
- Cada massa de água está associada às suas características de identificação e ao processo oceânico que dá origem a estas características
- A **Água do Mediterrâneo** (MW) é uma camada de salinidade máxima no Oceano Atlântico Norte localizada em profundidades intermediárias (1000-2000 m). Quando vista em uma superfície horizontal, está associada a um máximo de salinidade lateral. Esta fonte de salinidade é a saída de água Mar Mediterrâneo. A alta salinidade é resultado do excesso de evaporação no Mar Mediterrâneo. A faixa de densidade da MW é função não só da alta densidade na região de formação, mas também da intensa mistura com as águas a medida que ela desce pelo talude continental



Introdução

- Considerando-se as propriedades oceânicas e as massas de água associadas, costuma-se dividir a estrutura vertical dos oceanos em 4 camadas: **superior**, **intermediária**, **profunda** e de **fundo**
- Se considerarmos a distribuição da temperatura e salinidade, temos que:
 - 75% do volume total das águas oceânicas está entre $0^{\circ}\text{C} < T < 6^{\circ}\text{C}$ e 34-35 psu
 - 50% do volume total das águas oceânicas está entre $1,3^{\circ}\text{C} < T < 3,8^{\circ}\text{C}$ e 34,6-34,7 psu
 - A temperatura e a salinidade média dos oceanos são $3,5^{\circ}\text{C}$ e 34,6 psu, respectivamente

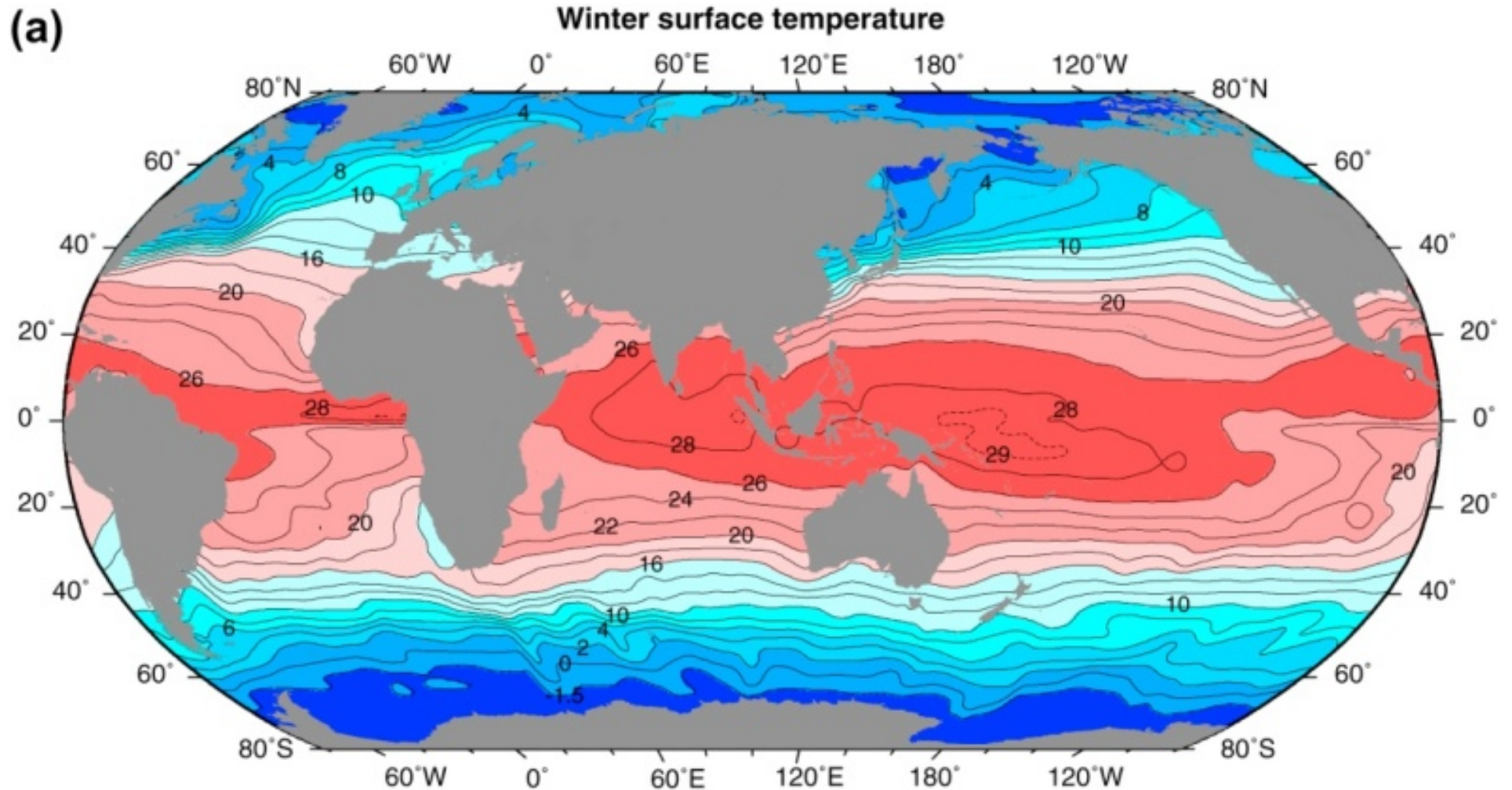


Valores da densidade σ_t (linhas curvas) e a localização da máxima densidade e do ponto de congelamento (a pressão atmosférica) para a água do mar em função da temperatura e da salinidade. A densidade é dada por ρ e igual a $1000 + \sigma_t$ (unidade de kg/m^3). Extraído de Talley et al (2011).



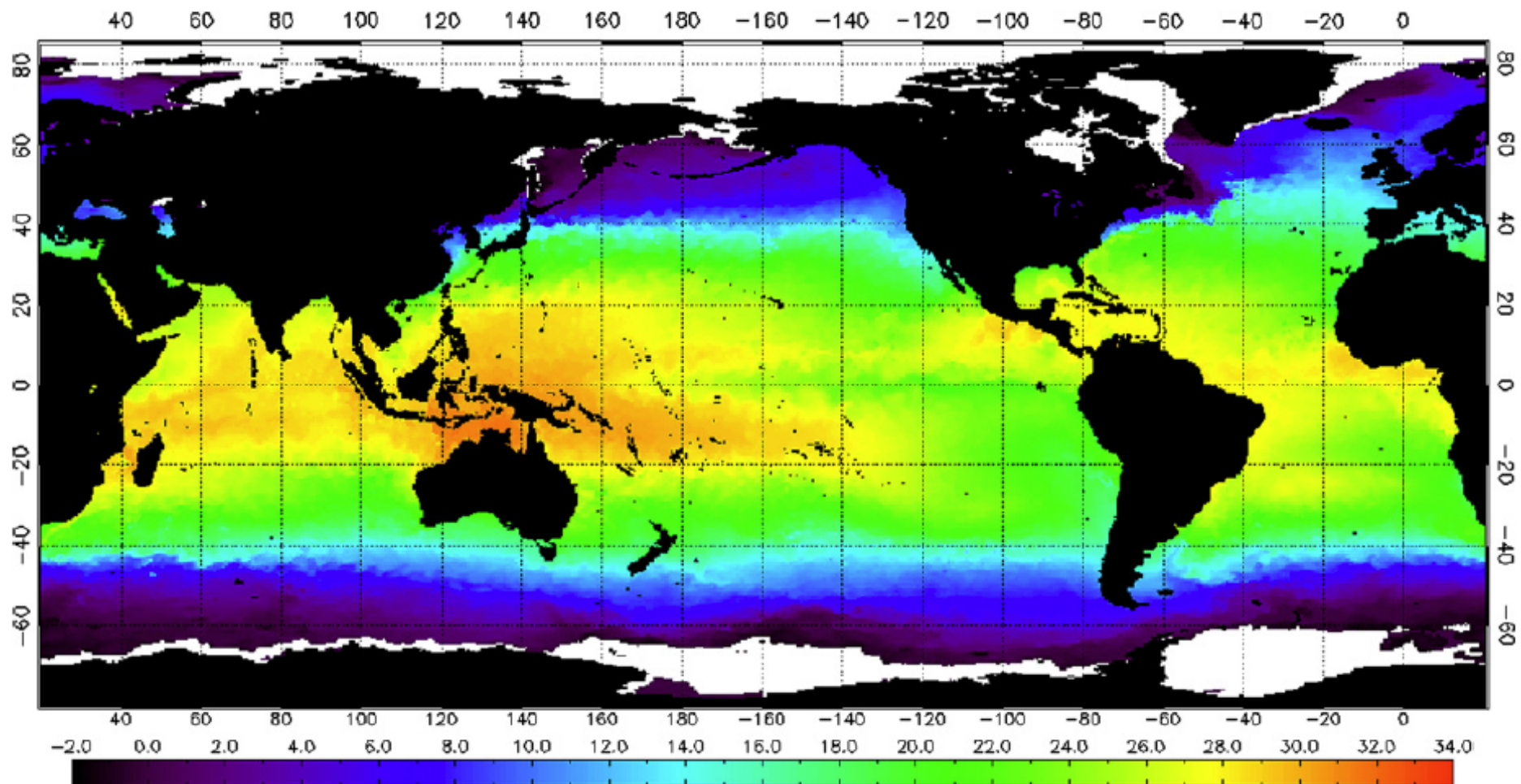
Distribuição de temperatura nos oceanos

- Os oceanos e a atmosfera apresentam uma forte interação na camada superficial. As forçantes superficiais da atmosfera e do sol são responsáveis pelos padrões gerais da distribuição da **Temperatura na Superfície do Mar (TSM)**
 - Altas TSMs nos trópicos são função do aquecimento líquido e baixas TSMs em altas latitudes são função do esfriamento líquido
 - Além desta variação meridional, as estruturas mais complexas de TSM são o resultado da circulação oceânica e das variações espaciais da forçante atmosférica



(a) Temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$) dos oceanos no **inverno** (janeiro – março ao norte do equador e julho - setembro ao sul do equador) com base em médias (climatológicas) baseadas em Levitus e Boyer (1994). Extraído de Talley et al (2011).

(b) NOAA/NESDIS 50 km Nighttime Sea Surface Temperature (degrees C), 1/3/2008
(white regions indicate sea-ice)

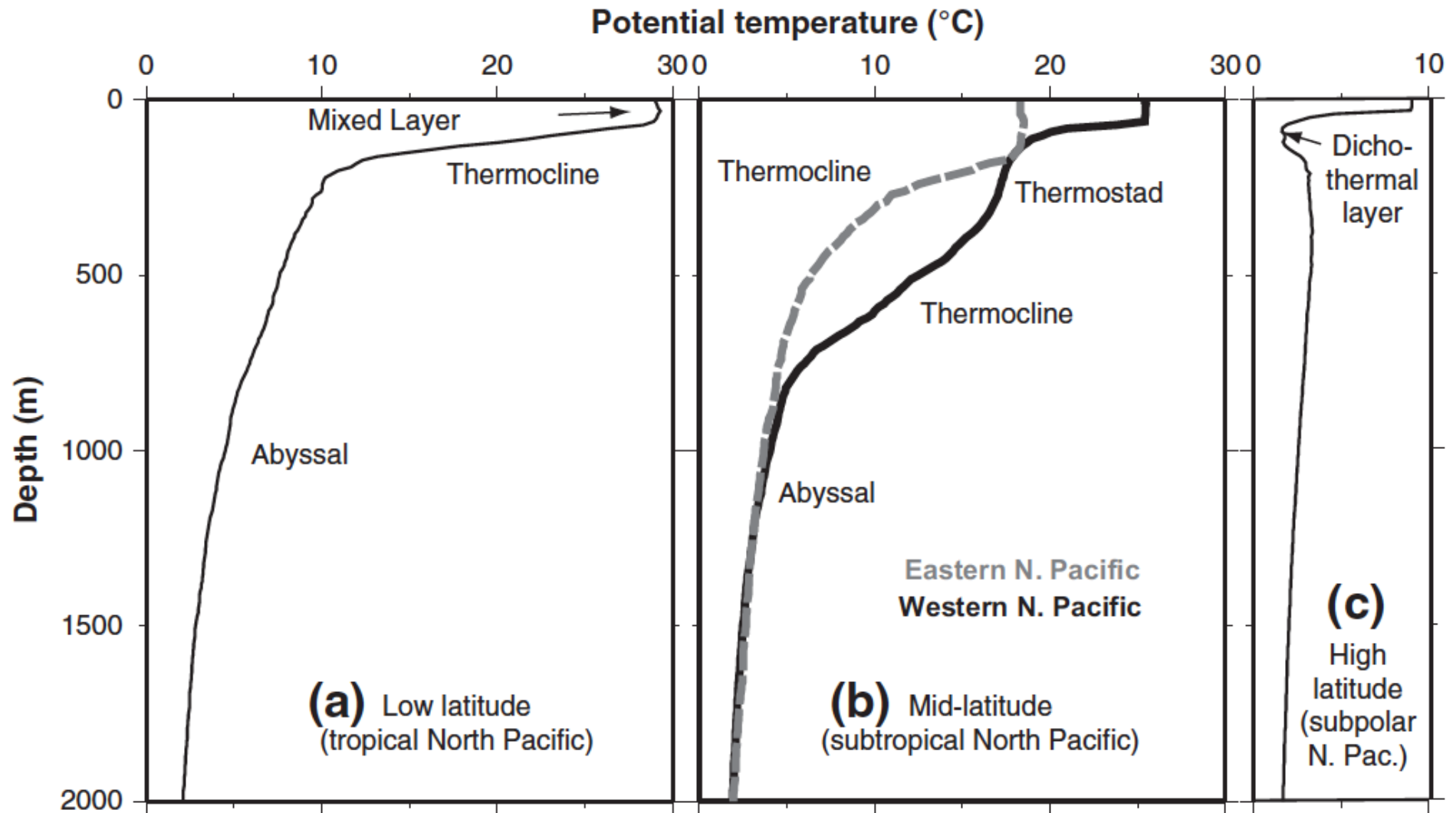


(b) Temperatura da superfície do mar obtida por satélite no infravermelho (°C; noite apenas). Média de 50 km e uma semana para 03 de janeiro de 2008. Branco indica o gelo do mar. NOAA NESDIS (2009). Extraído de Talley et al (2011).



Distribuição de temperatura nos oceanos

- Abaixo da superfície, a referência da temperatura é geralmente a temperatura potencial, para remover o efeito da pressão na temperatura
- A estrutura vertical da temperatura potencial pode ser dividida em 3 zonas: **camada de mistura, termoclina e camada abissal**
 - Esta é uma estrutura típica de baixas e médias latitudes
 - Em altas latitudes, onde as variações de temperatura são menores, esta estrutura é diferente e um mínimo de temperatura pode ocorrer logo abaixo da camada de mistura. As águas abaixo deste mínimo apresentam temperatura mais elevadas (a coluna d'água só é estável devido a compensação causada pela salinidade)



Perfil típico de temperatura potencial para o oceano aberto (a) para a região tropical do oeste do Oceano Pacífico Norte (5°N), (b) para a região subtropical do oeste e leste do Oceano Pacífico Norte (24°N) e (c) para a região subpolar do oeste do Oceano Pacífico Norte (47°N). Extraído de Talley et al (2011).



Distribuição de temperatura nos oceanos

- A **camada de mistura** é a camada superficial onde as propriedades são relativamente bem misturadas
 - No verão, em baixas latitudes, ela pode ser muito fina ou mesmo não existir
 - No inverno, em médias e altas latitudes, ela pode ter espessuras de centenas de metros e em regiões convectivas esta camada pode chegar até 2000 m
- A **termoclina** é uma faixa vertical onde existe um rápido decréscimo da temperatura com a profundidade
- Na **camada abissal**, a temperatura potencial decresce lentamente
- Em altas latitudes, o mínimo de temperatura próximo à superfície é chamado de camada **dicotérmica**. Esta estrutura só é mantida devido a estratificação salina



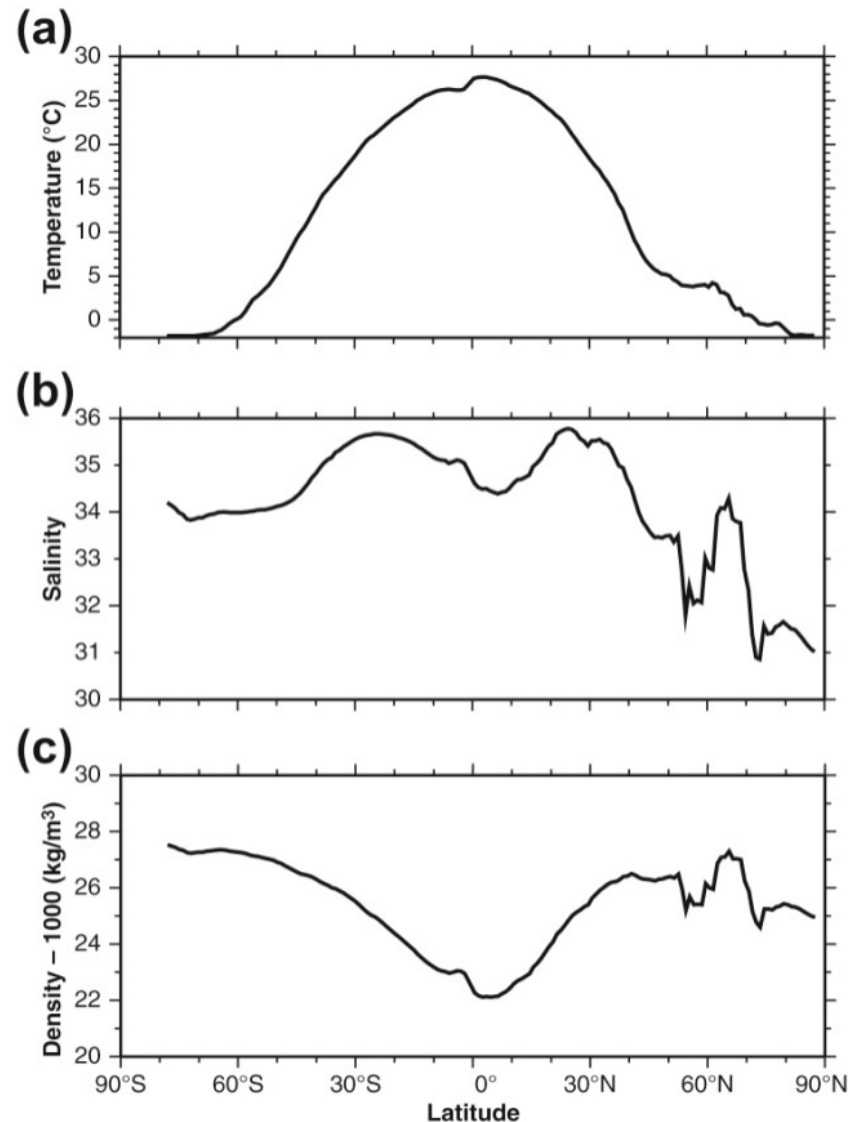
Distribuição de temperatura nos oceanos

- Em várias partes do oceano a densidade apresenta um relação muito próxima com a temperatura e apresenta uma estrutura vertical similar: uma camada superficial, a **picnoclina** e uma camada abissal
- A salinidade, por sua vez, já apresenta uma distribuição mais complicada
 - Em regiões de alta precipitação e/ou aporte fluvial (regiões subpolares e de altas latitudes e parte dos trópicos), a salinidade pode ser mais importante do que a temperatura para definir a estrutura vertical de densidade. Um estrutura típica inclui: uma camada superficial de água menos salina e uma **haloclina** separando esta camada das águas mais salinas abaixo

Temperatura superficial

- A distribuição média da TSM, tem uma relação próxima com a entrada de radiação de onda curta e forte correspondência com a densidade
- A salinidade tem um máximo subtropical e um mínimo no equador

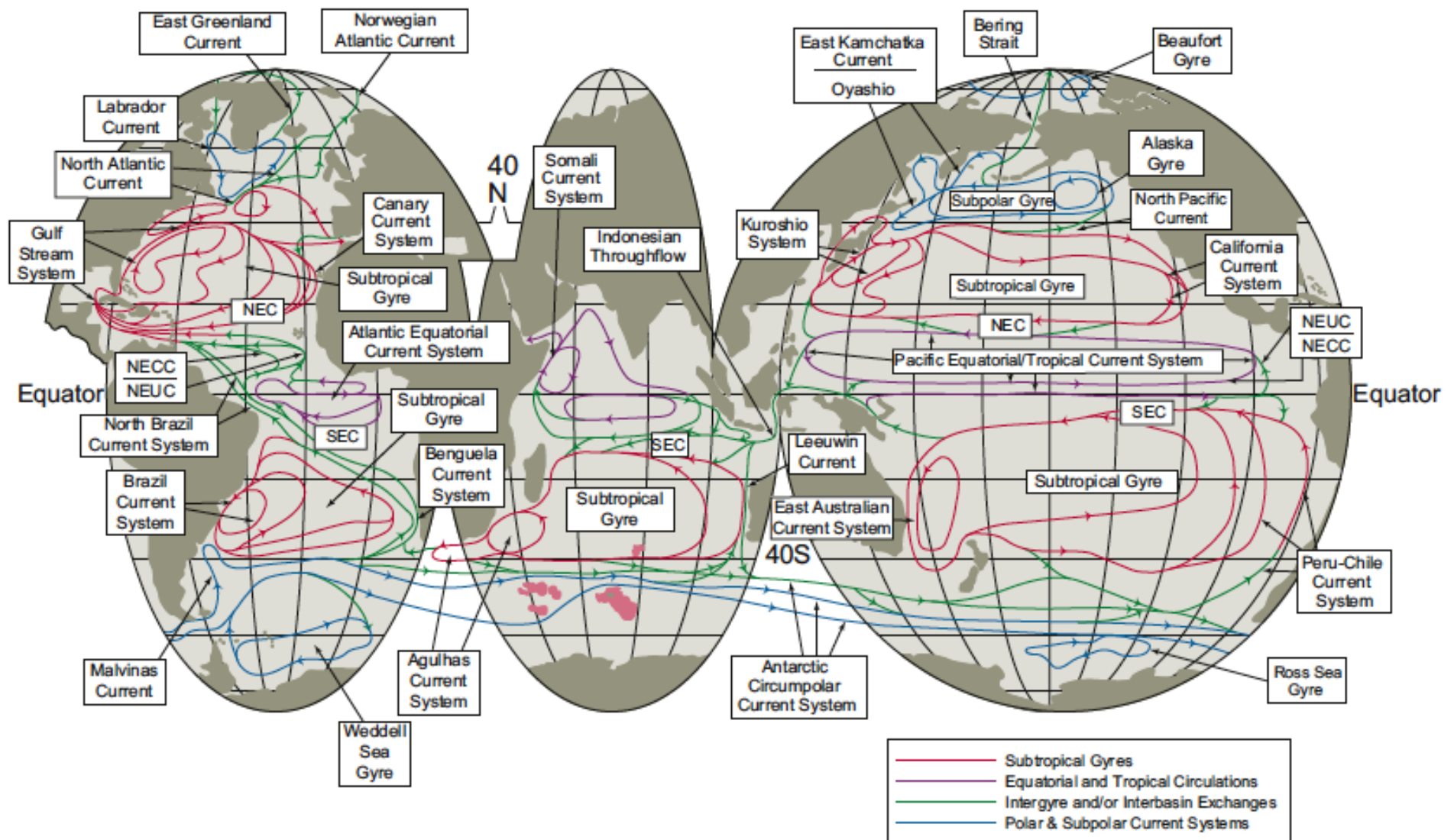
Variação com a latitude (a) da temperatura, (b) da salinidade e (c) da densidade superficial calculada com base na média para todos os oceanos para o **inverno**. Ao norte do equador: janeiro - março. Ao sul do equador: julho - setembro. Baseado em médias (climatológicas) de Levitus e Boyer (1994) e Levitus et al. (1994b). Extraído de Talley et al (2011).





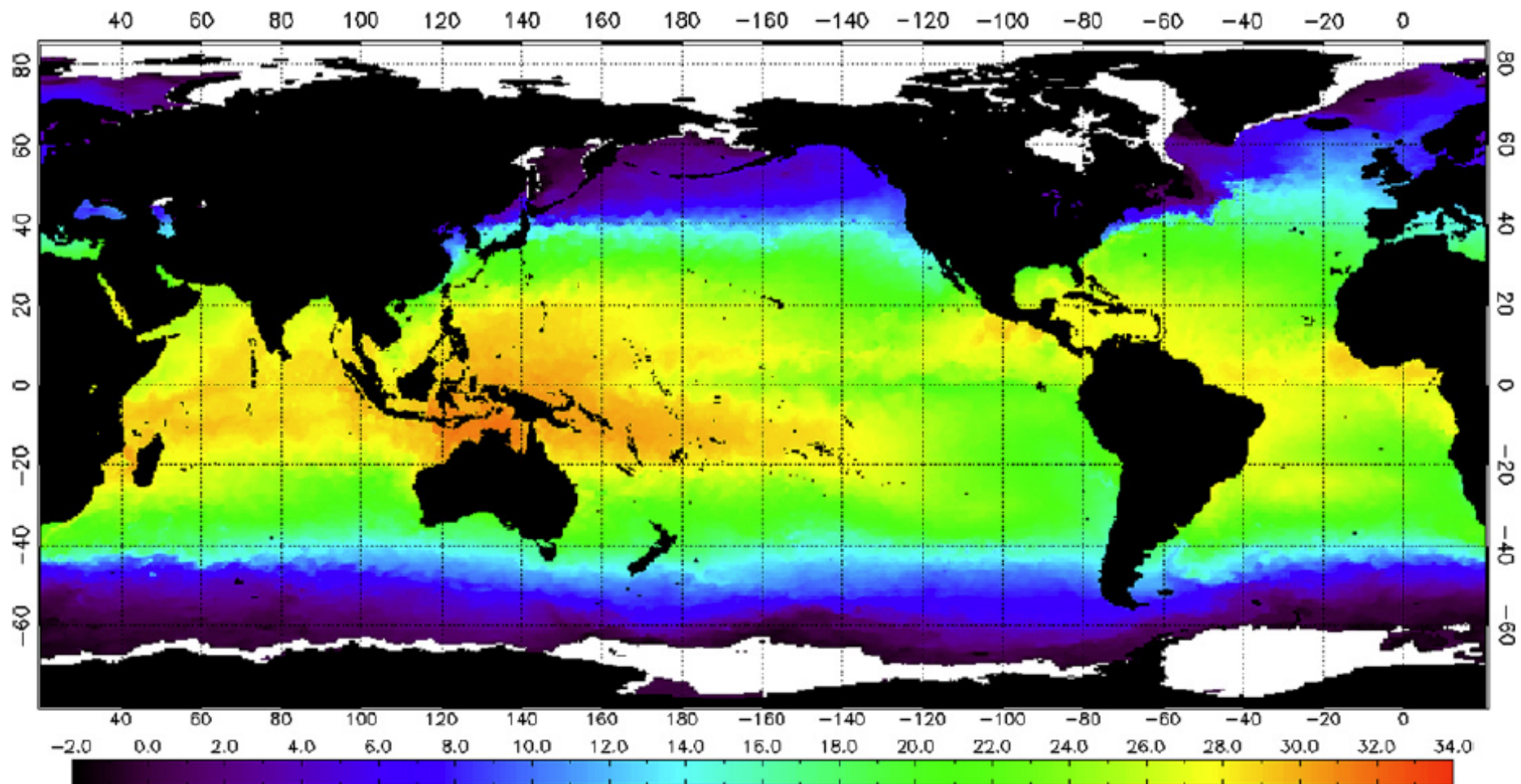
Temperatura superficial

- A TSM pode ser analisada em várias escalas temporais (média climatológica sazonal x valores diários/semanais)
- Estruturas com correntes oceânicas, frentes, regiões de ressurgência, vórtices e meandros são mais aparentes em imagens **sinóticas**
- Na região equatorial de todos os oceanos, existe uma piscina de água quente, com temperaturas mais quentes no lado oeste dos oceanos
- A influência das correntes oceânicas pode ser percebida nos giros subtropicais anticiclônicos (horário no HN e anti-horário no HS), que faz com que águas mais quentes (frias) ocorram no lado oeste (leste) dos oceanos
- Os giros subpolares ciclônicos (anti-horário no HN e horário no HS), por sua vez, fazem com que águas relativamente mais quentes sejam advectadas para norte no lado leste do HN
- Migrações meridionais da ACC também podem ser verificadas

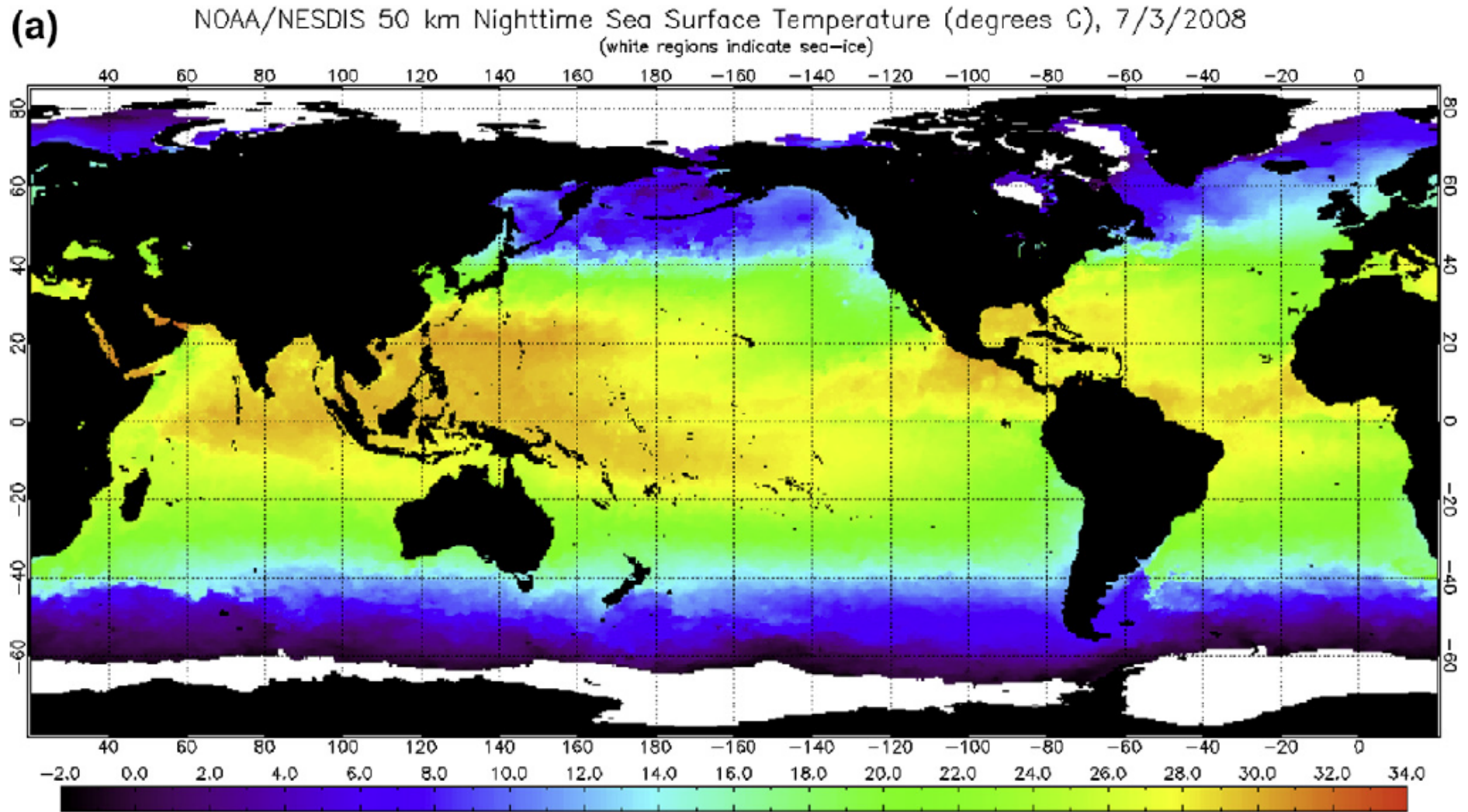


Esquema da circulação superficial. Modificado de Schmitz (1996b). Extraído de Talley et al (2011).

(b) NOAA/NESDIS 50 km Nighttime Sea Surface Temperature (degrees C), 1/3/2008
(white regions indicate sea-ice)



(b) Temperatura da superfície do mar obtida por satélite no infravermelho ($^{\circ}\text{C}$; noite apenas). Média de 50 km e uma semana para 03 de janeiro de 2008. Branco indica o gelo do mar. NOAA NESDIS (2009). Extraído de Talley et al (2011).



(a) Temperatura da superfície do mar obtida por satélite no infravermelho ($^{\circ}\text{C}$; noite apenas). Média de 50 km e uma semana para 07 de julho de 2008. Branco indica o gelo do mar. NOAA NESDIS (2009). Extraído de Talley et al (2011).



Temperatura na camada superficial e de mistura

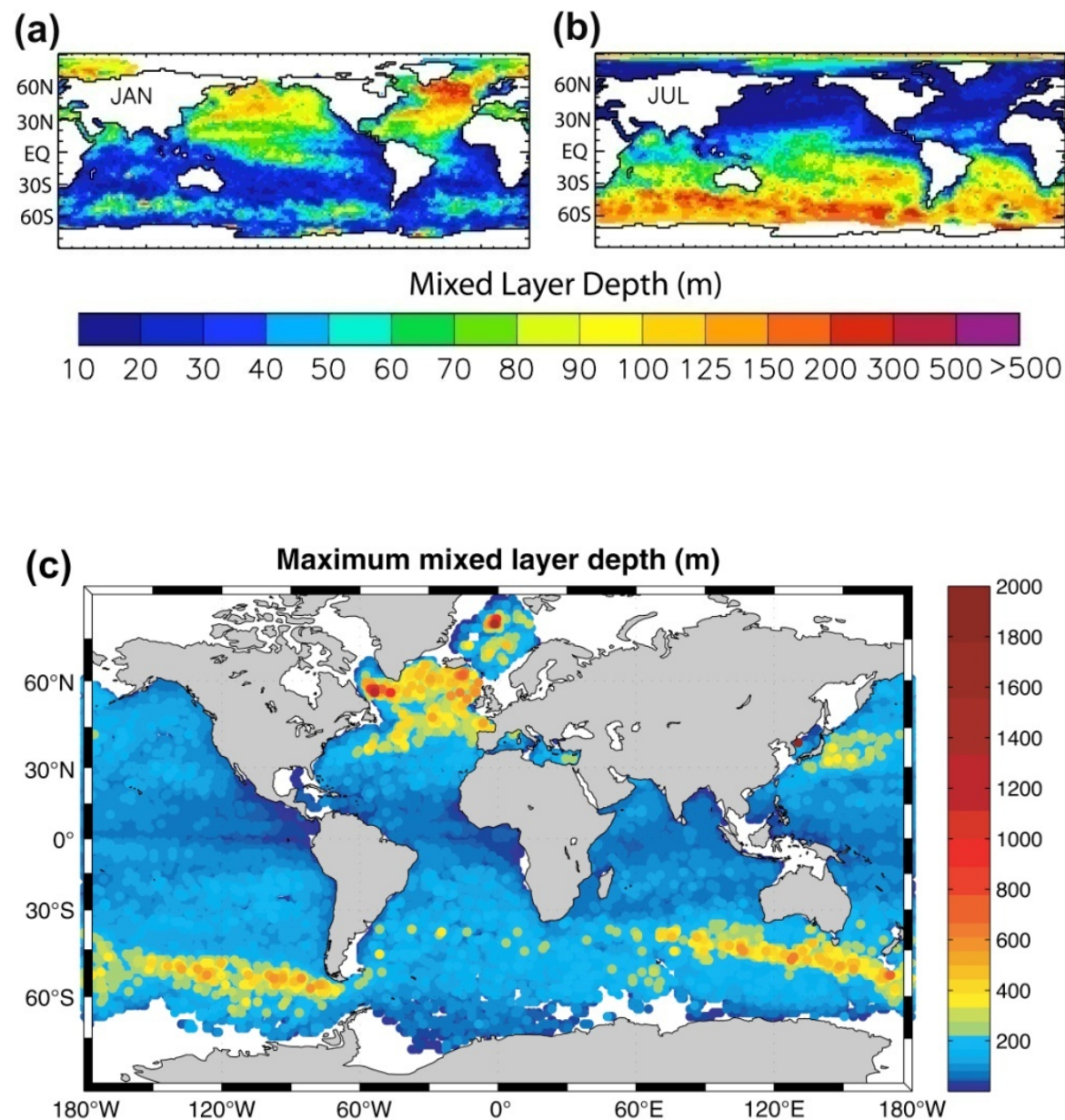
- Dentro da camada mais superficial dos oceanos, as propriedades são algumas vezes bem misturadas na vertical, principalmente no final da noite (ciclo diurno) e em estações em que há um esfriamento (ciclo sazonal). Está é a **camada de mistura**
 - Esta camada é misturada pelo vento e pela perda de fluidez devido ao esfriamento ou a evaporação
 - Por outro lado, o aquecimento e a precipitação na superfície do mar e a circulação dentro da camada de mistura fazem com que esta mistura cesse
 - Via de regra, a mistura causada pelo vento não excede os 100 – 150 m de profundidade e isto geralmente só ocorre no inverno
 - Já o esfriamento e a evaporação na superfície do mar, podem causar um aprofundamento da camada de mistura de várias centenas de metros ou mais de 1000 m em regiões onde existe **convecção profunda**



Temperatura na camada superficial e de mistura

- As definições funcionais da profundidade da camada de mistura são geralmente função da diferença de temperatura ou densidade entre o valor de superfície e um valor em sub-superfície
 - Em regiões tropicais e de médias latitudes, a definição baseada na temperatura é adequada, mas em regiões de altas latitudes esta definição pode ser influenciada pelas variações de salinidade nesta camada mais superficial
 - Os critérios mais comuns utilizados para definir a profundidade da camada de mistura são: diferença de temperatura de $0,2^{\circ}\text{C}$ ou diferença de σ_{θ} de $0,03 \text{ kg/m}^3$
- Em todas as regiões, as camadas de mistura são mais espessas durante o inverno do que no verão
 - Estas camadas de mistura mais espessas durante o inverno são a fonte principal das **águas modais**

Profundidade da camada de mistura em (a) Janeiro e (b) Julho, com base numa diferença de temperatura de $0,2^{\circ}\text{C}$ a partir da temperatura próxima da superfície. Fonte: Montégut et al. (2004). (c) média da máxima profundidade da camada de mistura, usando as cinco mais profundas camadas de mistura em quadrados de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ com base no conjunto de flutuadores ARGO entre 2000 a 2009 e a metodologia de Holte e Talley (2009) para adequar a estrutura da camada de mistura. Extraído de Talley et al (2011).



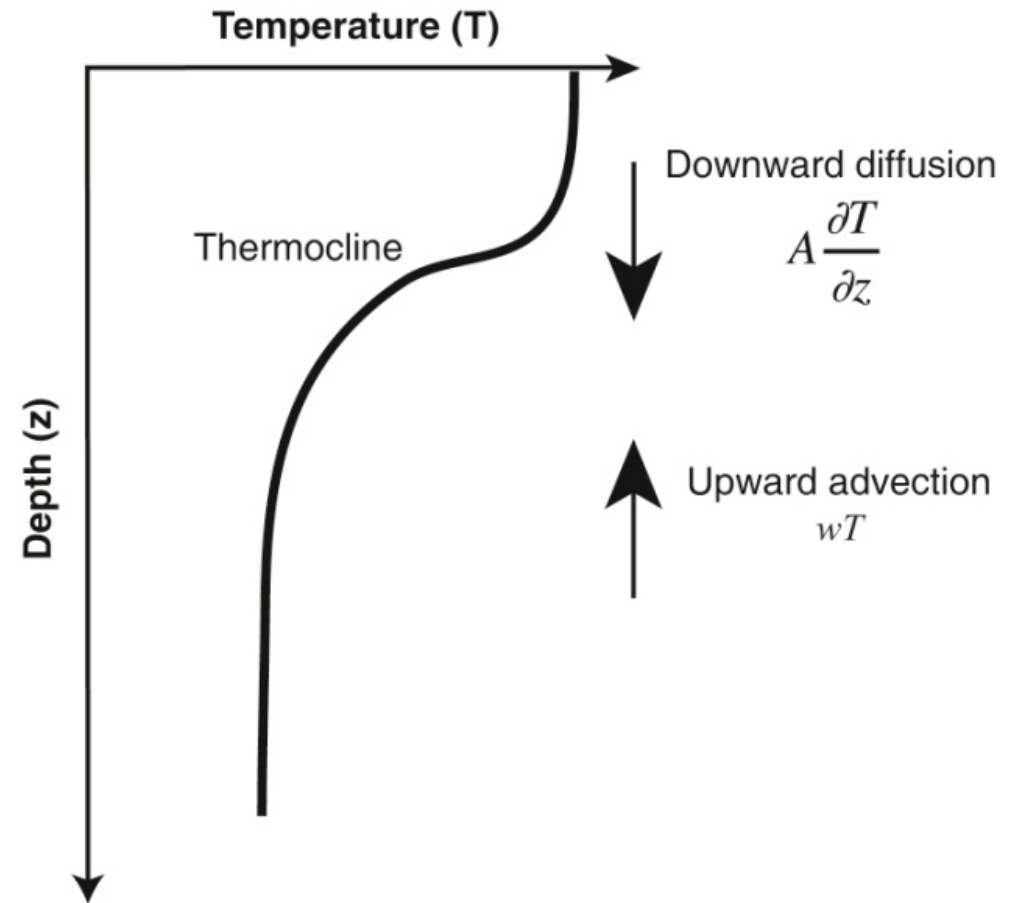


Termoclina, haloclina e picnoclina

- A região de maior gradiente vertical de temperatura é denominada de **termoclina**
 - A termoclina está geralmente associada a uma **picnoclina**
 - É geralmente difícil definir precisamente o limite inferior da termoclina. Em baixas e médias temperaturas a termoclina esta presente entre 200 – 1000 m
 - Esta é geralmente chamada de **termoclina principal** ou **permanente**
 - Regiões polares e subpolares geralmente não apresentam um termoclina permanente, mas apresentam uma **haloclina permanente**
- A existência da termoclina pode ser explicada por dois conceitos complementares: i) um baseado nos processos verticais e o outro baseado na circulação horizontal das águas que formam a termoclina

Termoclina, haloclina e pycnoclina

- Os processos verticais que afetam a termoclina são a transferência de calor (para baixo) e a ressurgência/subsidência
- O resultado do balanço entre a **difusão** vertical de calor (para baixo) e a **advecção** de águas profundas e frias através da ressurgência (para cima) dá origem a um perfil exponencial de temperatura que tem o formato da termoclina permanente



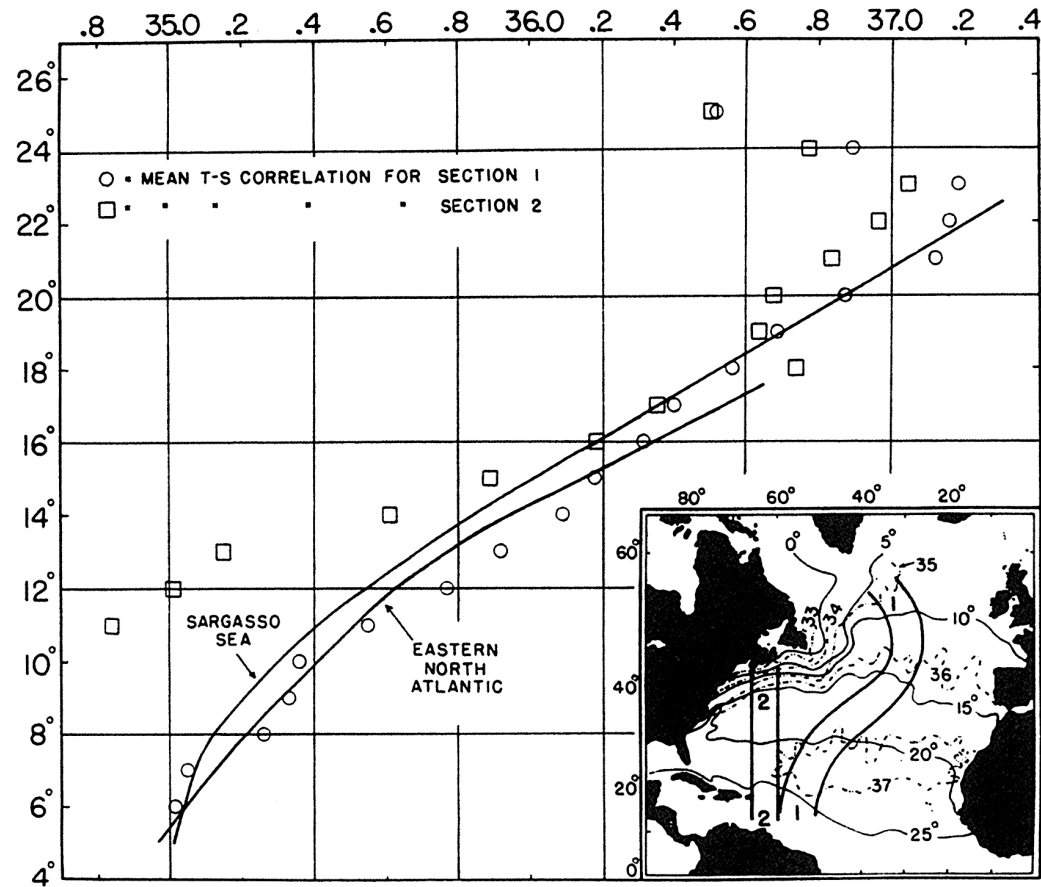
Processos verticais que podem manter a termoclina em um modelo simplificado unidimensional simplificado. Extraído de Talley et al (2011).



Termoclina, haloclina e picnoclina

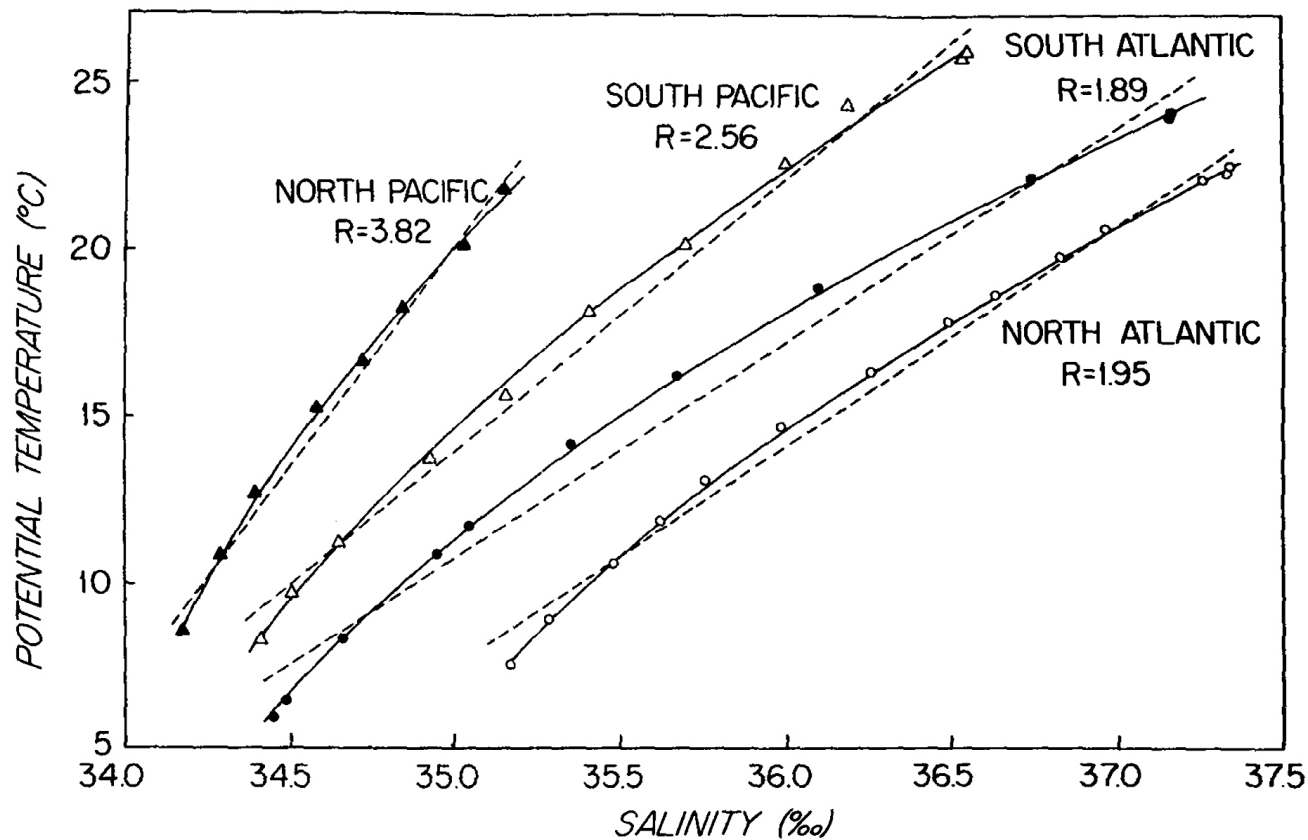
- Um segundo processo, mais horizontal, adiabático e complementar para a manutenção da termoclina/picnoclina é o de que as águas que ocorrem na termoclina de regiões subtropicais são originadas de águas superficiais localizadas em regiões mais próximas aos polos. Estas águas atingiriam regiões mais profundas através da **subducção**
- A subducção de várias camadas de água daria origem então a estrutura de temperatura, salinidade e densidade da picnoclina (termoclina) principal
- A termoclina/picnoclina principal dos giros subtropicais é uma feição permanente, identificada por uma relação de temperatura e salinidade. A água da termoclina é denominada de **Água Central** e cada oceano apresenta valores distintos de TS devido a sua formação

Termoclina, haloclina e piconclina



Temperatura-salinidade ao longo trechos de superfície no Oceano Atlântico Norte (pontos e quadrado) e na vertical (curvas contínuas) para as estações no oeste (Mar dos Sargasso) e leste do Oceano Atlântico Norte. Fonte: Iselin (1939). Extraído de Talley et al (2011).

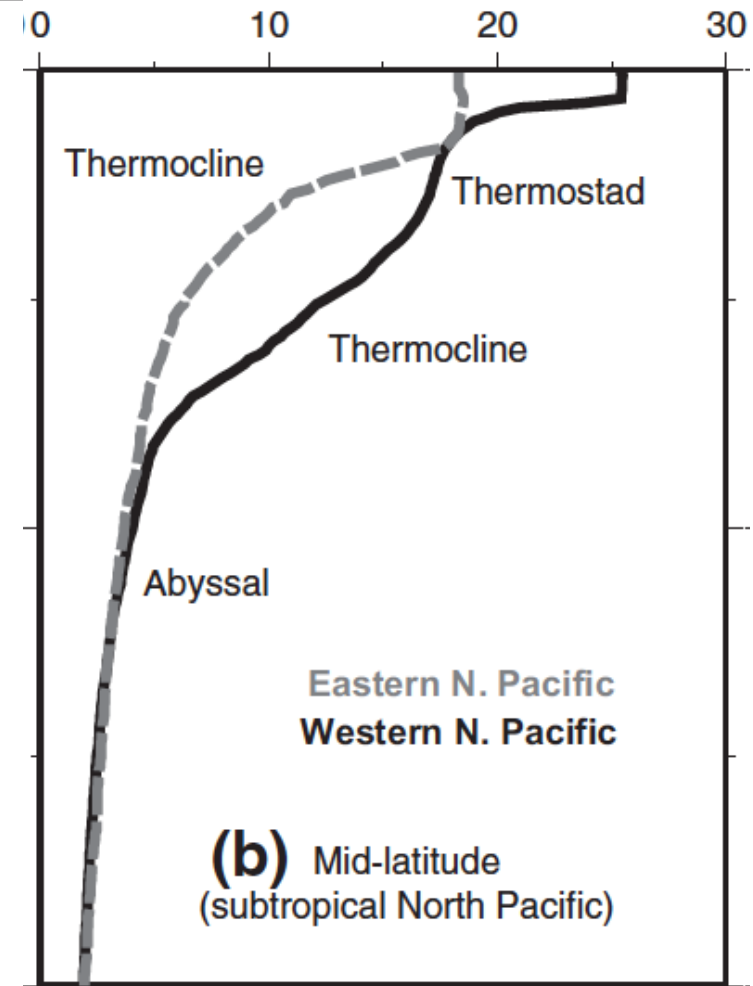
Termoclina, haloclina e picnoclina



Relação temperatura potencial-salinidade na termoclina dos giros subtropicais. Estas são as águas centrais. R é o melhor ajuste de um parâmetro associado com mistura difusiva. Extraído de Talley et al (2011).

Termoclina, haloclina e picnoclina

- Em algumas regiões observa-se a presença de um termoclina dupla, separada por uma camada de menor estratificação denominada de **thermostad**
 - Esta camada está associada a uma massa de água chamada de **Água Modal**, caracterizada por um extremo vertical em espessura da camada e formada nas regiões de subducção
 - Em regiões onde a água modal chega na superfície como uma espessa camada de mistura, a camada que está acima representa uma termoclina sazonal que desaparece no inverno



Perfil típico de temperatura potencial para o oceano aberto para a região subtropical do oeste e leste do Oceano Pacífico Norte (24°N). Extraído de Talley et al (2011).



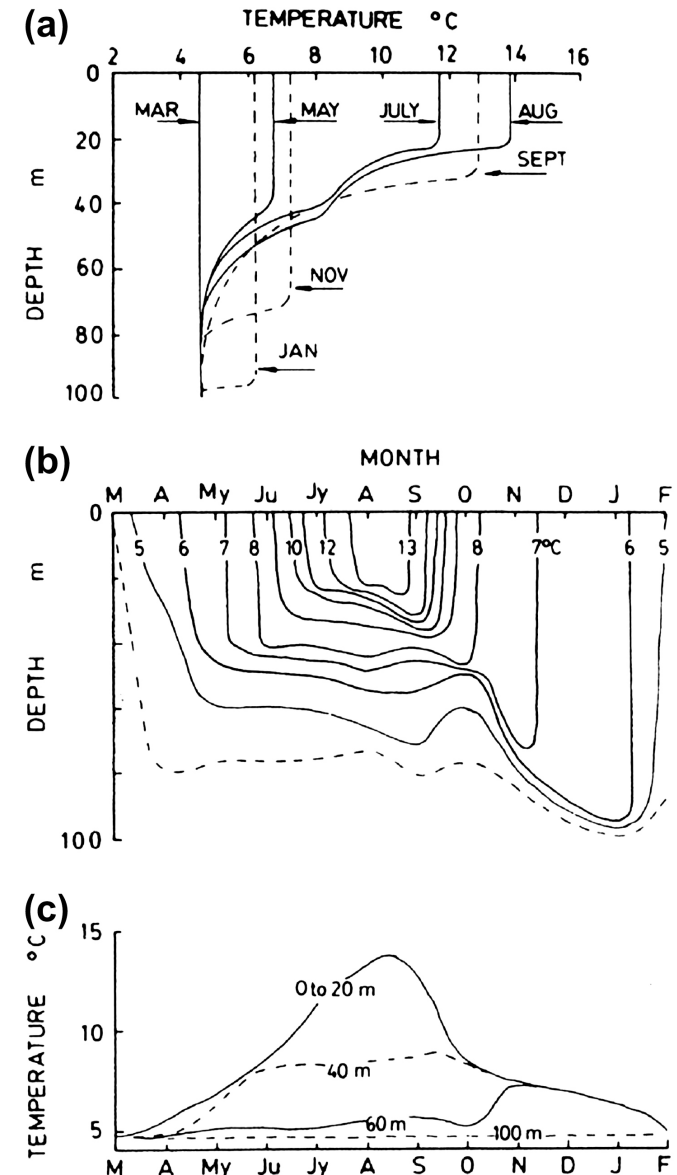
Variações temporais da temperatura na camada de mistura e termoclina

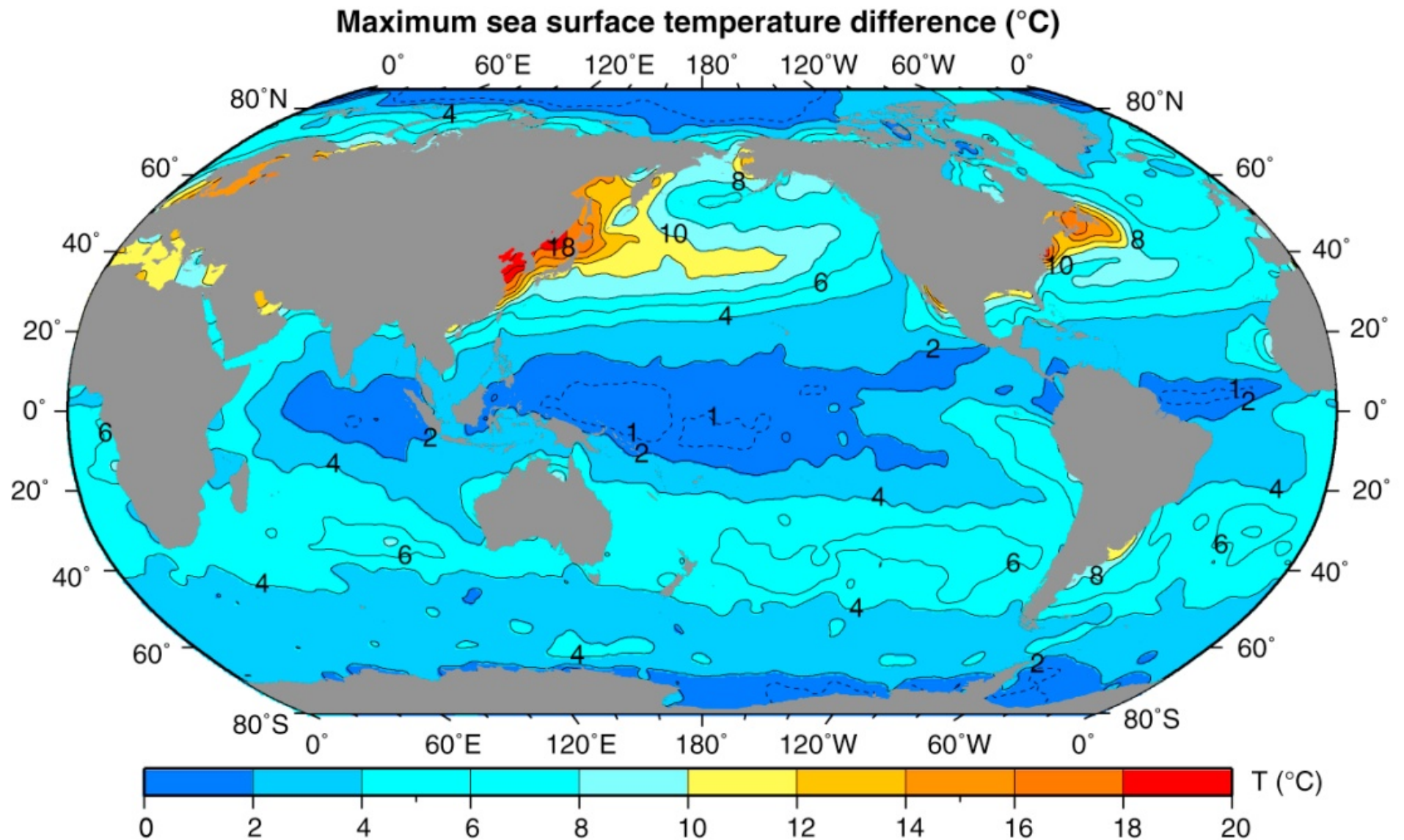
- A temperatura na camada superficial e na termoclina varia sazonalmente, particularmente em latitudes médias
 - No inverno a temperatura superficial é baixa, as ondas são maiores e a camada de mistura pode se estender até a termoclina principal
 - No verão, a temperatura superficial aumenta, a água fica mais estável e uma termoclina sazonal se desenvolve na camada superficial

Variações temporais da temperatura na camada de mistura e termoclina

- De março a agosto no HN a temperatura gradualmente aumenta devido a absorção de energia solar. Depois de agosto existe uma perda líquida de calor e mistura pelo vento. Isto erode a termoclina sazonal até as condições observadas em março
- É importante observar nos gráficos ao lado as diferentes formas de representação da termoclina

Crescimento e decaimento da termoclina sazonal a 50°N, 145°W no leste do Oceano Pacífico Norte. (a) Perfis verticais de temperatura, (b) séries temporais de contornos isotérmicos, e (c) uma série temporal de temperaturas em profundidades específicas. Extraído de Talley et al (2011).





Variação anual da temperatura da superfície do mar (°C) com base em climatologias mensais da temperatura a partir do World Ocean Atlas (WOA05) (NODC, 2005a, 2009). Extraído de Talley et al (2011).

Temperatura nas águas profundas e temperatura potencial

- Abaixo da termoclina, a temperatura decresce lentamente com o aumento da profundidade
- Nas partes mais profundas, a temperatura pode aumentar em direção ao fundo e grande parte deste efeito é devido ao aumento da pressão que comprime a água e aumenta a sua temperatura adiabaticamente. É por este motivo que a temperatura potencial é adotada

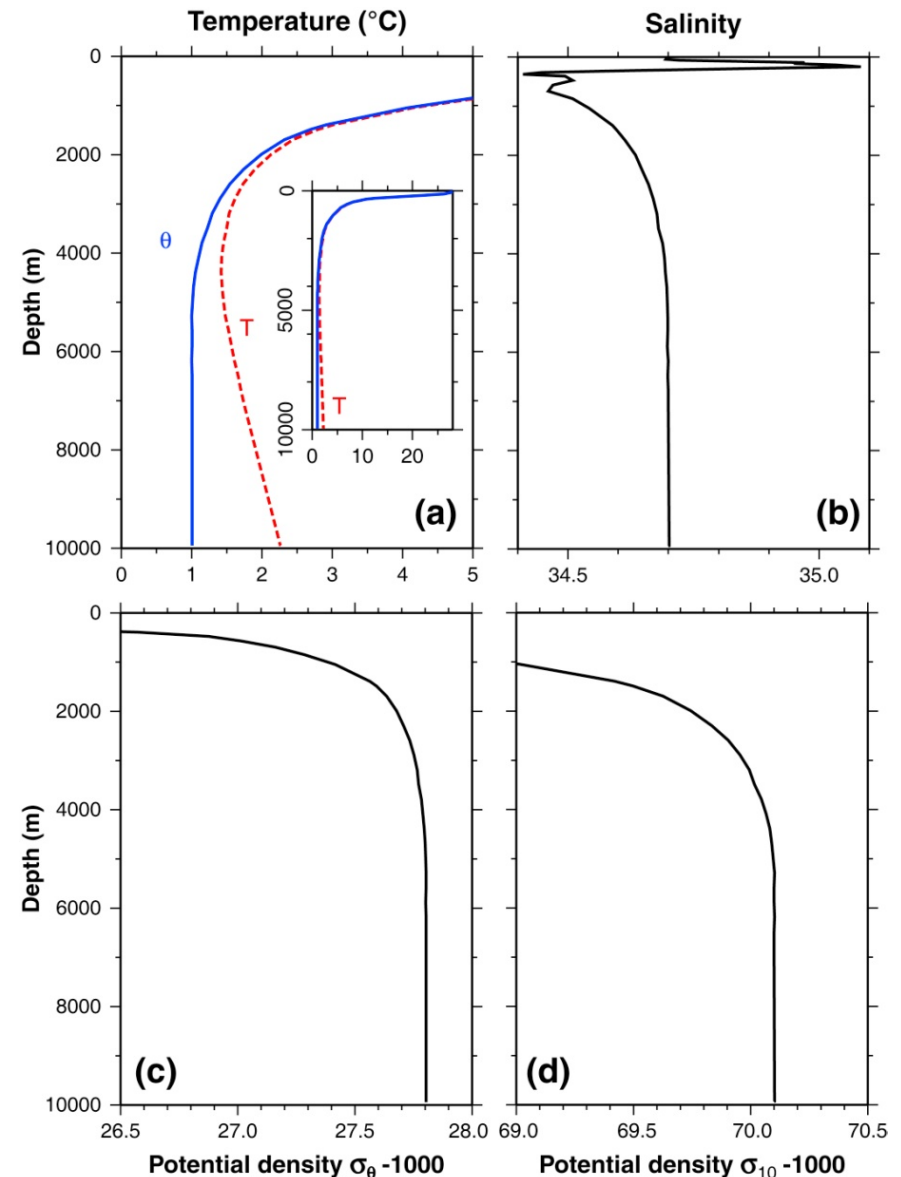
Depth (m)	Salinity (psu)	Temperature (°C)	θ (°C)	σ_{θ} (kg m ⁻³)	σ_4 (kg m ⁻³)	σ_{10} (kg m ⁻³)
1487	34.597	2.800	2.695	27.591	45.514	69.495
2590	34.660	1.730	1.544	27.734	45.777	69.903
3488	34.680	1.500	1.230	27.773	45.849	70.015
4685	34.697	1.431	1.028	27.800	45.898	70.090
5585	34.699	1.526	1.004	27.803	45.904	70.099
6484	34.599	1.658	1.005	27.803	45.904	70.099
9940	34.700	2.266	1.007	27.804	45.904	70.099

Data from R/V T. Washington, 1976.

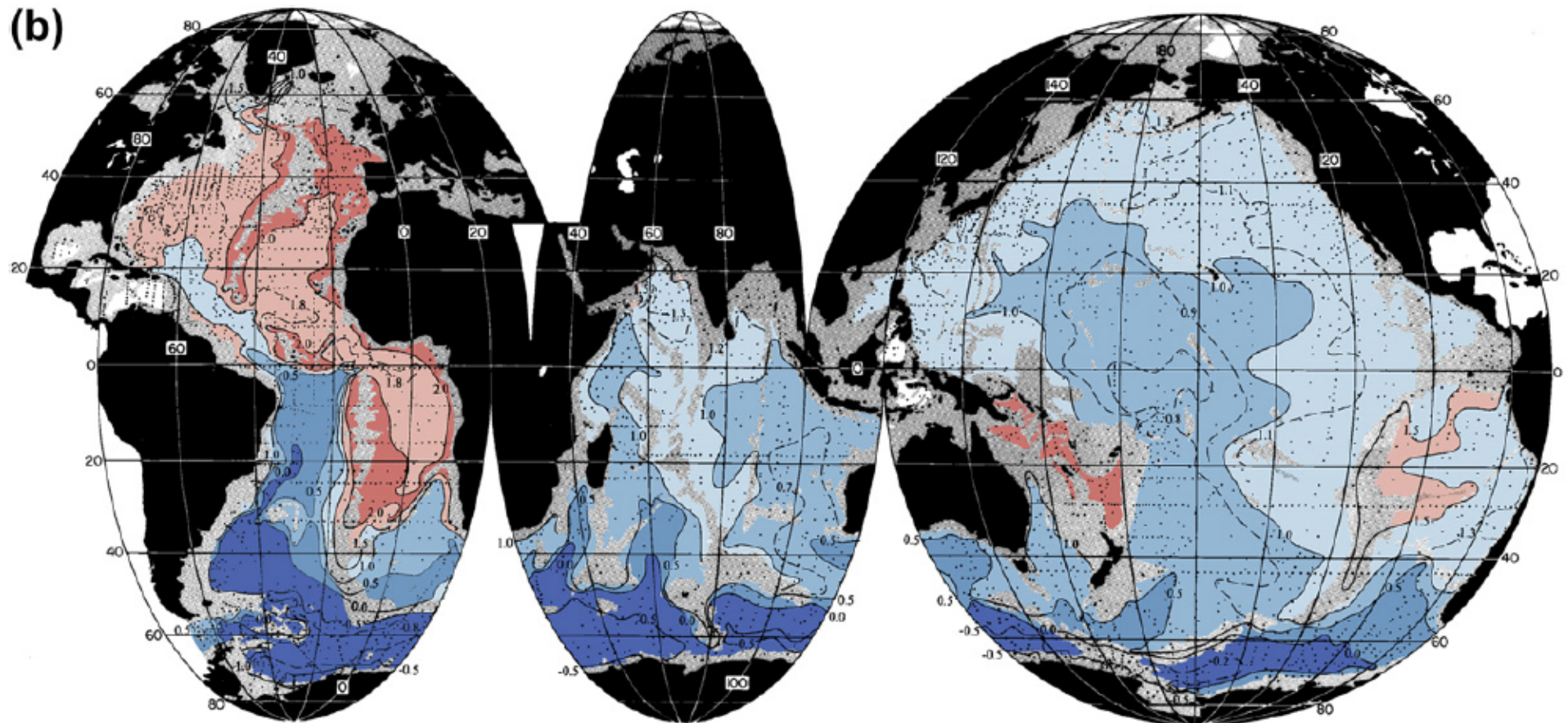
Temperatura nas águas profundas e temperatura potencial

- É importante notar aqui que as águas entre 4500 m e o fundo são uniformes e que não existe nenhuma fonte de calor

Fossa das Marianas: (a) temperatura e temperatura potencial, (b) salinidade, (c) densidade potencial σ_θ (kg m^{-3}) em relação a superfície e (d) densidade potencial σ_{10} (kg m^{-3}) em relação a 10000 db. Extraído de Talley et al (2011).



Temperatura nas águas profundas e temperatura potencial

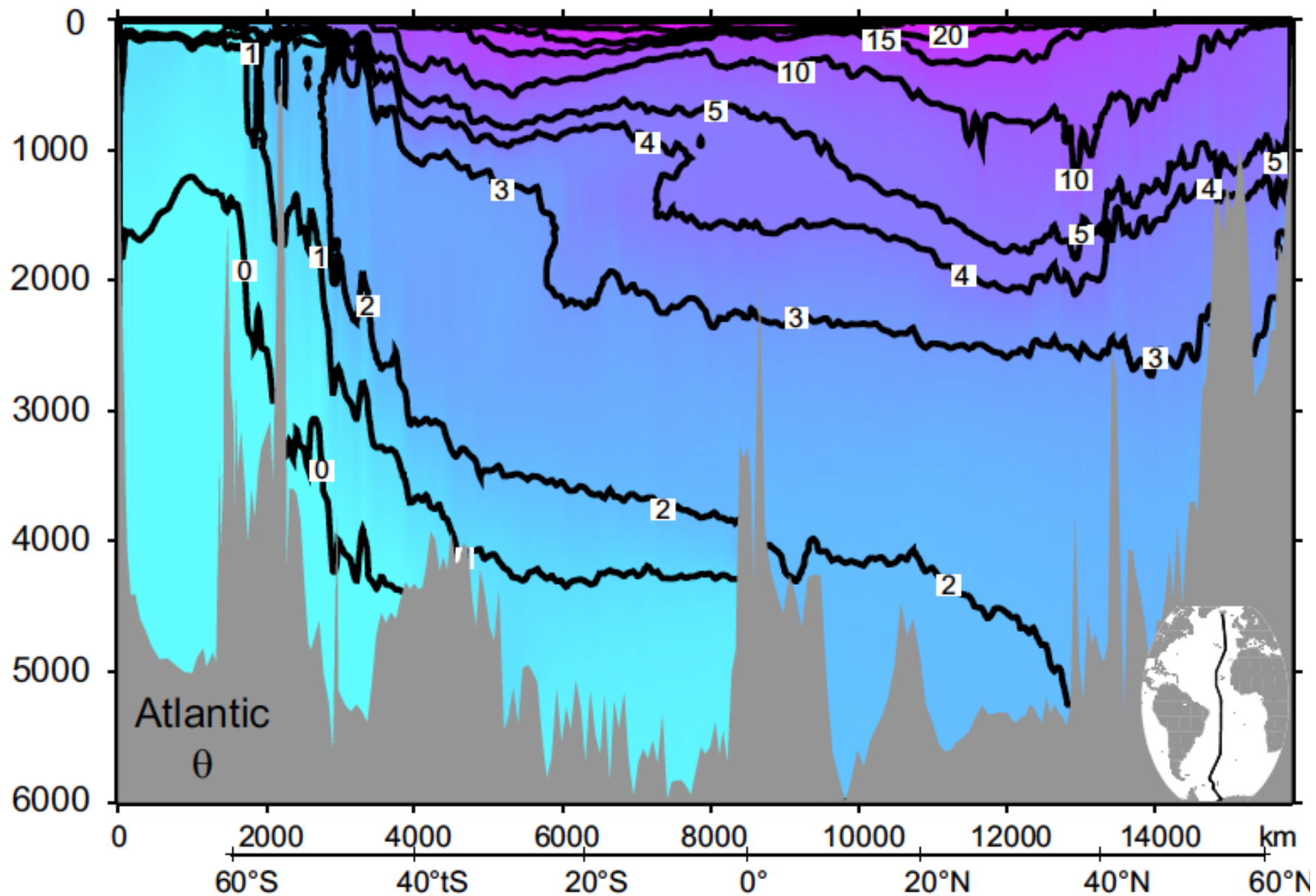


Distribuição da temperatura potencial para o fundo dos oceanos onde a profundidade é maior que 3500 m . Extraído de Talley et al (2011).

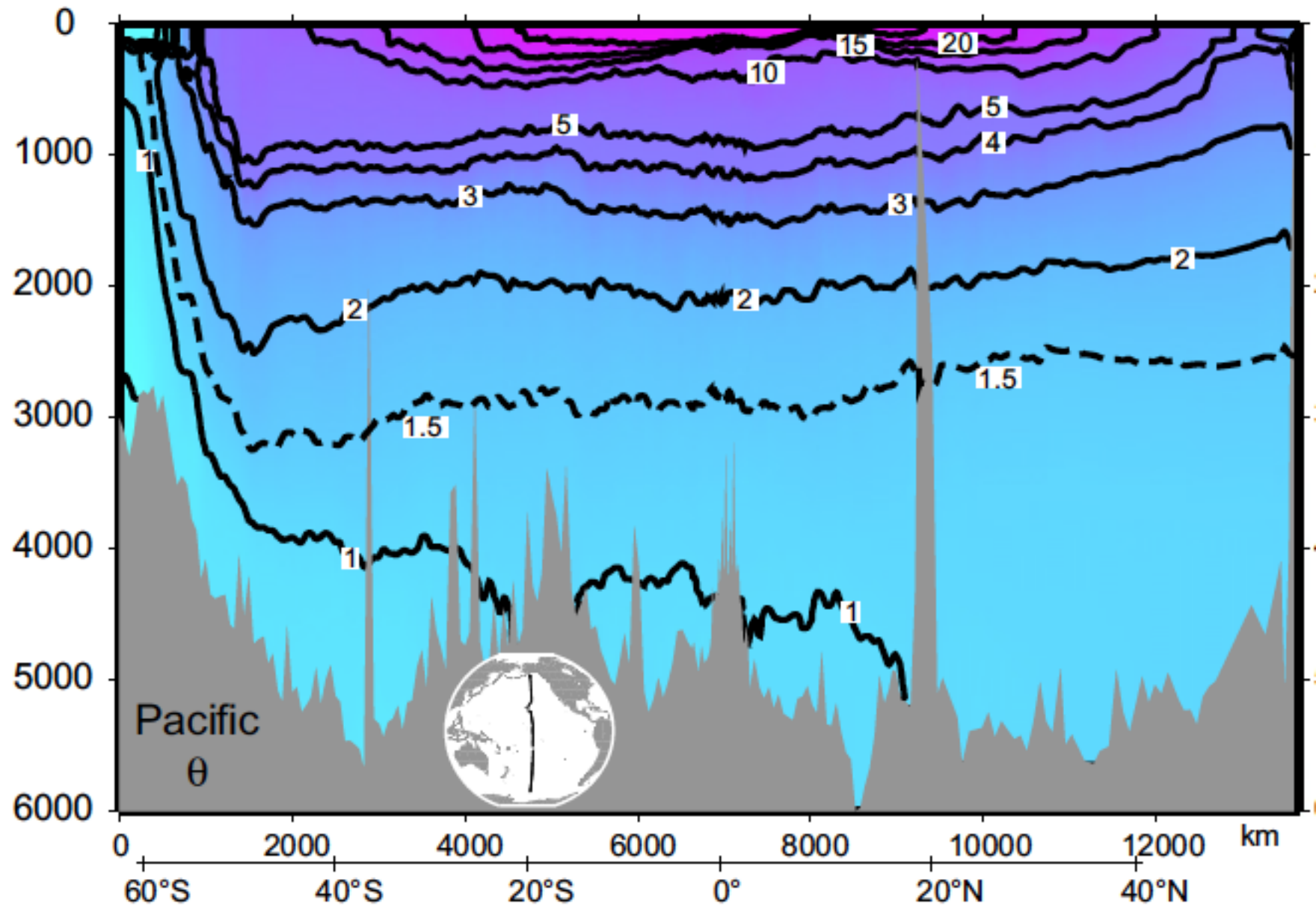


Seções verticais de temperatura potencial

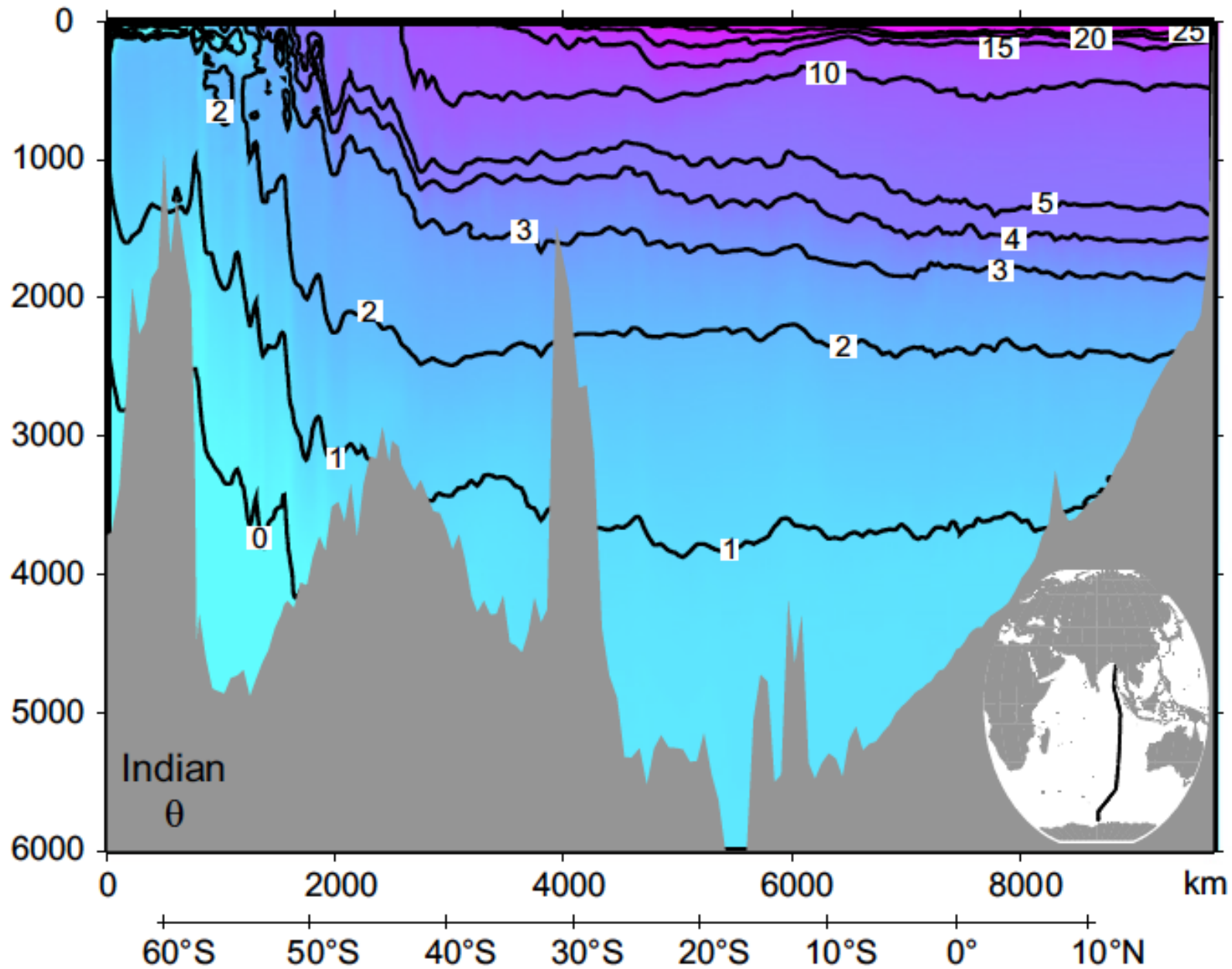
- Como veremos nos perfis a seguir, existem diferenças claras na distribuição de temperatura potencial entre o HN e HS
 - A região de águas superficiais mais frias é mais extensa no HS
 - Mesmo para as regiões de altas temperaturas, a região do HS também é mais extensa
 - Nas partes mais profundas dos Oceanos Atlântico, Pacífico e Índico, as águas mais frias estão no HS, sendo que as temperaturas no HN são ligeiramente maiores



Seção de temperatura potencial ($^{\circ}\text{C}$) no Oceano Atlântico na longitude 20°W a 25°W . Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



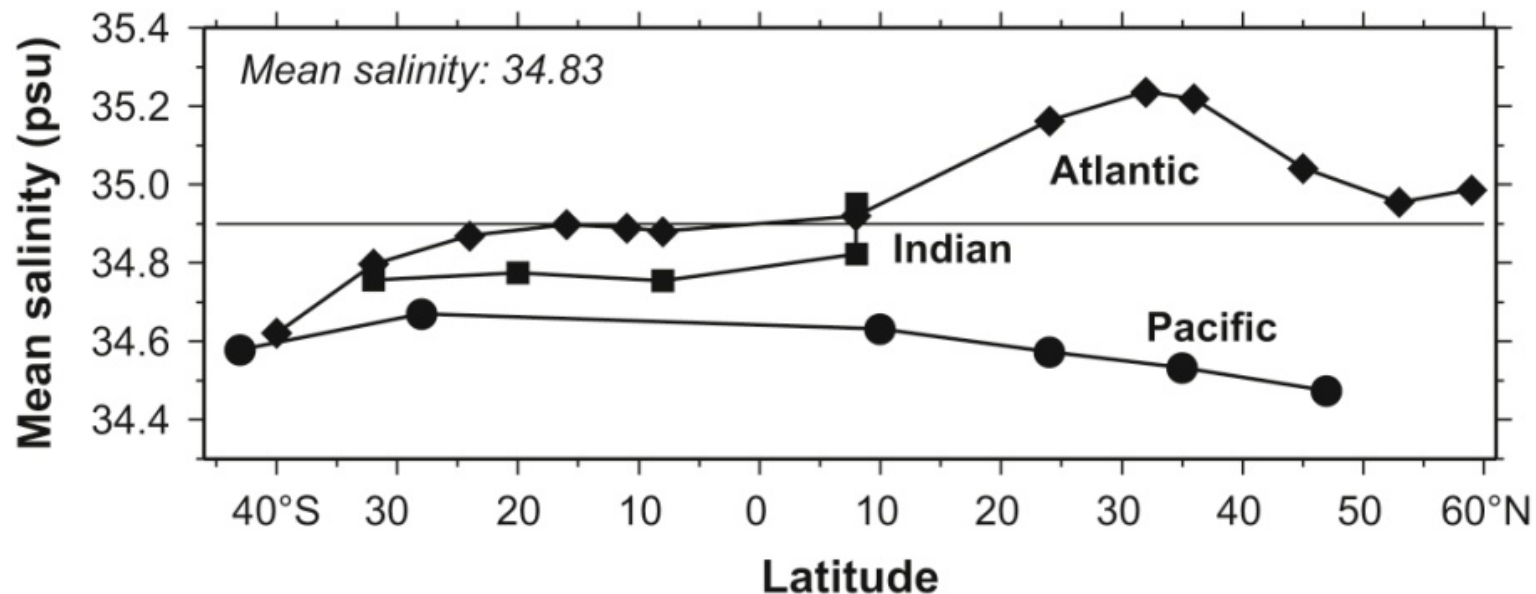
Seção de temperatura potencial ($^{\circ}\text{C}$) no Oceano Pacífico na longitude de 150°W . Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



Seção de temperatura potencial (°C) no Oceano Índico na longitude de 95°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).

Distribuição de salinidade

- Existem diferenças significativas entre as bacias oceânicas, onde o Oceano Atlântico é o mais salgado e o Oceano Pacífico é o menos salgado (excluindo-se os Oceanos Ártico e Austral que são menos salgados)

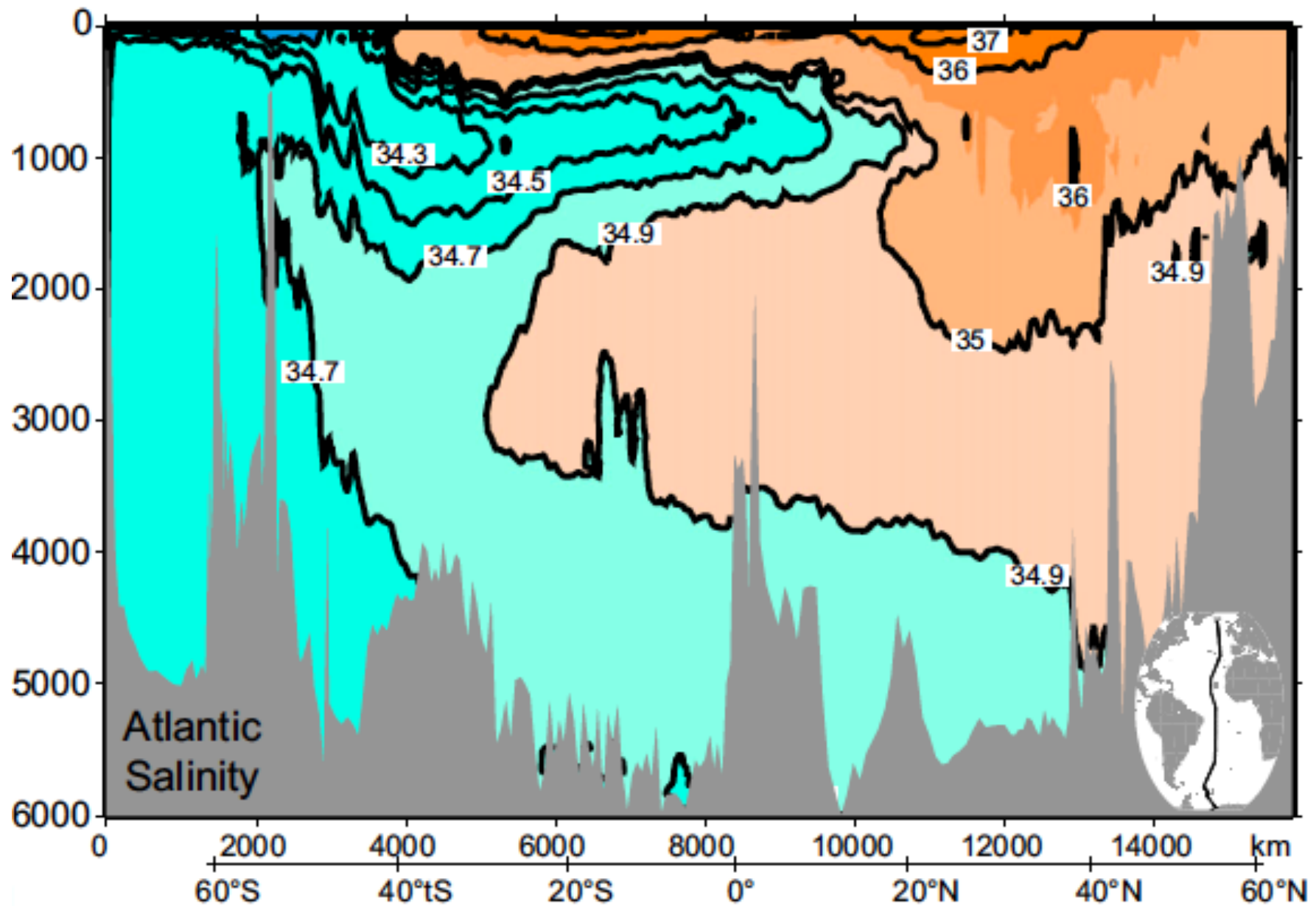


Salinidade média a partir de uma média zonal ao longo de toda a coluna d'água e com base em dados das seções hidrográficas. A salinidade média é apenas para estas seções e não inclui o Oceano Ártico, o Oceano Antártico e nem os mares marginais. Fonte: A partir de Talley (2008). Extraído de Talley et al (2011).

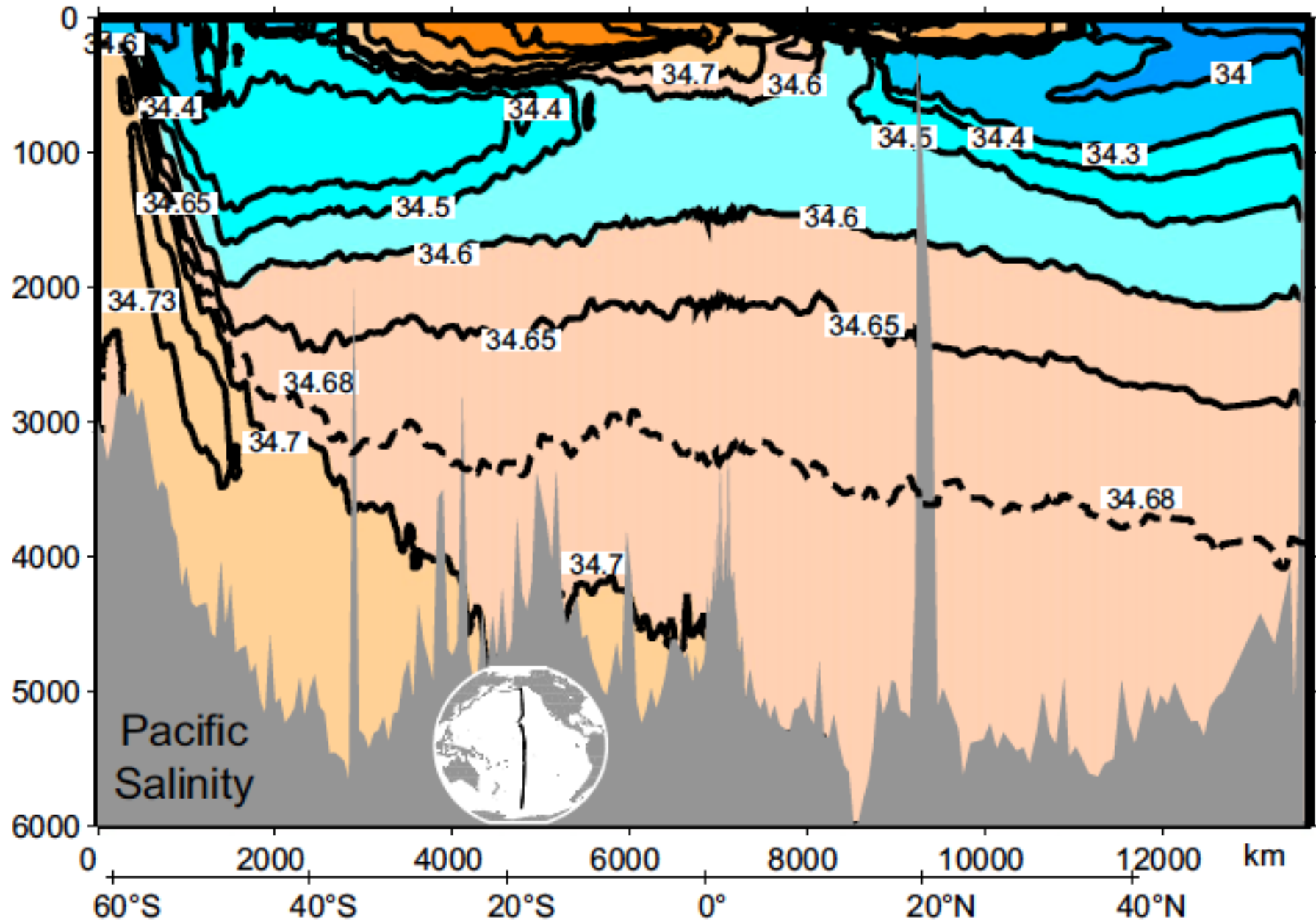


Distribuição de salinidade

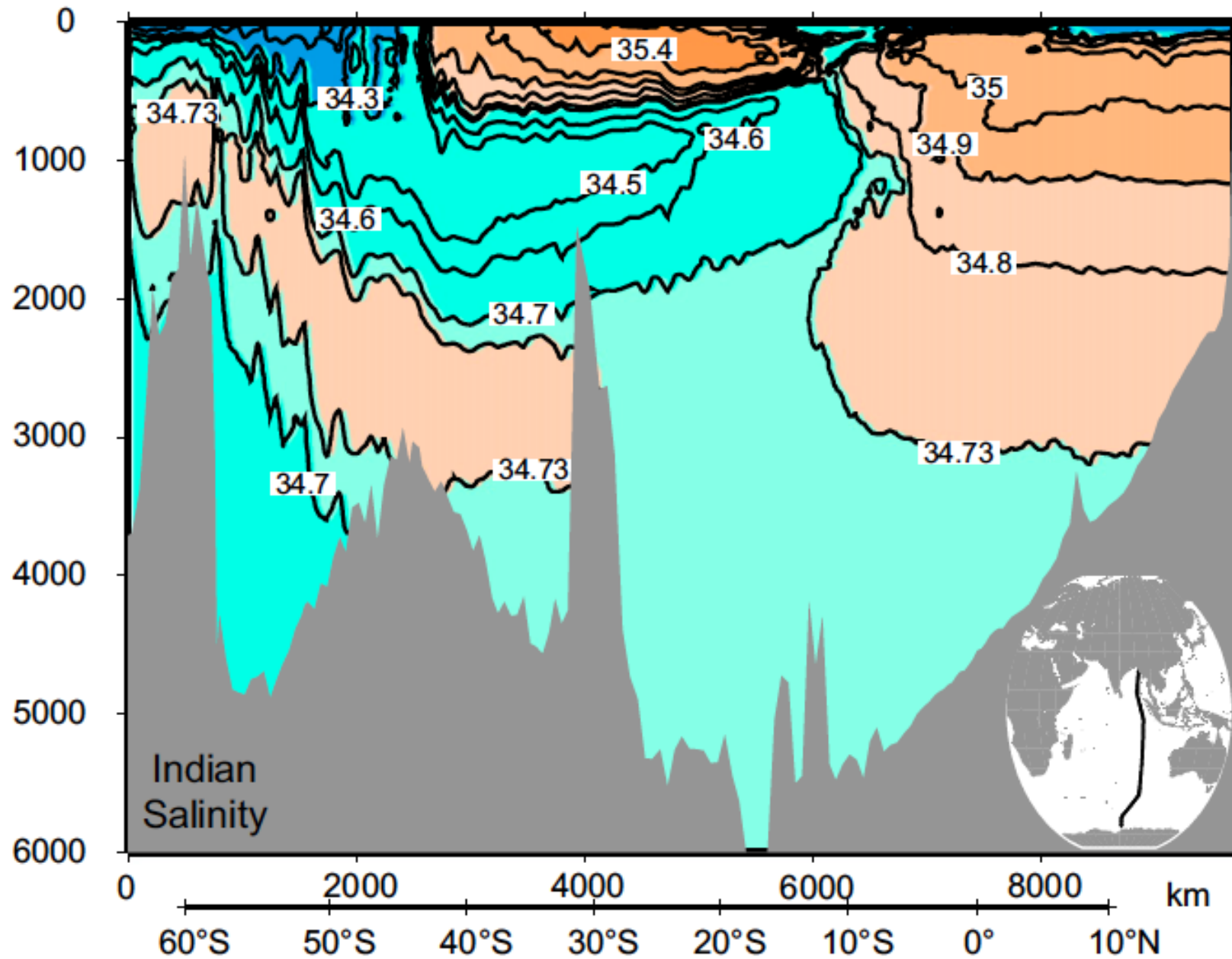
- As seções verticais de salinidade ao longo dos Oceanos Atlântico, Pacífico e Índico mostram que a distribuição da salinidade é muito mais complexa do que a distribuição de temperatura
- Enquanto a temperatura decresce monotonicamente até o fundo, na maioria dos lugares, a salinidade tem uma marcada estrutura vertical



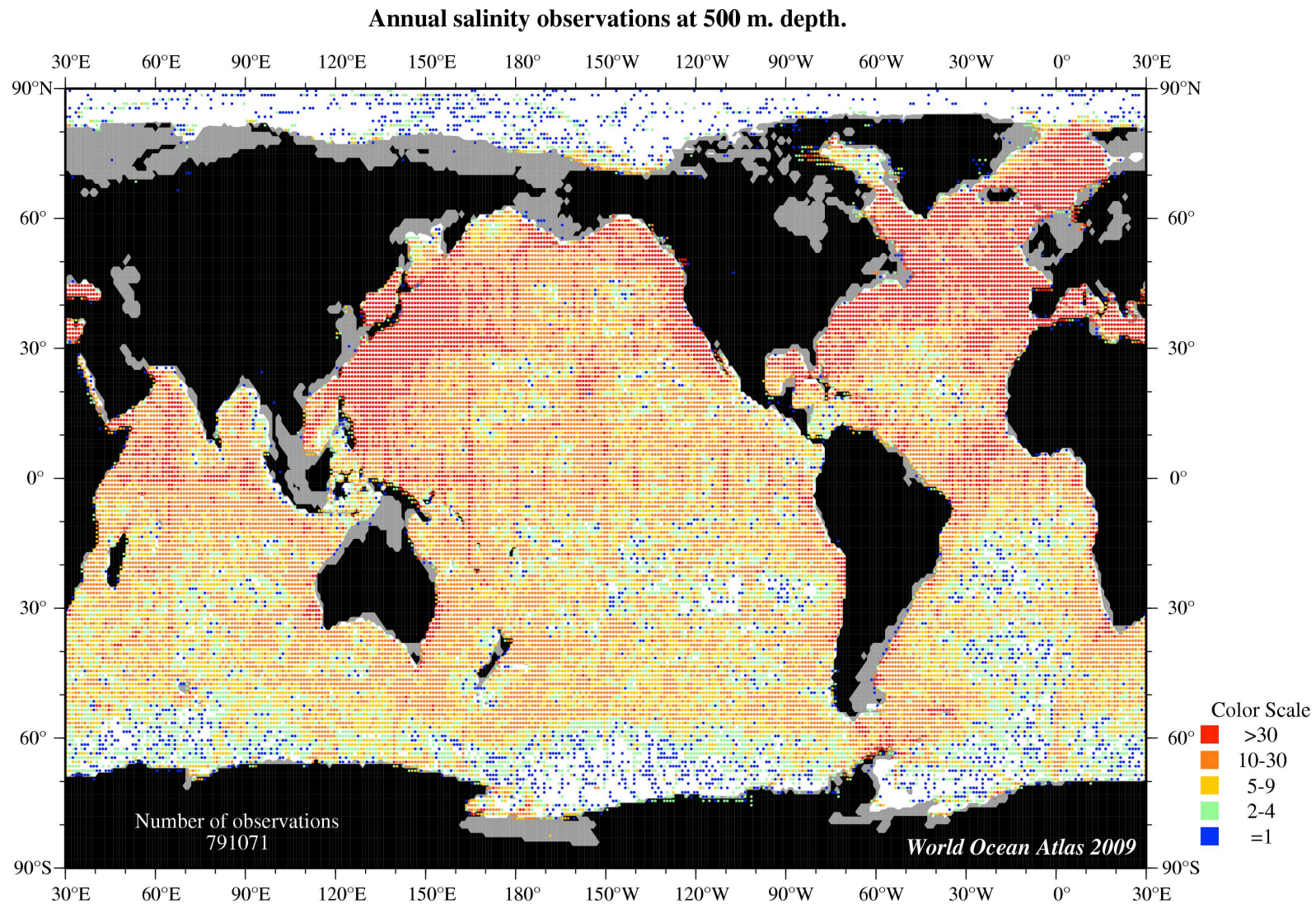
Seção de salinidade (psu) no Oceano Atlântico na longitude 20°W a 25°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



Seção de salinidade (psu) no Oceano Pacífico na longitude de 150°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



Seção de salinidade (psu) no Oceano Índico na longitude de 95°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



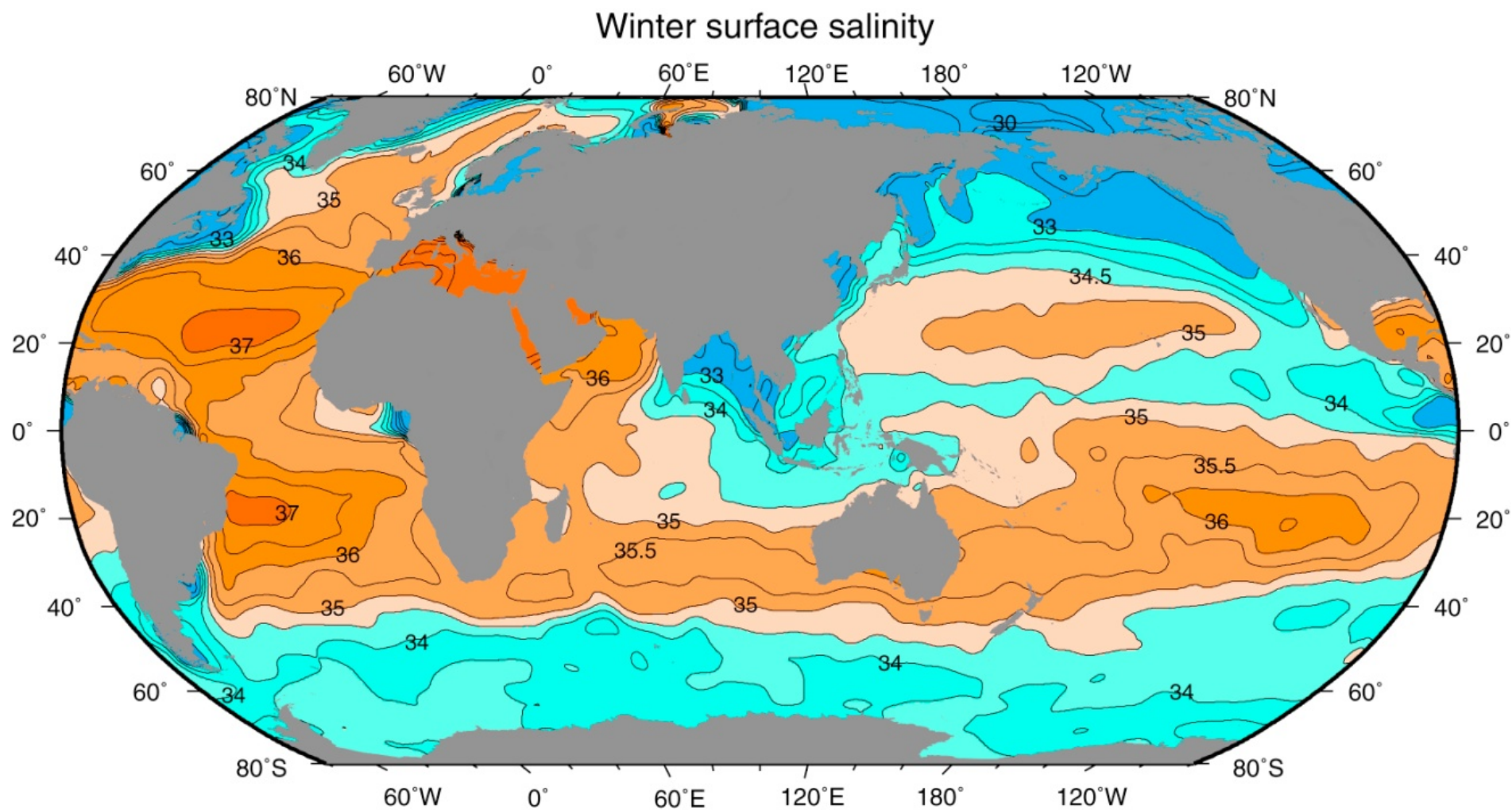
Distribuição das observações de salinidade na profundidade de 500 m com base no **World Ocean Atlas de 2009**, evidenciando que o número de observações é maior no Hemisfério Norte do que no Hemisfério Sul.

http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09F/pr_woa09f.html

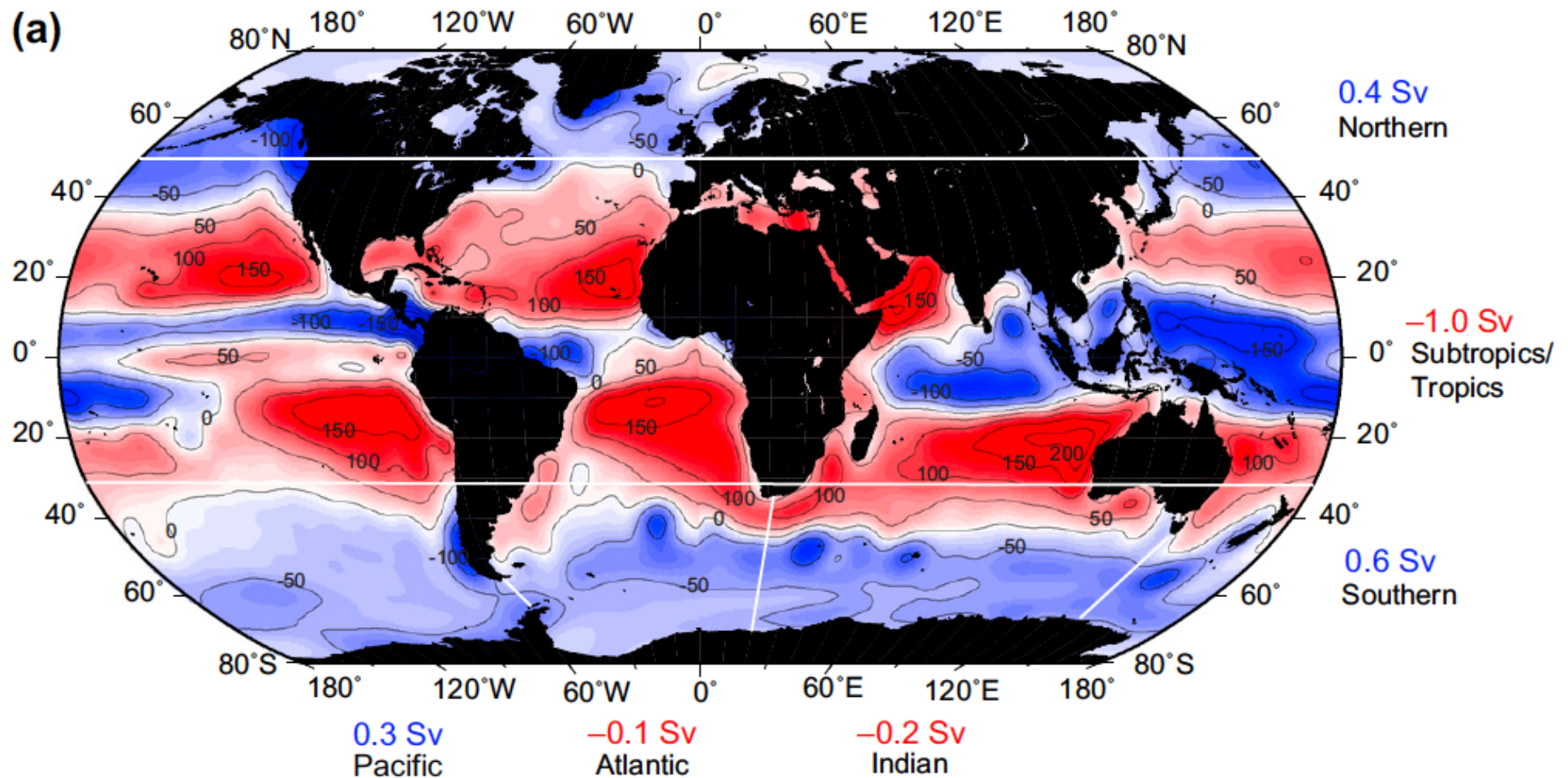


Salinidade superficial

- A salinidade superficial no oceano aberto varia de 33 a 37
- Valores mais baixos ocorrem localmente próximos as regiões costeiras com aporte fluvial significativo e em regiões polares onde existe degelo
- Valores mais elevados ocorrem em regiões de alta evaporação (e.g. Mar Mediterrâneo e Mar Vermelho)
- Na média, o Oceano Atlântico Norte é o mais salgado (35,5), seguido dos Oceanos Atlântico Sul e do Oceano Pacífico Sul (cerca de 35,2) e o menos salino é o Oceano Pacífico Norte (34,2)
- A distribuição da salinidade é relativamente zonal, mas sua estrutura é diferente da TSM. Na salinidade existe, em linhas gerais, um máximo na região subtropical e um mínimo nas regiões tropicais e polares. Esta distribuição está intimamente ligada a distribuição da precipitação - evaporação



Salinidade superficial (psu) no inverno (janeiro - março ao norte do equador e julho - setembro ao sul do equador) com base em médias (climatológicas) de Levitus et al. (1994b). Extraído de Talley et al (2011).



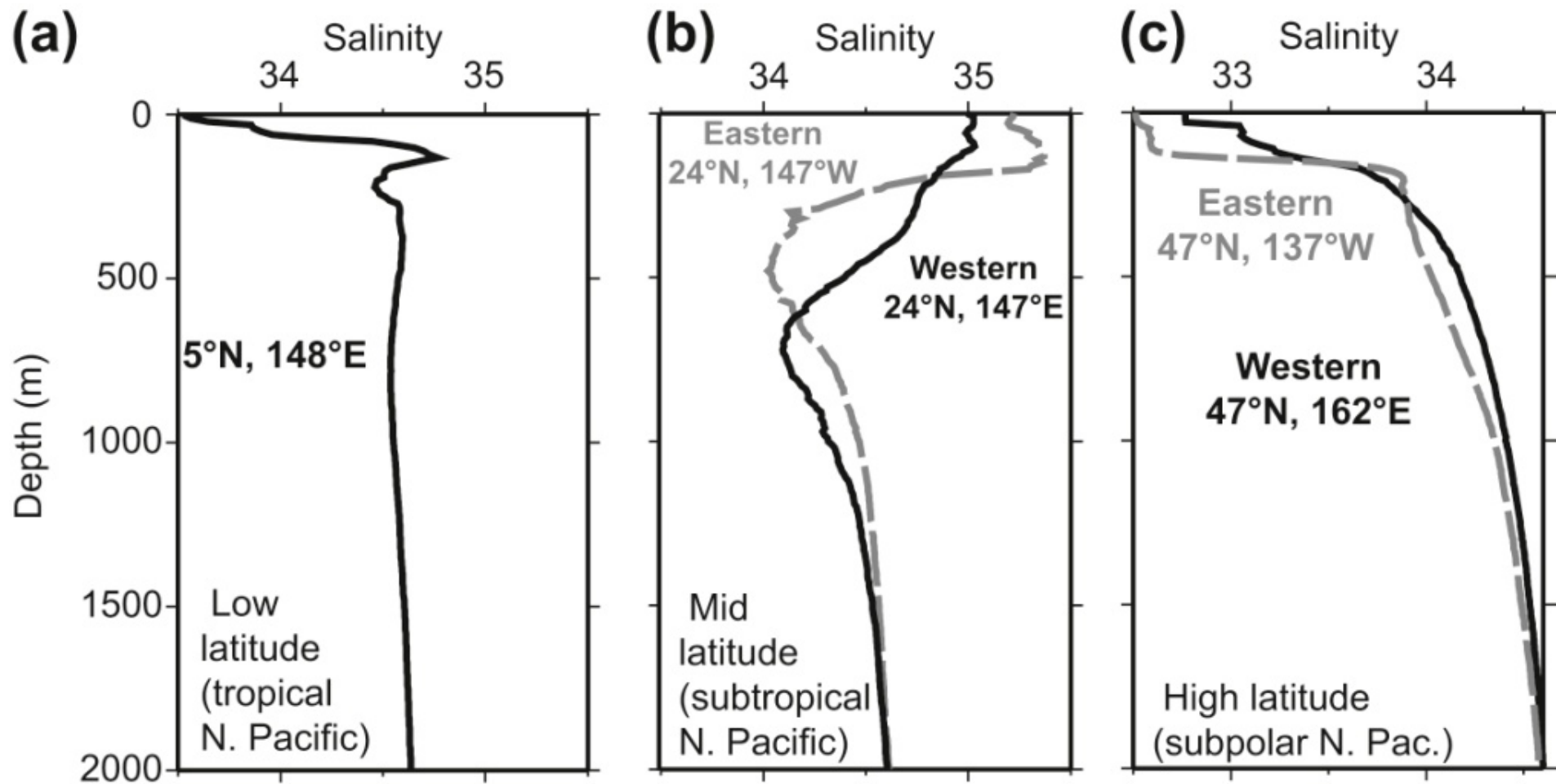
(a) Evaporação menos precipitação (E-P) (cm/ano), com base em dados médios anuais climatológicos (1979 - 2005) do National Center for Environmental Prediction. Precipitação líquida é negativa (azul), a evaporação líquida é positiva (vermelho). Sobrepostos: as divergências de transporte de água doce (Sverdrups ou um 10^9 kg/s), com base na velocidade do oceano e observações de salinidade. Extraído de Talley et al. (2011)



Salinidade na camada superior

- A distribuição vertical da salinidade é mais complexa que a da temperatura
 - Na camada superficial (regiões tropicais, subtropicais e parte das regiões sub-polares) a temperatura domina a estabilidade vertical
 - No oceano profundo, abaixo da piconclina, a temperatura também domina a salinidade
 - A salinidade, por sua vez, pode ter mais estruturas verticais, indo da baixa salinidade para a alta salinidade, sem a criação de uma recirculação vertical (vertical overturn)

Salinidade na camada superior

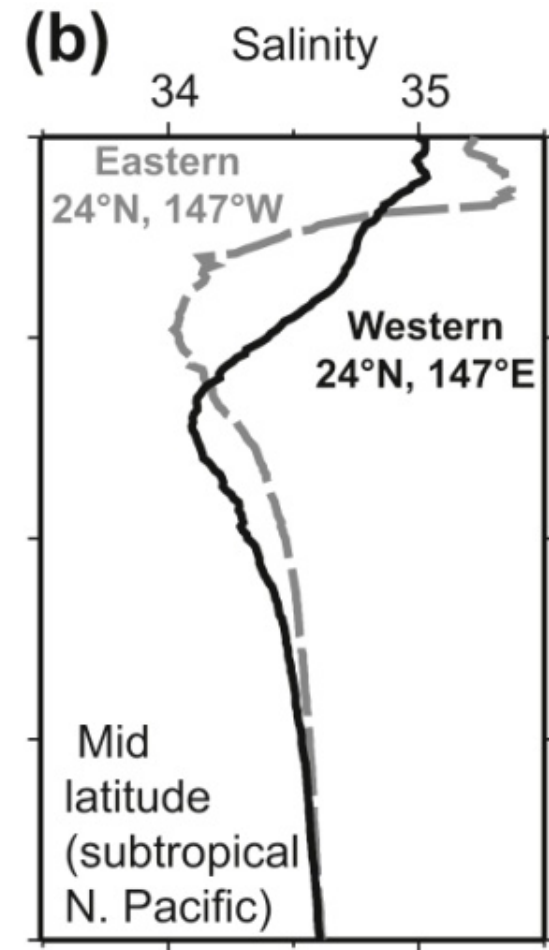


Perfis típicos de salinidade (psu) para as regiões tropical, subtropical e subpolar do Oceano Pacífico Norte. Extraído de Talley et al (2011).

Salinidade na camada superior

- **Região subtropical:**

- A salinidade é alta próximo a superfície devido a evaporação líquida
- A salinidade decresce até um mínimo entre 600 – 1000 m
- Abaixo disto a salinidade aumenta novamente até atingir um máximo
- As profundidades de mínima e máxima salinidade variam de acordo com os oceanos

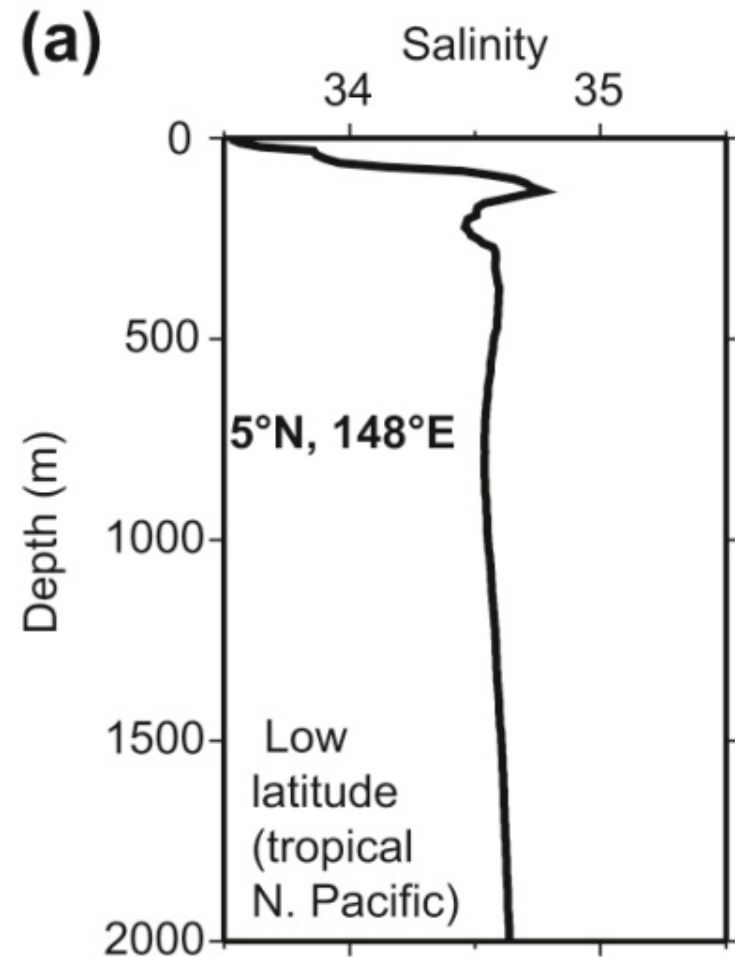


Perfil típico de salinidade (psu) para a região subtropical do Oceano Pacífico Norte. Extraído de Talley et al (2011).

Salinidade na camada superior

- **Região tropical:**

- A salinidade superficial é geralmente menor do que na região subtropical
- A salinidade aumenta até um máximo valor sub-superficial (100 – 200 m) próximo ao topo da termoclina
- Este valor máximo é resultado da subducção de águas superficiais mais salinas nos giros subtropicais

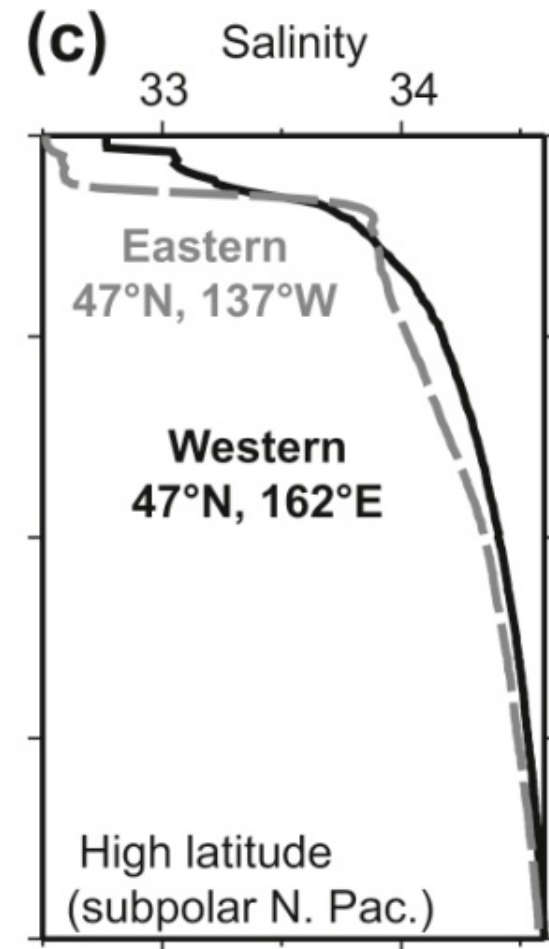


Perfil típico de salinidade (psu) para a regiões tropical do Oceano Pacífico Norte. Extraído de Talley et al (2011).

Salinidade na camada superior

- **Região subpolar e de alta latitude:**

- A salinidade superficial é baixa em função da alta precipitação, aporte fluvial e/ou degelo
- Existe a formação de uma haloclina causada pelo aumento da salinidade com a profundidade
- Nestas regiões, a picnoclina é geralmente definida pela distribuição de salinidade na vertical, uma vez que as temperaturas são relativamente frias ao longo de todo o ano

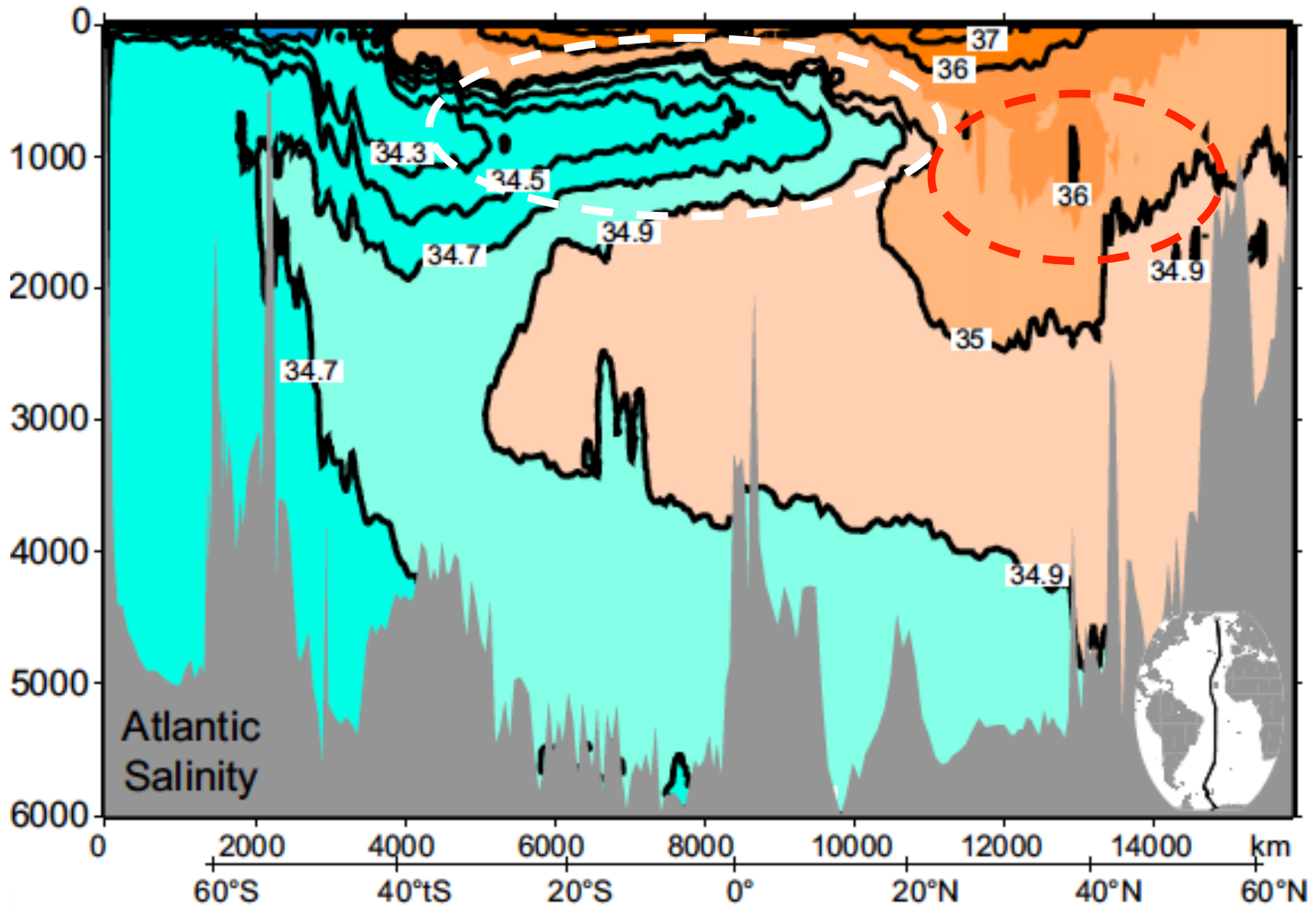


Perfil típico de salinidade (psu) para a região subpolar do Oceano Pacífico Norte. Extraído de Talley et al (2011).

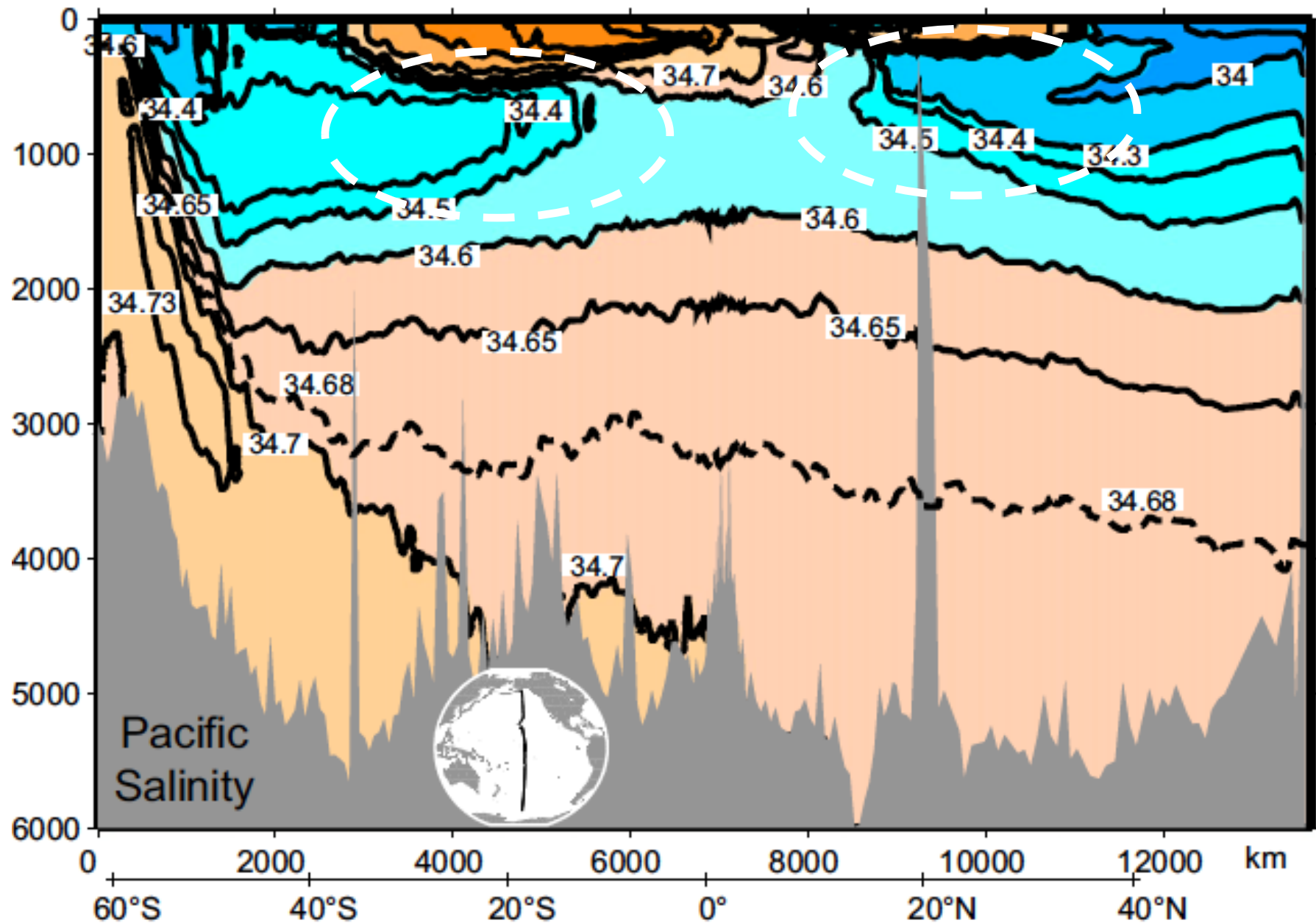


Salinidade na camada intermediária

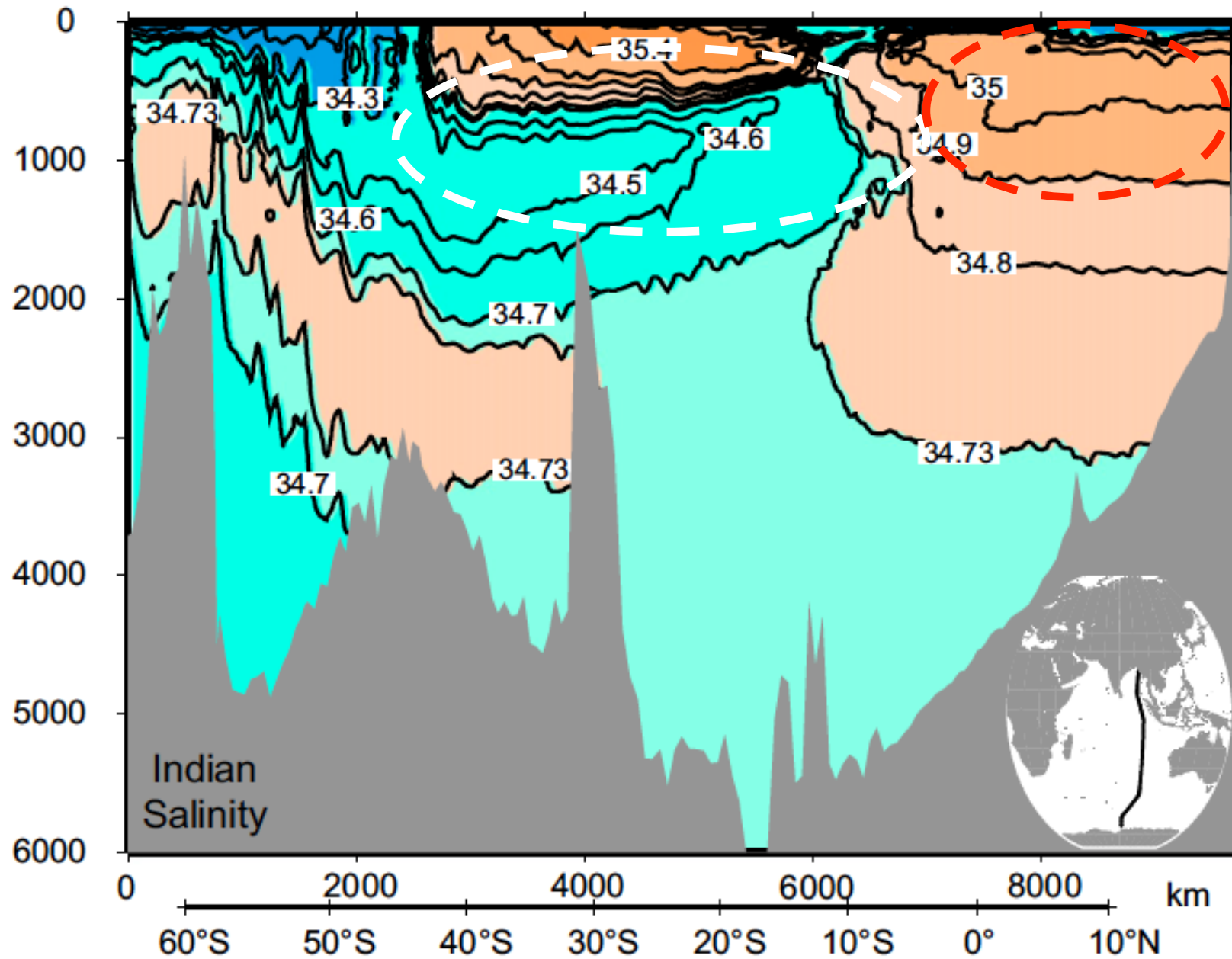
- Em profundidades intermediárias (1000 – 1500 m) em várias regiões do mundo, existem regiões horizontais extensas que ocupam uma camada vertical ampla ou com salinidades altas ou baixas
 - No Oceano Pacífico Norte e no Hemisfério Sul o mínimo de salinidade ocorre na profundidade de 1000 m, enquanto que na região subpolar do Oceano Atlântico Norte este mínimo ocorre a 1500 m. Estas camadas de baixa salinidade estão localizadas na base da pycnoclina, com temperaturas entre 3 – 6°C
 - As camadas de máximo de salinidade estão localizadas no Oceanos Atlântico Norte e Índico. Estas camadas são consideravelmente mais quentes que as camadas de baixa salinidade e este máximo de salinidade está associado ao processo de formação das massas de **Água Intermediária**



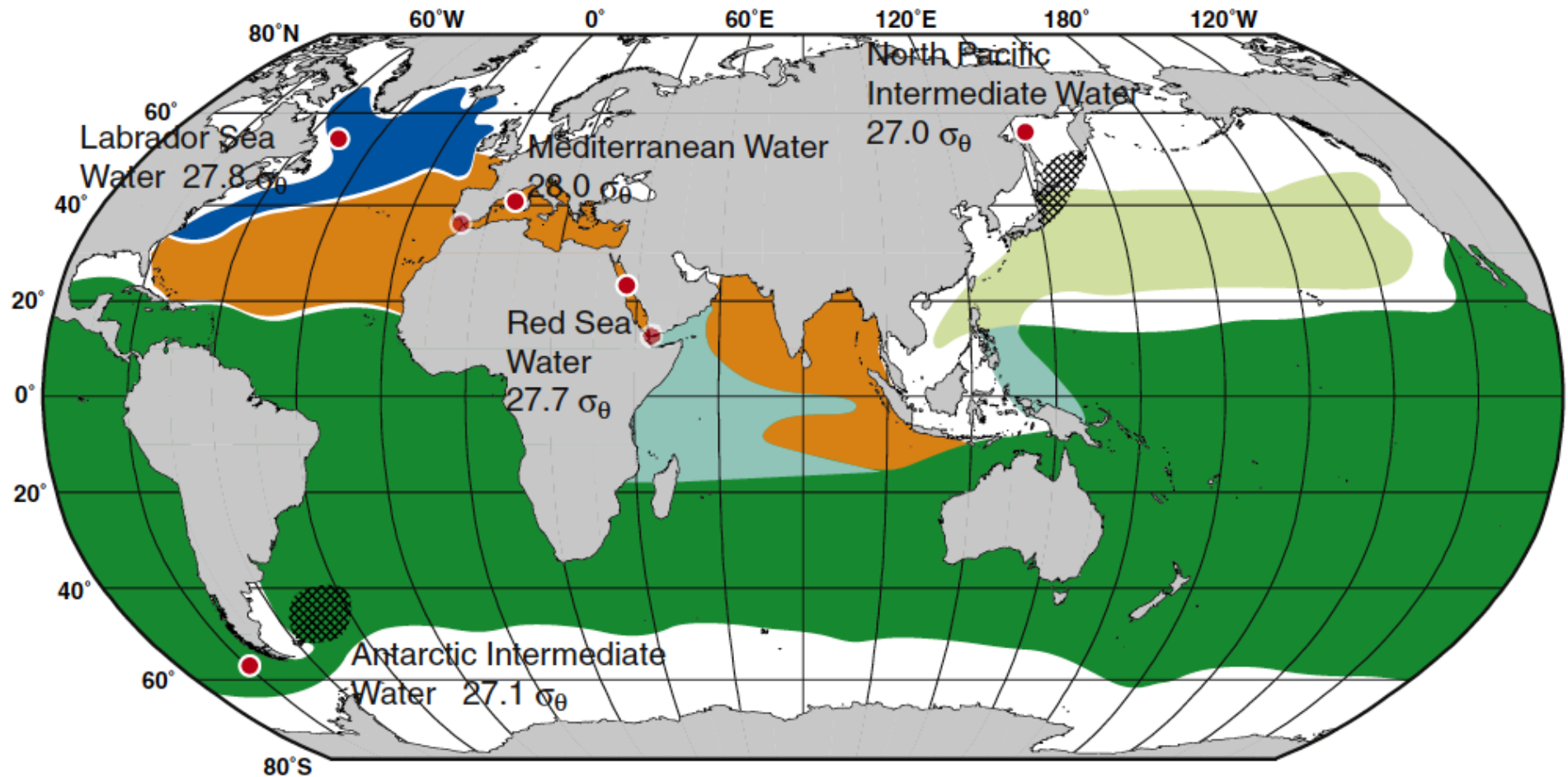
Seção de salinidade (psu) no Oceano Atlântico na longitude 20°W a 25°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



Seção de salinidade (psu) no Oceano Pacífico na longitude de 150°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



Seção de salinidade (psu) no Oceano Índico na longitude de 95°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



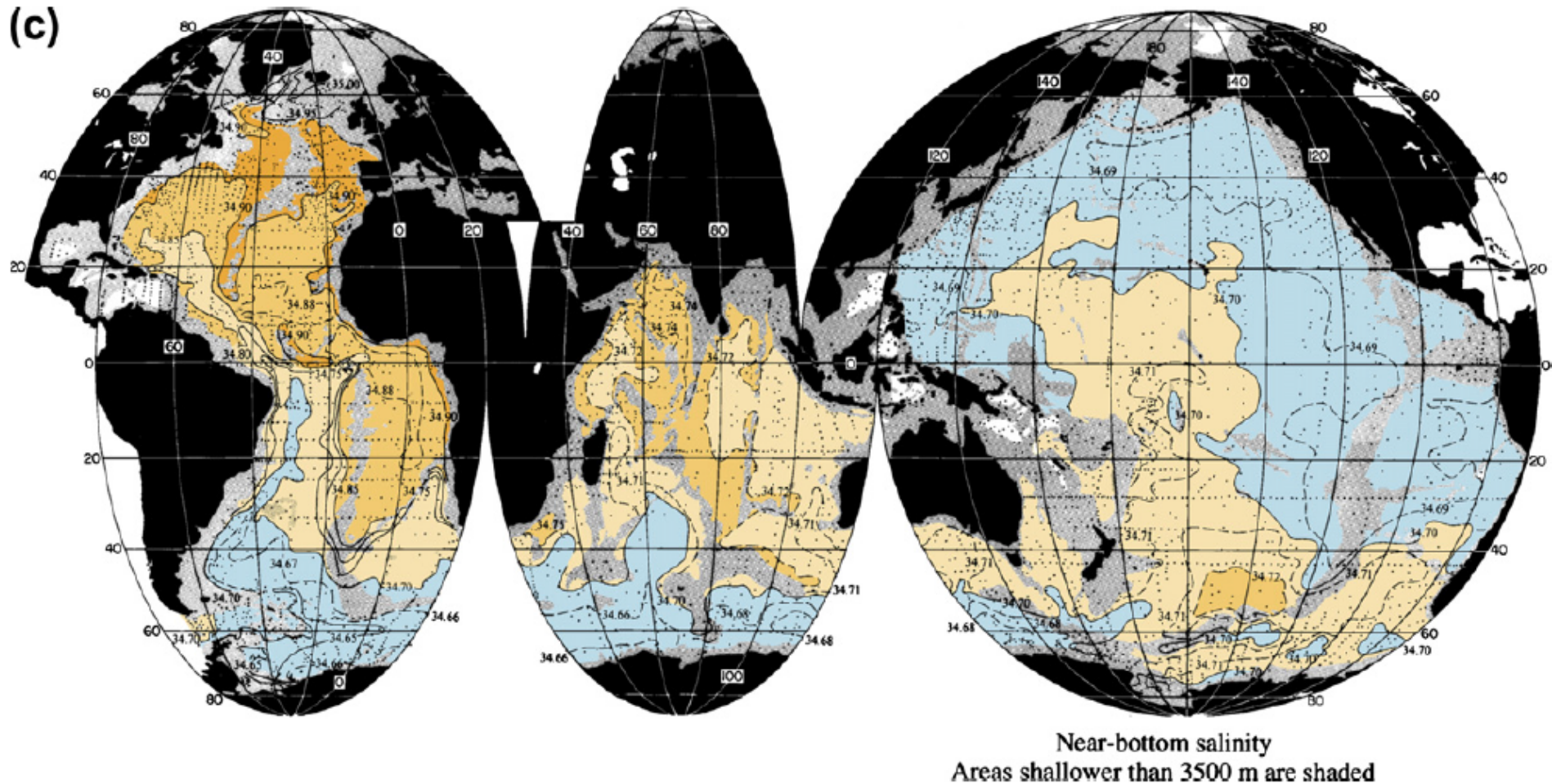
Aguas intermediárias de baixa e alta salinidade. **Água Antártica Intermediária - AAIW** (verde escuro), **Água Intermediária do Pacífico Norte - NPIW** (verde claro), **Água do Mar do Labrador - LSW** (azul escuro), **Água do Mediterrâneo - MW** (laranja, Oceano Atlântico), **Água do Mar Vermelho - RSW** (laranja, Oceano Índico). Azul claro no Oceano Pacífico: sobreposição de AAIW e NPIW. Azul claro no Oceano Índico: sobreposição de AAIW e RSW. Regiões hachuradas: locais de mistura que são particularmente importantes para as massas de água. Os pontos vermelhos indicam o local de formação primária de cada massa de água e os pontos em vermelho fraco marcam os estreitos que ligam os mares Mediterrâneo e Vermelho com o oceano aberto. A densidade potencial aproximada na região de formação está listada. Extraído de Talley et al (2011).



Salinidade na camada profunda

- As águas profundas nos oceanos apresentam variações de salinidade que estão associadas as suas regiões de formação
- Como o Oceano Atlântico Norte é o mais salgado de todos os oceanos na superfície, a massa de água profunda formada nesta região carrega uma assinatura de alta salinidade. Esta é a **Água Profunda do Atlântico Norte (NADW)**
- Já a massa de água formada na região Antártica é mais densa e tem salinidades mais baixas, ficando abaixo da NADW. Esta é a **Água de Fundo Antártica (AABW)**
- A sobreposição da NADW sobre a AABW pode ser observada tanto no Oceano Atlântico como no Oceano Índico
- Tanto o Oceano Índico Norte como o Oceano Pacífico Norte não formam águas densas (como a NADW e a AABW). O primeiro porque é localizado em regiões tropicais e o segundo porque apresenta águas superficiais de baixa salinidade

Salinidade na camada profunda



Distribuição da salinidade para o fundo dos oceanos onde a profundidade é maior que 3500 m . Extraído de Talley et al (2011).

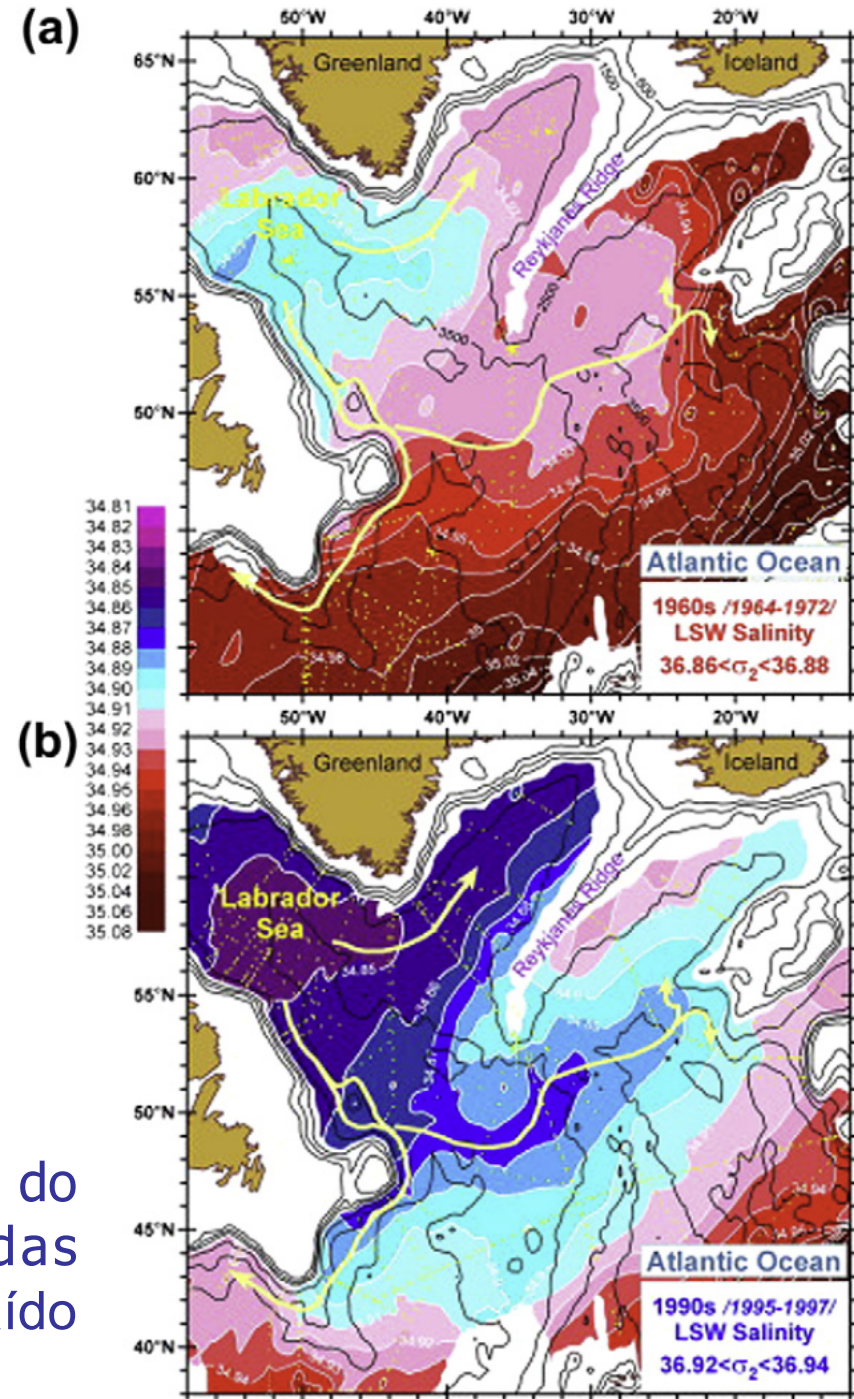


Variações temporais de salinidade

- As variações de salinidade em todas as escalas temporais são menos documentadas que as variações de temperatura
- Variações anuais da salinidade superficial no oceano aberto são inferiores a 0,5
- Regiões com variação sazonal da precipitação e do aporte fluvial (e.g. Baía de Bengala) e próximas a gelo marinho apresentam uma ampla variação sazonal da salinidade. Estas variações são geralmente confinadas às camadas mais superficiais
- Variações temporais de salinidade em uma mesma região também podem ser grandes em regiões de frentes
- Finalmente, variações interanuais e de longo período também são observadas e se inserem no contexto de mudanças climáticas

- Variações de salinidade no Oceano Atlântico Norte e no Marés Nórdicos estão associadas à mudanças na convecção da camada de mistura e mudanças na formação de massas de água
- 1960: A oscilação do Atlântico Norte (NAO) estava baixa, ou seja as temperaturas no Mar do Labrador eram quentes e as águas salinas
- 1990: A NAO estava alta, as temperaturas eram mais frias e as águas menos salinas

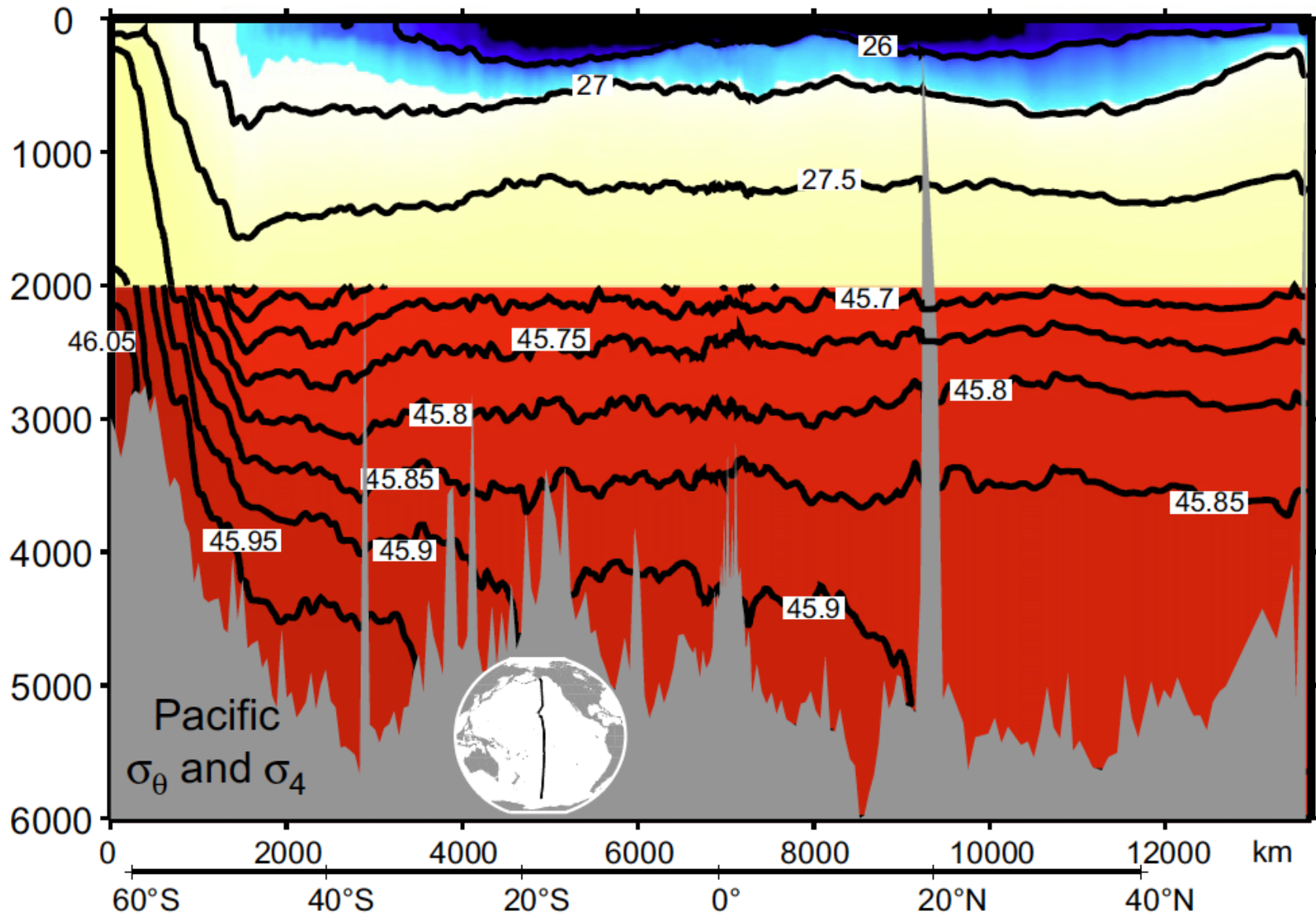
Salinidade na densidade da água do Mar do Labrador (LSW) para duas décadas diferentes (a) 1960s e (b) 1990s. Extraído de Talley et al (2011).



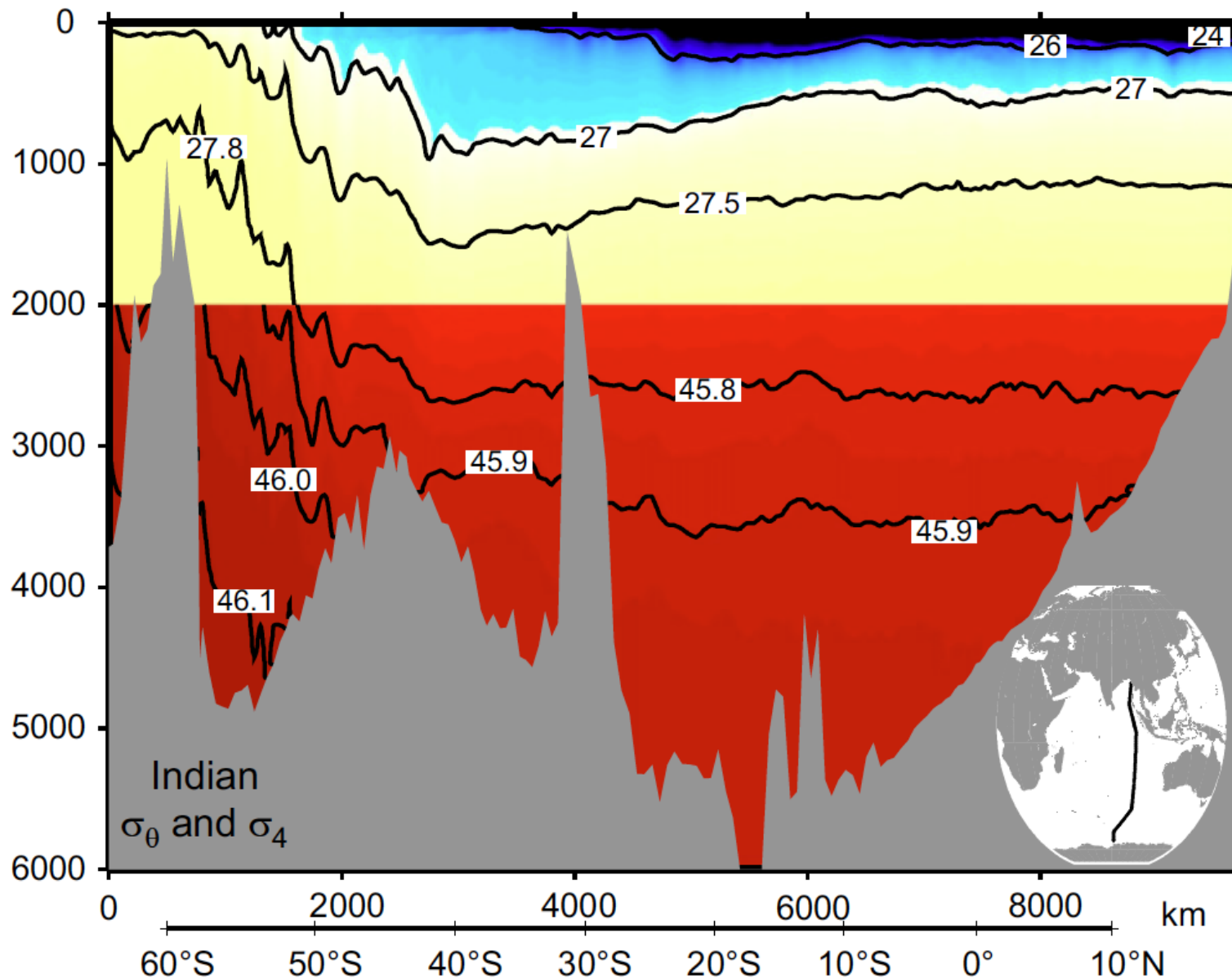


Distribuição de densidade

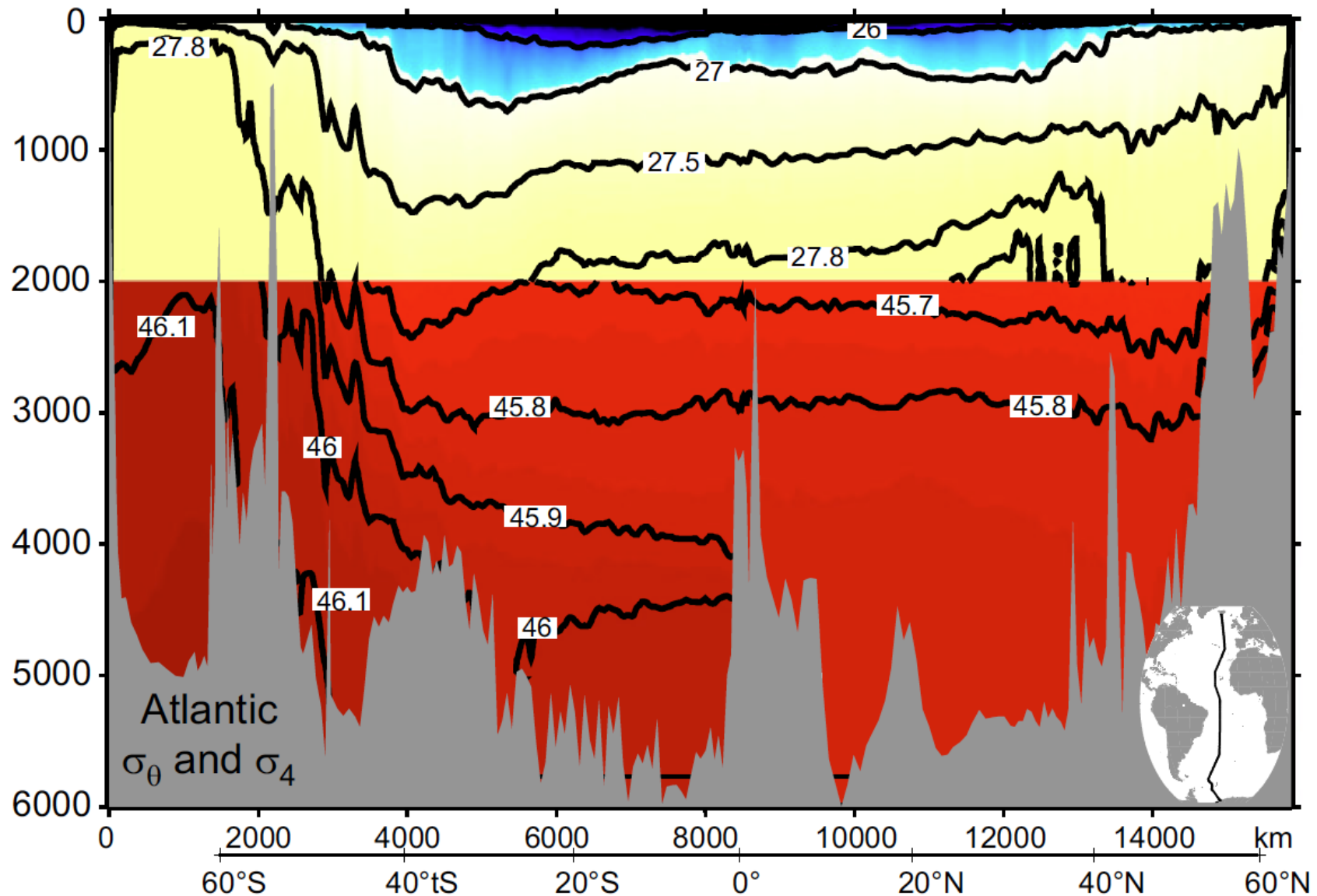
- A densidade potencial deve aumentar com a profundidade em um sistema em equilíbrio, ou seja, a coluna de água tem que apresentar estabilidade estática
 - A temperatura potencial e a salinidade agem conjuntamente para determinar a densidade, sendo que individualmente eles podem apresentar máximos e mínimos, desde que a densidade aumente com a profundidade
 - As únicas exceções a este aumento monotônico da densidade com a profundidade ocorrem em escalas muito curtas de tempo, da ordem de horas ou menos, que a a escala da recirculação (overtorn)
- Apesar de boa parte dos oceanos apresentar um estrutura estável para a densidade potencial, a escolha do nível mais correto para a densidade potencial pode ser crucial em algumas regiões, como por exemplo no caso do Oceano Atlântico, onde existem amplas inversões de salinidade ao longo da coluna d'água na interface entre NADW/AABW



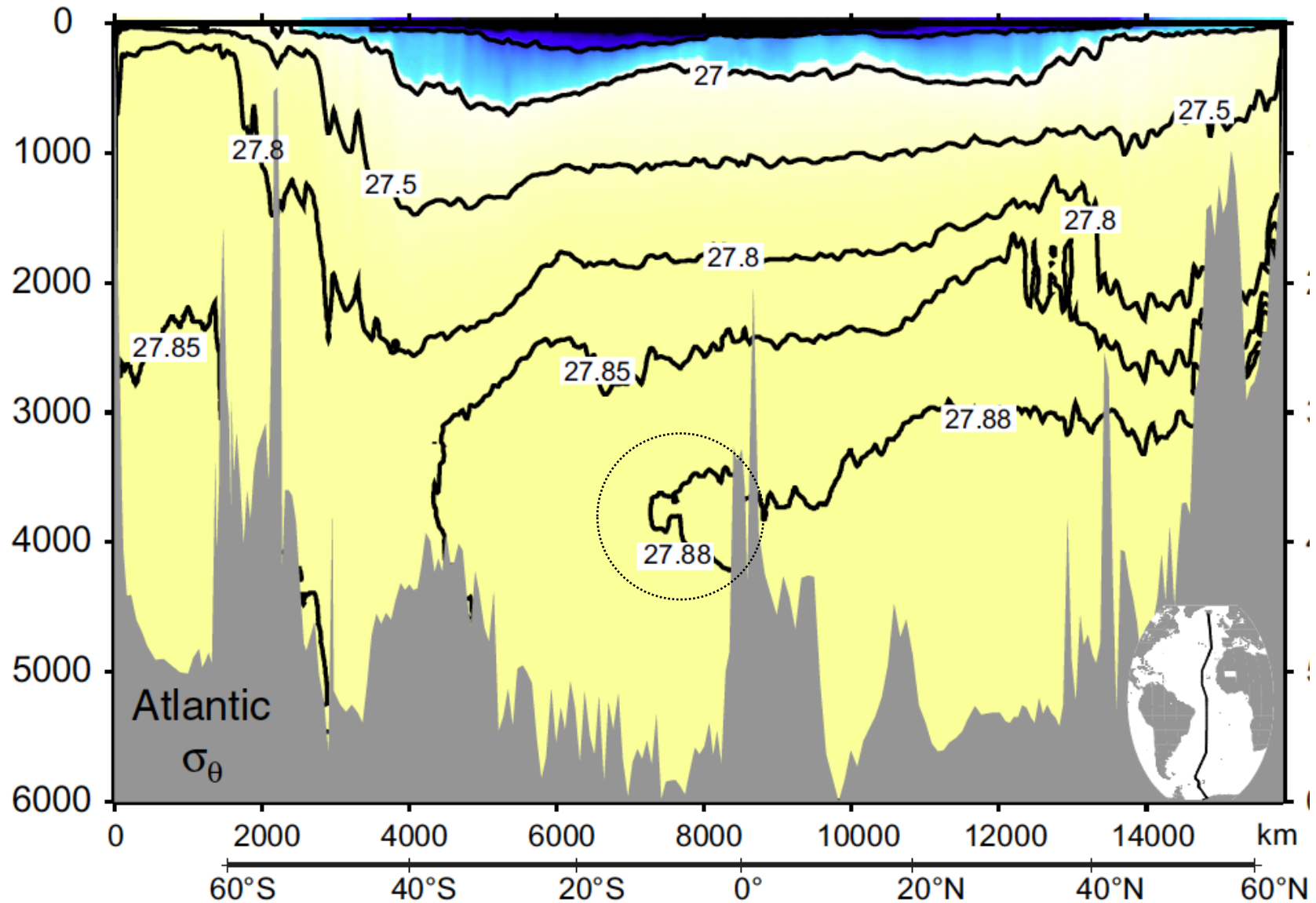
Seção de densidade potencial σ_θ (parte superior) e σ_4 (parte inferior) no Oceano Pacífico na longitude de 150°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



Seção de densidade potencial σ_θ (parte superior) e σ_4 (parte inferior) no Oceano Índico na longitude de 95°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



Seção de densidade potencial σ_θ (parte superior) e σ_4 (parte inferior) no Oceano Atlântico na longitude 20°W a 25°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).

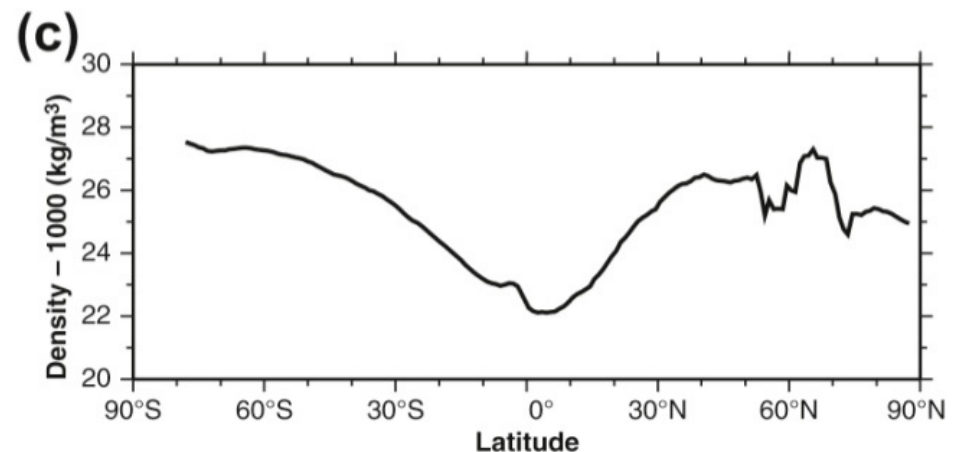


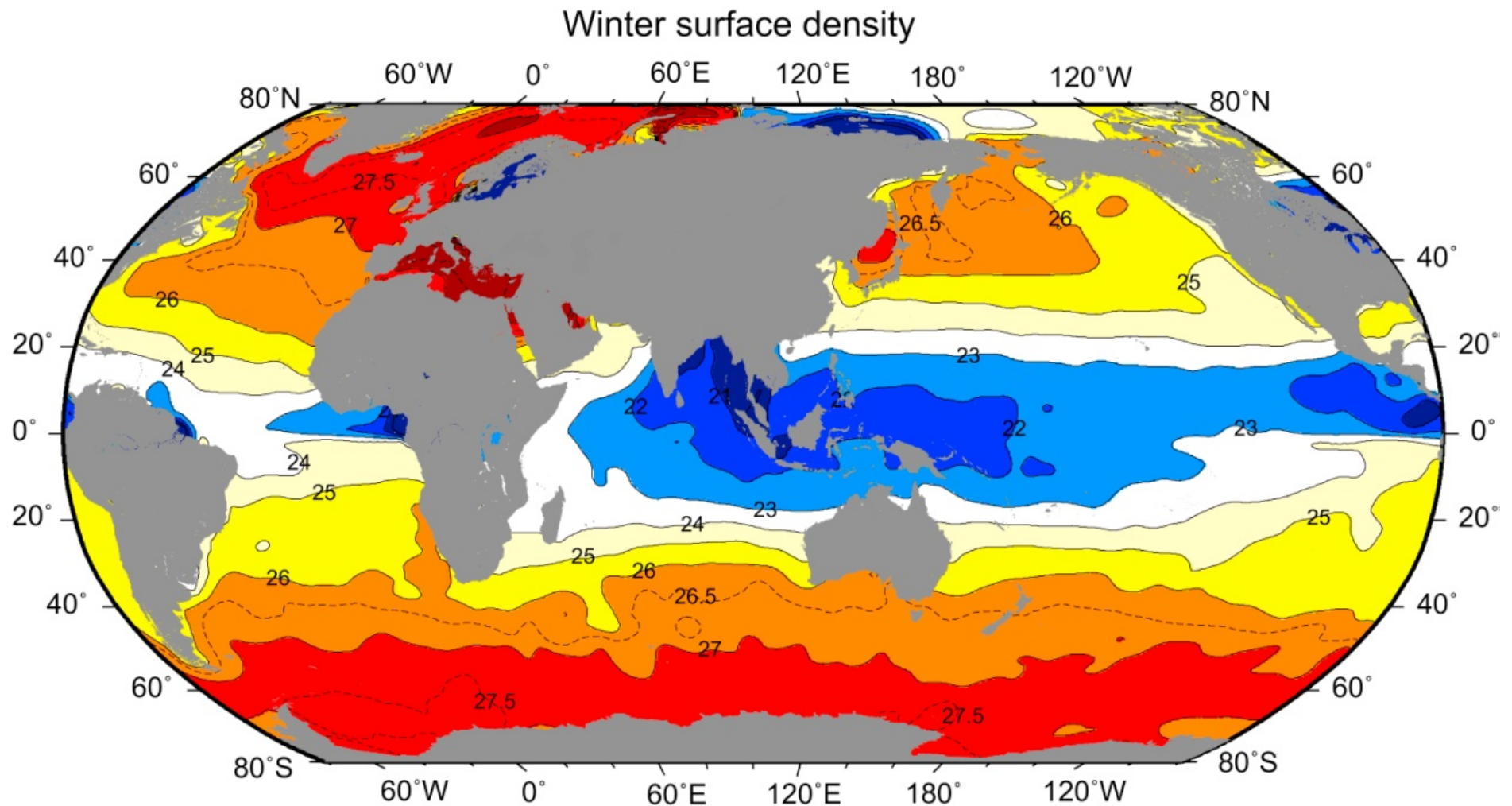
Seção de densidade potencial σ_θ no Oceano Atlântico na longitude 20°W a 25°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).

Densidade na superfície do mar e na camada superficial

- A densidade da água do mar na superfície dos oceanos aumenta de $\sigma_\theta = 22 \text{ kg m}^{-3}$ (próximo ao equador) até $\sigma_\theta = 26\text{-}28 \text{ kg m}^{-3}$ (em $50\text{-}60^\circ$). Depois desta latitude o aumento é pequeno devido as menores salinidades em regiões de altas latitudes
- A densidade na superfície e a estratificação vertical determinam a profundidade para qual as águas superficiais poderão afundar

Variação com a latitude (c) da densidade superficial calculada com base na média para todos os oceanos para o **inverno**. Ao norte do equador: janeiro - março. Ao sul do equador: julho - setembro. Baseado em médias (climatológicas) de Levitus e Boyer (1994) e Levitus et al. (1994b). Extraído de Talley et al (2011).





Densidade superficial σ_θ (kg m^{-3}) no **inverno** (janeiro – março ao norte do equador e julho - setembro ao sul do equador) com base em médias (climatológicas) baseadas em Levitus e Boyer (1994) e Levitus et al. (1994b). Extraído de Talley et al (2011).

Densidade na superfície do mar e na camada superficial

- No final do inverno, as águas superficiais atingem sua máxima densidade local, uma vez que o esfriamento está terminando
- Este processo está associado à camadas de mistura mais profundas

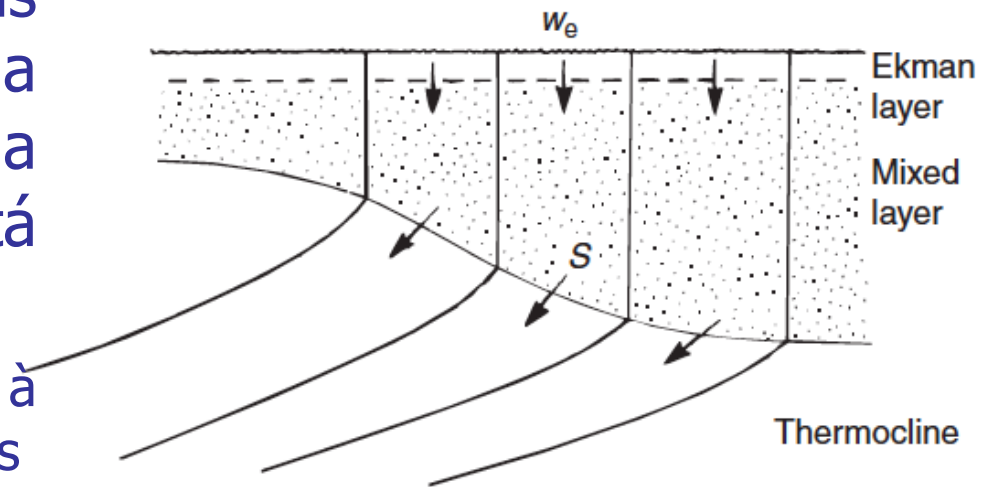


Diagrama esquemático mostrando as isopícnas da termoclina atingindo a camada de mistura. S é a taxa de subducção com a qual a termoclina é ventilada. w_e é a velocidade de bombeamento de Ekman. Extraído de Marshall et al (1993)

Densidade na superfície do mar e na camada superficial

- No final do inverno, as águas superficiais atingem sua máxima densidade local, uma vez que o esfriamento está terminando
 - Este processo está associado à camadas de mistura mais profundas
 - A medida que o aquecimento inicia, esta camada de água mais densa sofre a sobreposição de águas mais quentes (menos densas). Se estas águas mais frias do inverno movem-se da sua região de origem para regiões com águas superficiais mais leves, elas se desconectam da superfície

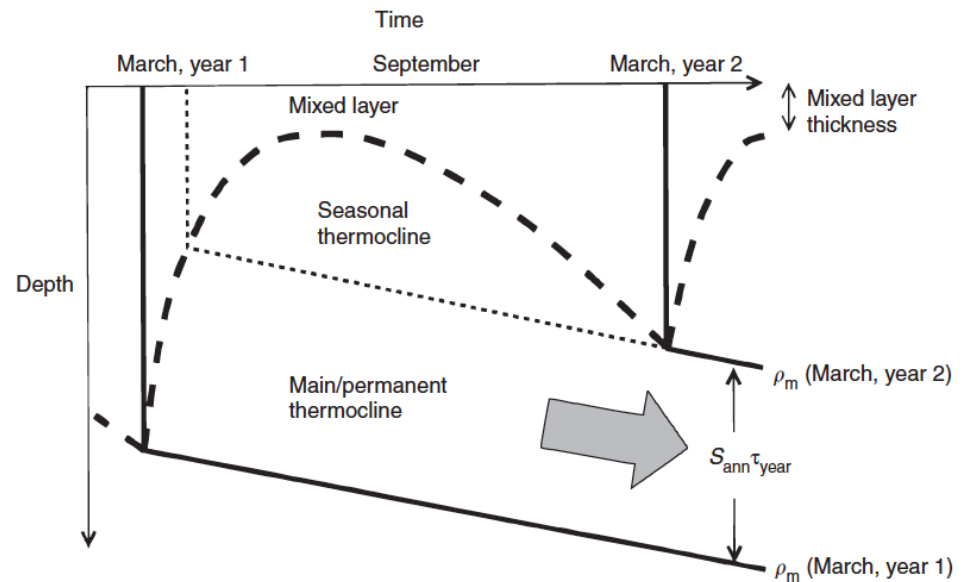


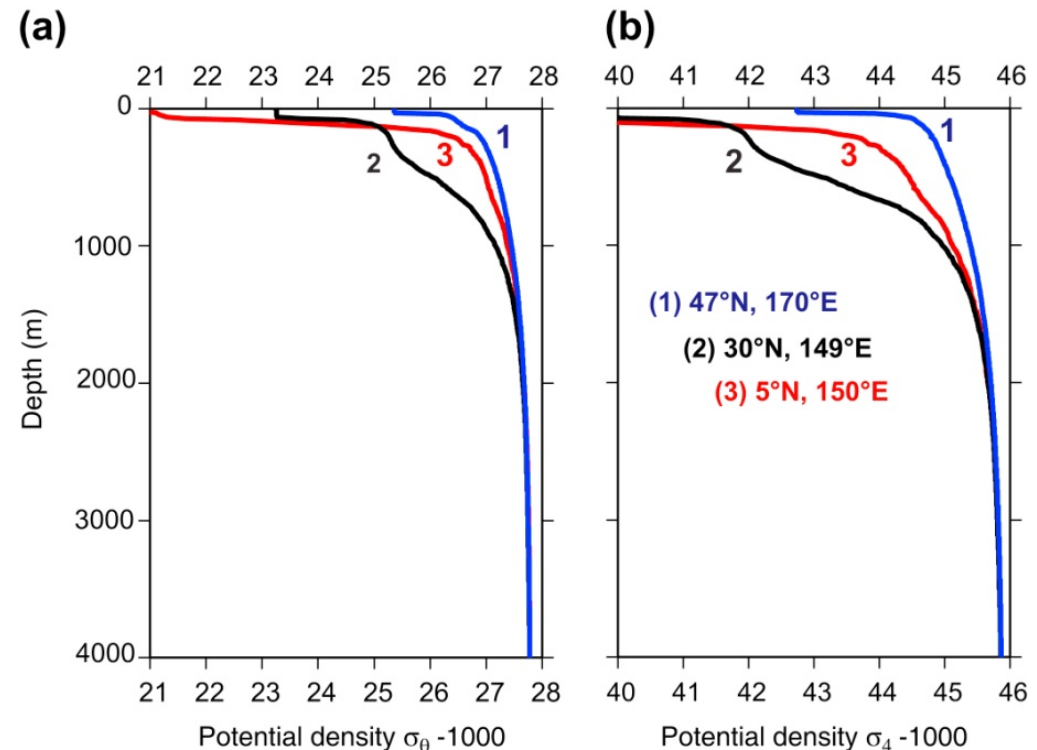
Diagrama esquemático ilustrando o ciclo sazonal da camada de mistura seguindo a movimentação da coluna d'água. Extraído de Williams (2001).

Picnoclina

- De forma análoga à temperatura, a densidade apresenta uma camada superficial com densidade constante, uma camada onde a densidade aumenta rapidamente com a profundidade e uma camada profunda onde a densidade aumenta mais lentamente

➤ Em todas as regiões também existe a picnoclina sazonal (devido ao aquecimento e/o derretimento de gelo)

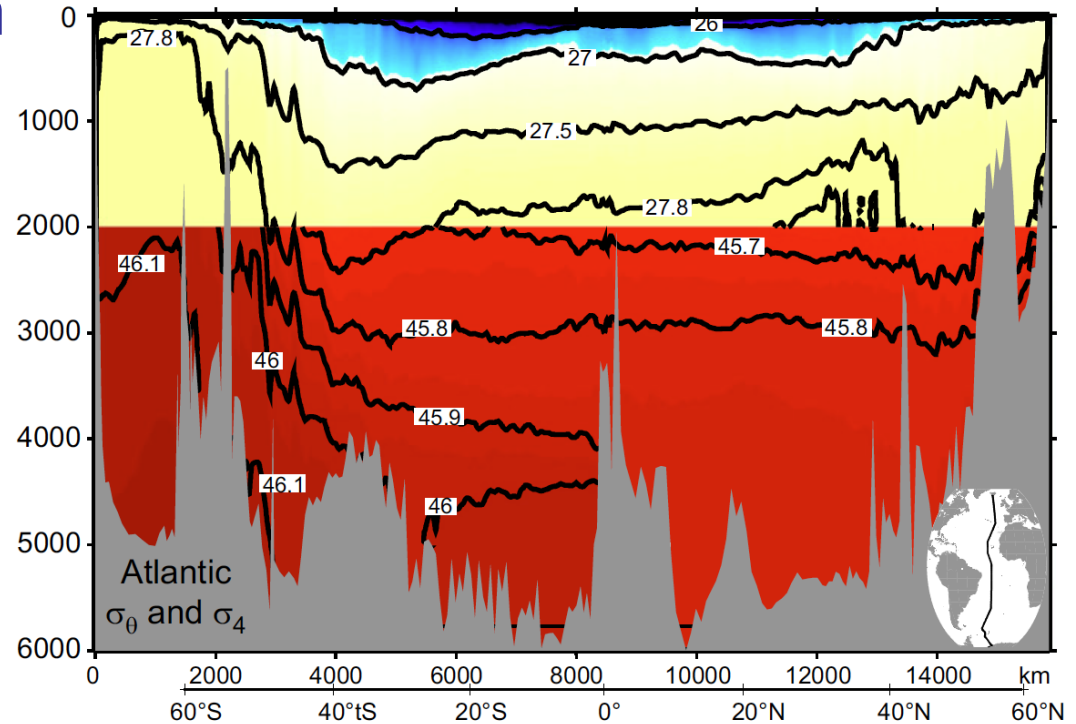
Perfis de distribuição típica da densidade indo da baixa para a alta latitude no Oceano Pacífico Norte. Extraído de Talley et al (2011).



Distribuição da densidade potencial ao longo da profundidade

- As características principais incluem: i) as partes côncavas nas camadas superficiais e intermediárias das regiões subtropicais e ii) a forte inclinação das isopicnais em direção à região Antártica

- Como a mistura é fortemente inibida ao longo da vertical, existe uma preferência para que ela ocorra ao longo de superfícies isopicnais
- Águas profundas (alta densidade) são formadas em altas latitudes



Seção de densidade potencial σ_θ (parte superior) e σ_4 (parte inferior) no Oceano Atlântico na longitude 20°W a 25°W. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).



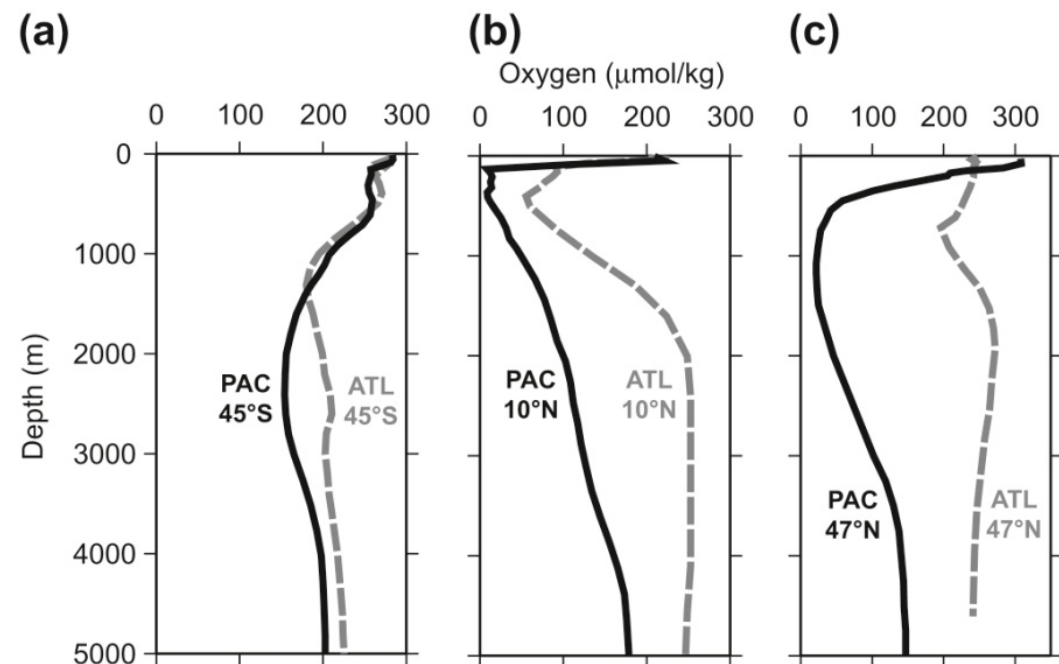
Oxigênio dissolvido

- A água do mar contém gases dissolvidos, incluindo o oxigênio e o dióxido de carbono
- A quantidade de oxigênio dissolvida é usada como um importante traçador da circulação oceânica e como um indicador do tempo que se passou desde que uma parcela de água deixou a superfície
- A faixa de valores para o oxigênio dissolvido no oceano varia de 0 a 350 $\mu\text{mol/kg}$ (0 a 8 ml/l)
- Na superfície, a água está geralmente próxima ao seu valor de saturação
- Abaixo das camadas superficiais, a saturação do oxigênio é inferior a 100%, uma vez que o oxigênio é consumido pelos organismos vivos e pela oxidação bacteriana de detritos
- Geralmente, valores baixos de oxigênio indicam que uma parcela de água está fora da superfície a um longo período de tempo

Oxigênio dissolvido

- Fatores comuns na distribuição de oxigênio incluem: i) altos valores próximos a superfície, ii) um mínimo de oxigênio entre 500 – 2500 m, iii) altos valores abaixo de 1500 m (no caso do Oceano Atlântico – NADW), iv) Baixos valores no Oceano Pacífico Norte abaixo da superfície e v) distribuição similar em subsuperfície no HS

Perfis de oxigênio dissolvido ($\mu\text{mol/kg}$) para os Oceanos Pacífico (linha preta) e Atlântico (linha cinza) em (a) 45°S, (b) 10°N e (c) 47°N. Dados baseados no World Oceano Experiment. Extraído de Talley et al (2011).





Oxigênio dissolvido

- O valor mínimo de oxigênio ao longo dos oceanos globais em **profundidades médias** (camadas intermediárias e profundas), situado entre os valores mais altos na superfície e no fundo, é o resultado da combinação de alguns mecanismos:
 - A circulação e mistura reduzidas não permitem a reposição do oxigênio consumido
 - O aumento da densidade com a profundidade (estabilidade) permite que os detritos biológicos se acumulem nesta região, o que aumenta a taxa de oxidação
 - As águas de fundo tem valores relativamente mais altos de oxigênio devido a sua fonte superficial Antártica
- No caso específico do Oceano Atlântico é importante destacar que a NADW causa um aumento do oxigênio na camada profunda



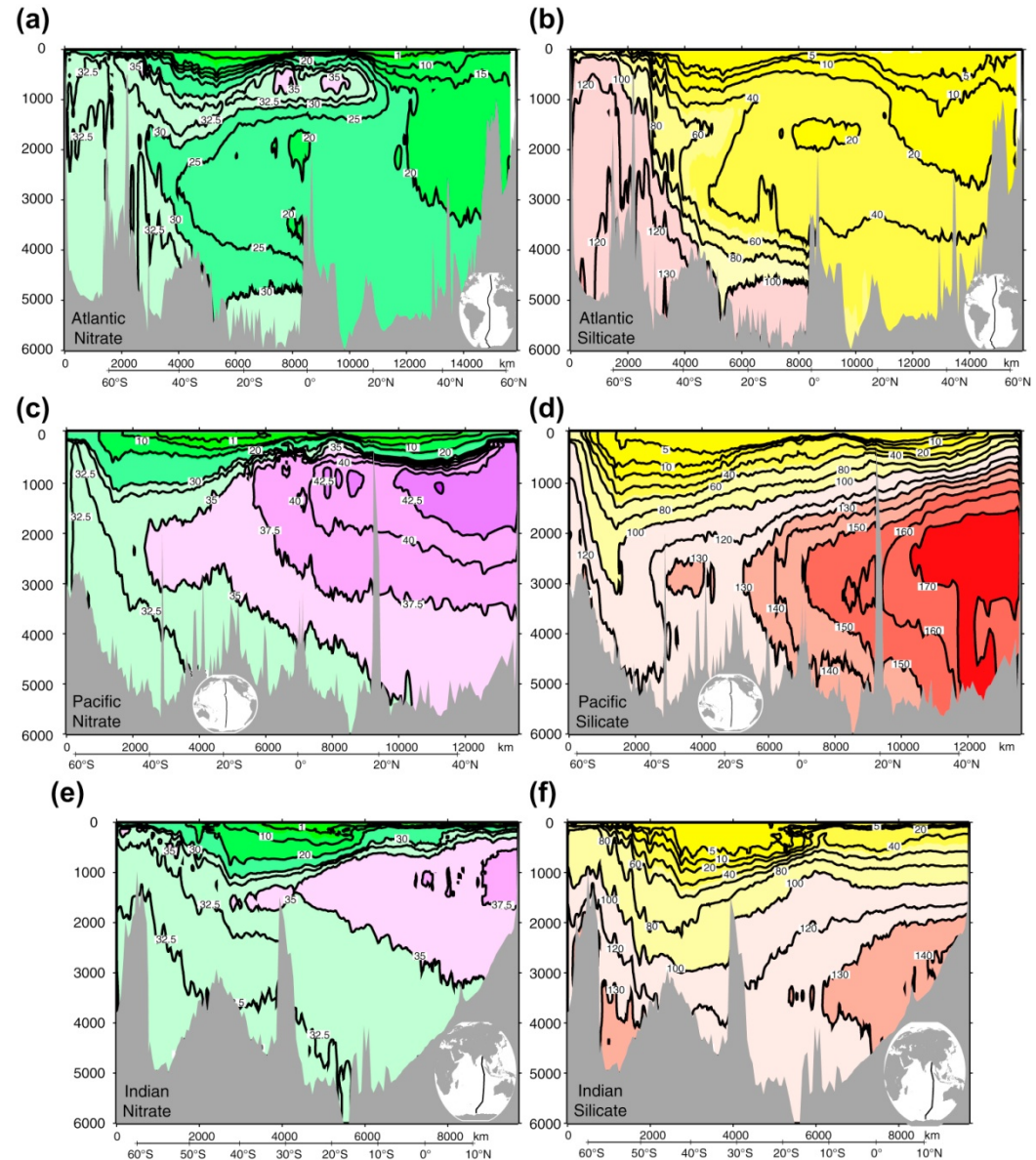
Nutrientes e outros traçadores

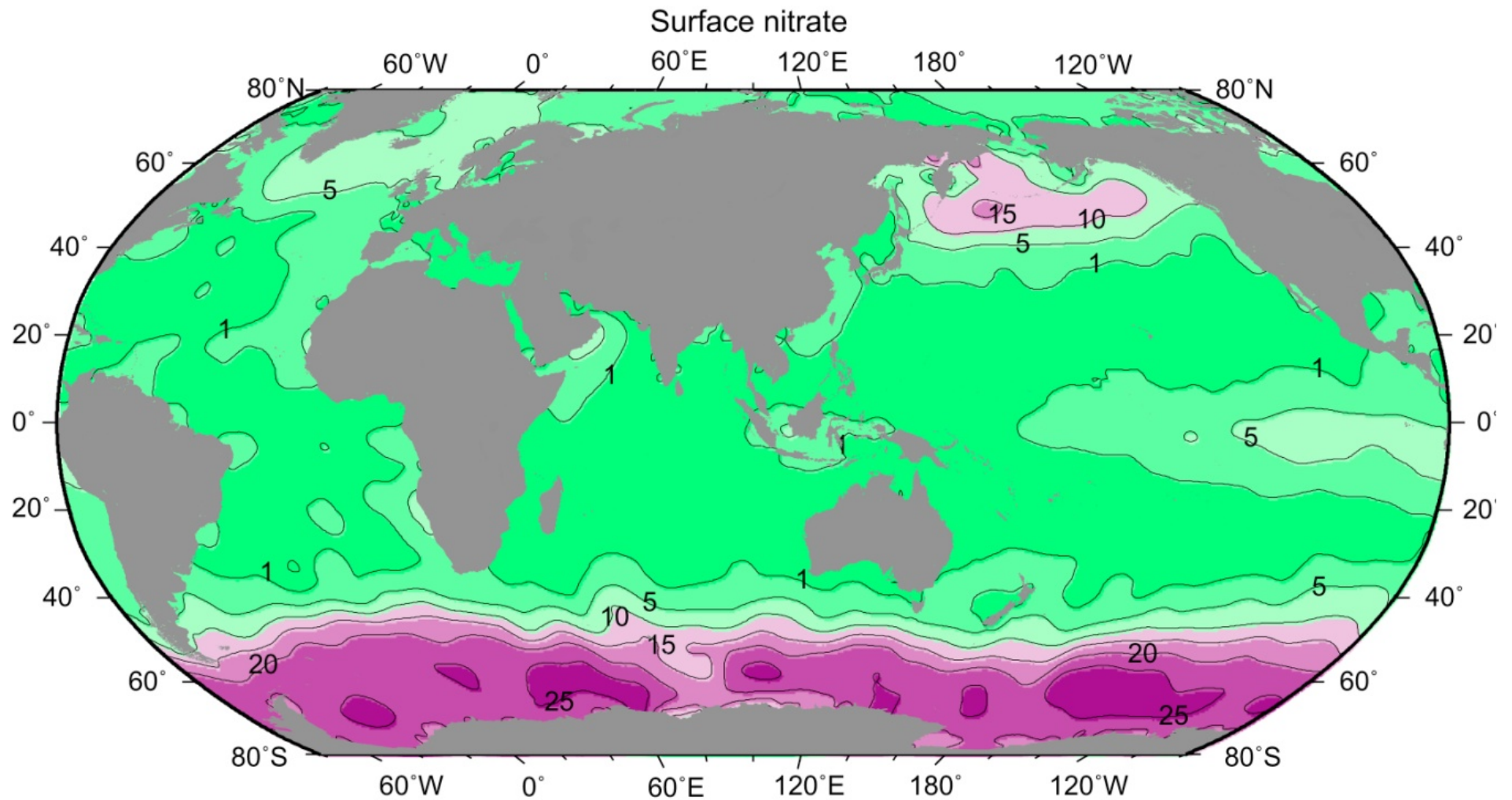
- Outras propriedades da água usadas como traçadores de fluxo ou na identificação de massas de água incluem os nutrientes, gases dissolvidos (além do oxigênio e dióxido de carbono) e pequenos organismos plantônicos
 - Os nutrientes apresentam baixos valores nas primeiras centenas de metros da coluna d'água e altos valores nas águas profundas
 - Os baixos valores na camada superficial são causados pela utilização pelo fitoplâncton (zona eufótica)
 - Os aumento nas camadas profundas são causados pela liberação através de processos biológicos durante o decaimento de material detrito que afunda das camadas superiores
 - A distribuição de nutrientes é aproximadamente uma imagem espelhada da distribuição de oxigênio
 - Enquanto fosfato e nitrito tem distribuições similares, a sílica tem uma fonte adicional no fundo dos oceanos, uma vez que ela pode estar dissolvida na água do mar através dos sedimento

Nutrientes e outros traçadores

- A reposição de nutrientes na superfície é fortemente influenciada por processos físicos como difusão vertical, ressurgência e recirculação
- O nitrato é próximo a zero em regiões subtropicais e sua concentração aumenta em regiões onde ocorrem ressurgências

Nitrato ($\mu\text{mol}/\text{kg}$) e sílica dissolvida ($\mu\text{mol}/\text{kg}$) para o Oceano Atlântico (a, b), o Oceano Pacífico (c, d), e o Oceano Índico (e, f). Os eixos horizontais para cada oceano são diferentes. Dados do World Ocean Circulation Experiment. Extraído de Talley et al (2011).





Nitrato ($\mu\text{mol/l}$) na superfície do mar, a partir dos dados climatológicos de Conkright, Levitus e Boyer (1994). Extraído de Talley et al (2011).



Nutrientes e outros traçadores

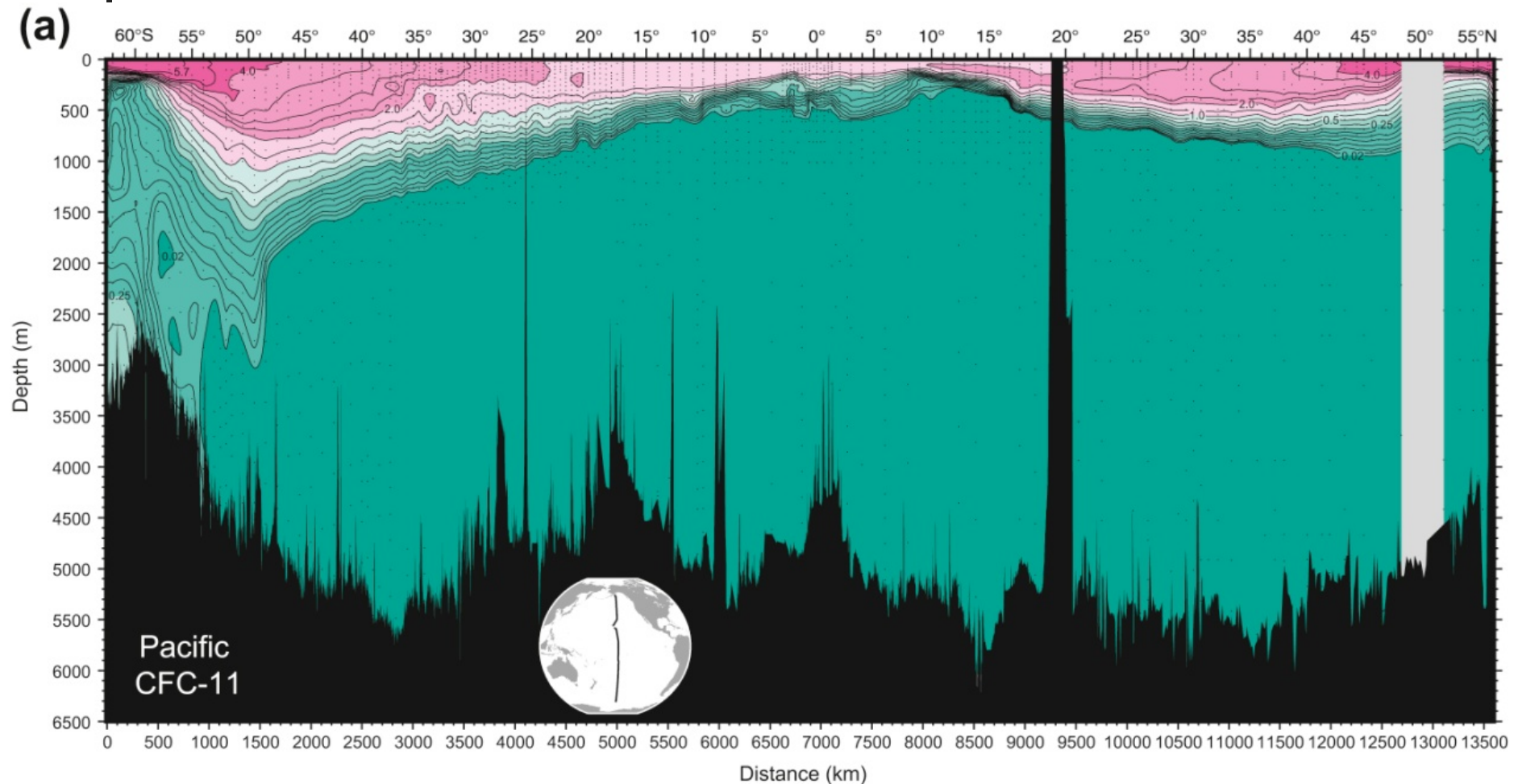
- As distribuições de oxigênio e nutrientes, juntamente com a salinidade, são uma importante fonte de identificação de massas de água abaixo picnoclina:
 - A NADW, no Oceano Atlântico, apresenta valores elevados de oxigênio, baixos valores de nutrientes e alta salinidade em camadas profundas
 - A Água Profunda do Pacífico apresenta baixos valores de oxigênio, altos valores de nutrientes
 - A AABW, por sua vez, apresenta valores mais elevados de oxigênio dissolvido e valores mais baixos de nutrientes, sendo uma água de fundo extremamente fria



Idade, tempo de recirculação e taxa de ventilação

- Estimativas de idade e taxas de recirculação das massas de água ajudam no entendimento da distribuição da temperatura e salinidade nos oceanos, nas taxas de reposição dos nutrientes nas camadas superficiais e nas trocas de gases entre o oceano e a atmosfera. Algumas definições importantes incluem:
 - **Idade:** é o tempo desde que uma parcela de água esteve na superfície, em contato com a atmosfera
 - **Taxa de ventilação:** é o transporte de água que deixa a superfície no local de formação e move-se em direção ao interior do oceano
 - **Tempo de recirculação:** é a quantidade de tempo necessária para reabastecer um reservatório (e.g. Uma bacia oceânica)
 - **Tempo de residência:** é o tempo que uma partícula fica em um reservatório

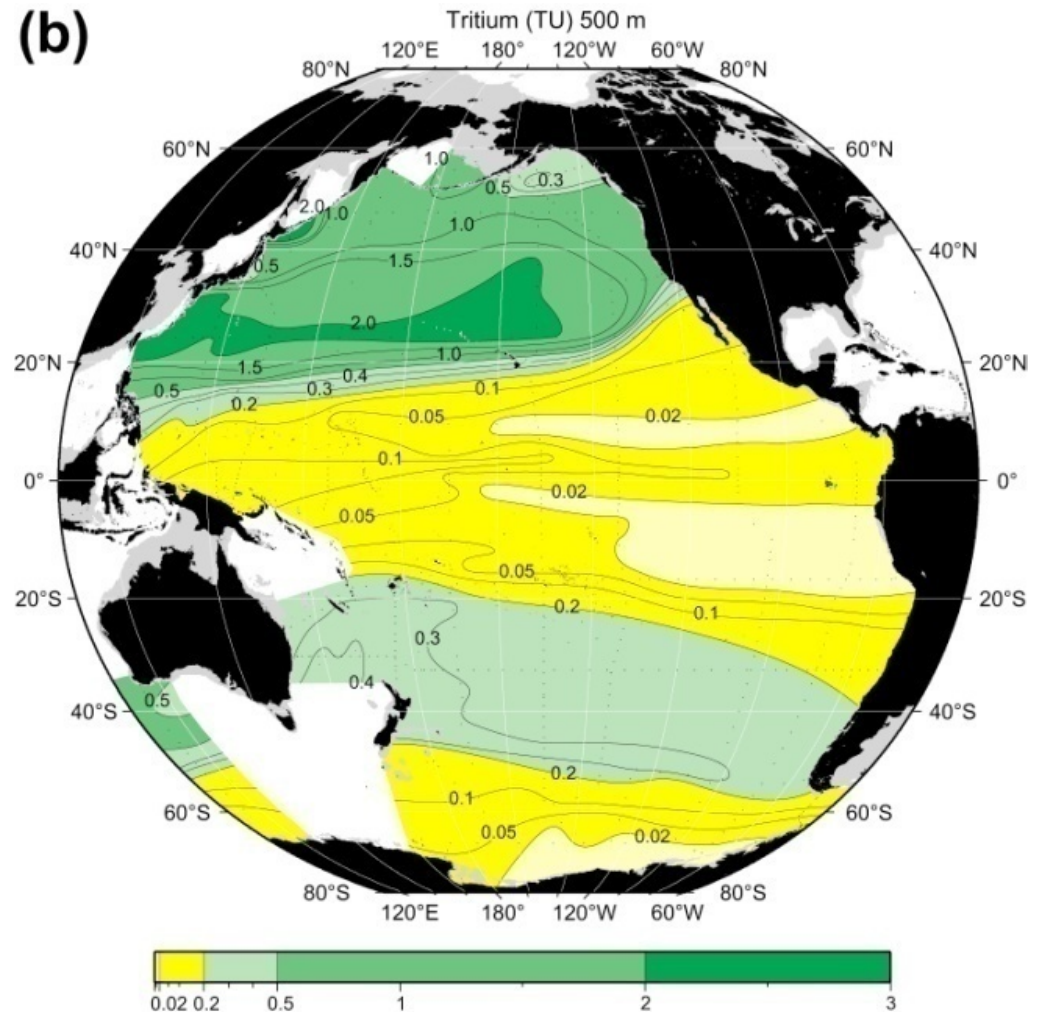
Idade, tempo de recirculação e taxa de ventilação



Evidências de ventilação recente com base na quantidade de Clorofluorcarbono (CFC-11; pmol/kg) no Oceano Pacífico em 150°W. Do atlas WOCE do Oceano Pacífico. Extraído de Talley et al (2011).

Idade, tempo de recirculação e taxa de ventilação

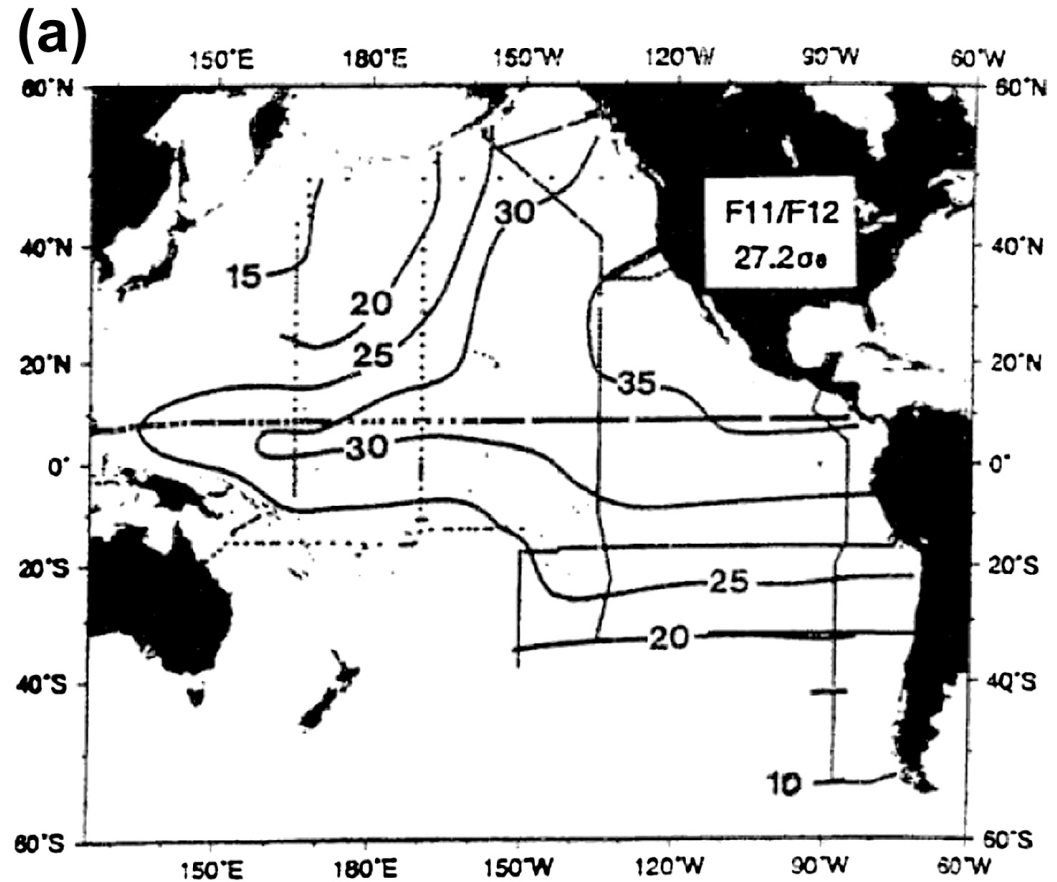
- Assim como o CFC-11, o Trítio pode ser usado como uma evidência de ventilação recente (inferior a 60 anos)



Concentração de Trítio na profundidade de 500 m no Oceano Pacífico com base no atlas WOCE do Oceano Pacífico. Extraído de Talley et al (2011).

Idade, tempo de recirculação e taxa de ventilação

- Assim como o CFC-11, o Trítio pode ser usado como uma evidência de ventilação recente (inferior a 60 anos)
- Pares de traçadores, cujas taxas de concentração mudam com tempo podem ser utilizados para estimar a idade



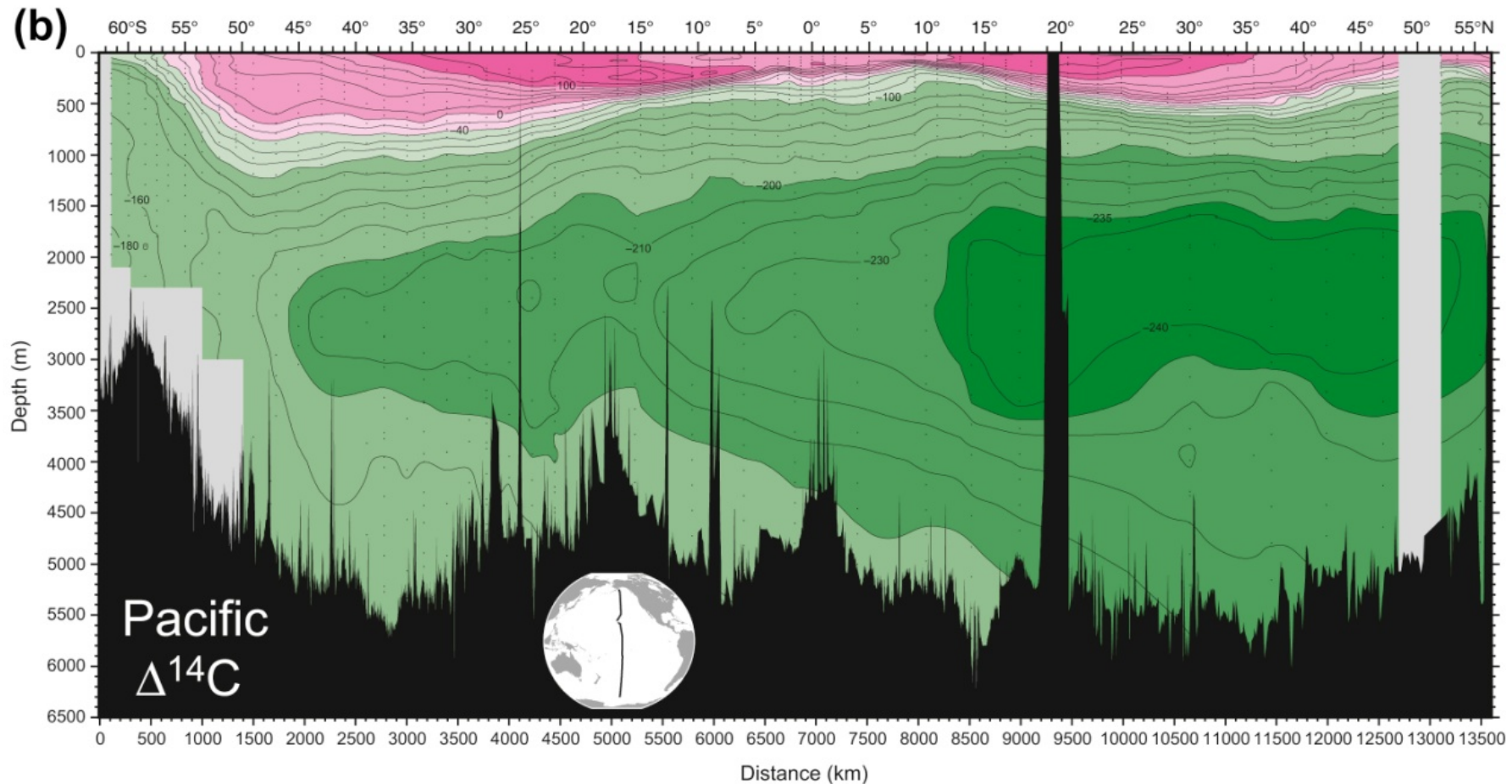
Idade (anos) das águas do Oceano Pacífico na superfície isopical de $\sigma_\theta = 27,2$, usando a razão CFC-11 e CFC-12. Extraído de Talley et al (2011).



Idade, tempo de recirculação e taxa de ventilação

- Para o oceano profundo, onde as águas são muito antigas para serem datadas com traçadores antropogênicos, e como um método alternativo para se estimar a idade, traçadores naturais podem também ser utilizados
 - O ^{14}C , por exemplo, é criado na atmosfera por raios cósmicos e rapidamente se torna parte do CO_2 atmosférico. O ^{14}C entra no oceano junto com o CO_2 que se dissolve nas águas superficiais
 - No processo de subducção o ^{14}C decai a uma taxa de 1% a cada 83 anos
 - Os maiores deficits são encontrados no Oceano Pacífico Norte
 - Baseado nestas estimativas, a idade aproximada das águas profundas seria de 275 anos (Oceano Atlântico), 250 anos (Oceano Índico) e 510 anos (Oceano Pacífico)
 - É importante lembrar que como ocorre mistura, os valores das águas mais antigas e novas podem ser maiores ou menores

Idade, tempo de recirculação e taxa de ventilação



Quantidade de $\Delta^{14}\text{C}$ (/mille) no Oceano Pacífico em 150°W. Do atlas WOCE do Oceano Pacífico. Extraído de Talley et al (2011).

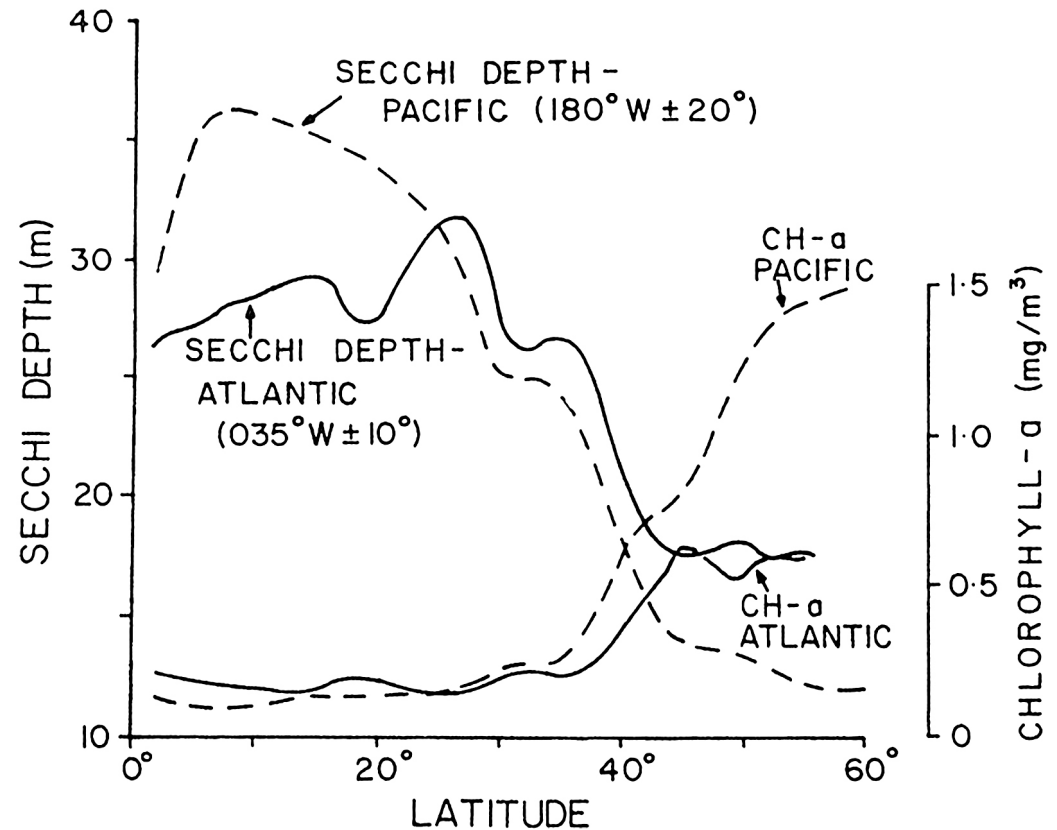


Propriedades óticas da água do mar

- A transparência do oceano depende da quantidade de material suspenso ou vivo que está contido nele
- Se a água é muito transparente, a radiação solar penetra até profundidades maiores, quando comparado com o caso onde existe muito material suspenso
- Sendo assim, as propriedades óticas nas águas superficiais afetam o aquecimento, o que afeta a temperatura superficial e assim a interação oceano-atmosfera

Propriedades óticas da água do mar

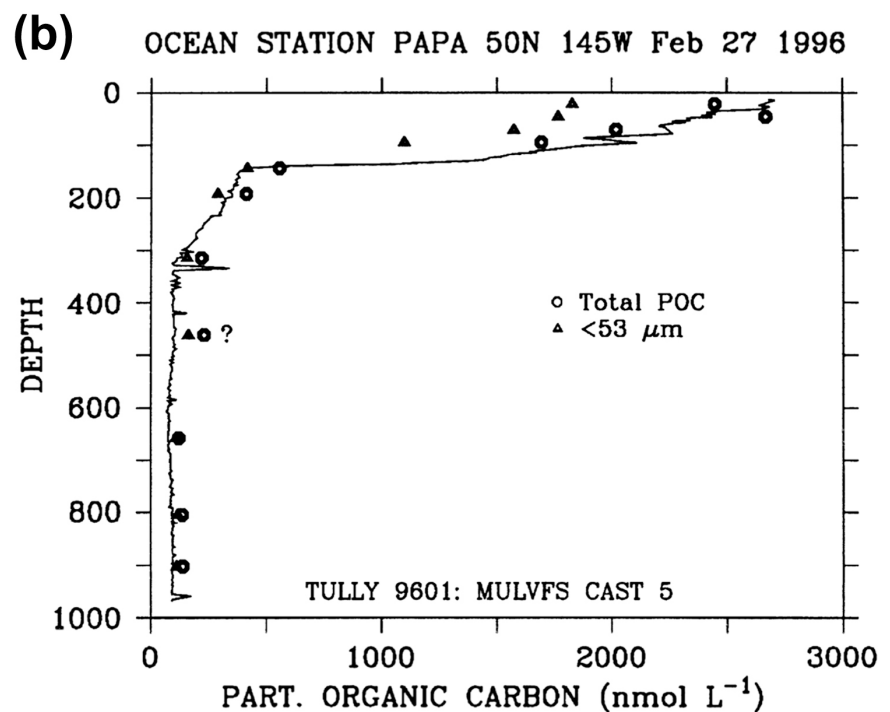
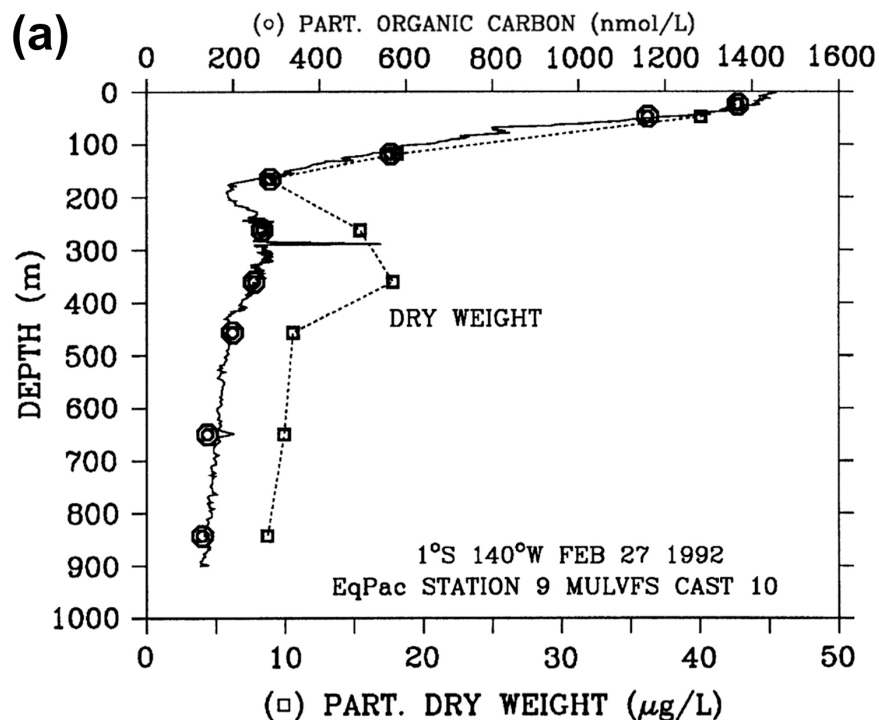
- Antes da invenção dos equipamentos óticos eletrônicos, a transparência era medida através do disco de Secchi
 - As menores profundidades estão associadas a maiores valores de Clorofila-a
 - Para latitudes maiores do que 30° observa-se um forte decréscimo na profundidade do disco de Secchi indicando regiões mais **produtivas**
 - A região do Mar de Sargasso é **pobre**



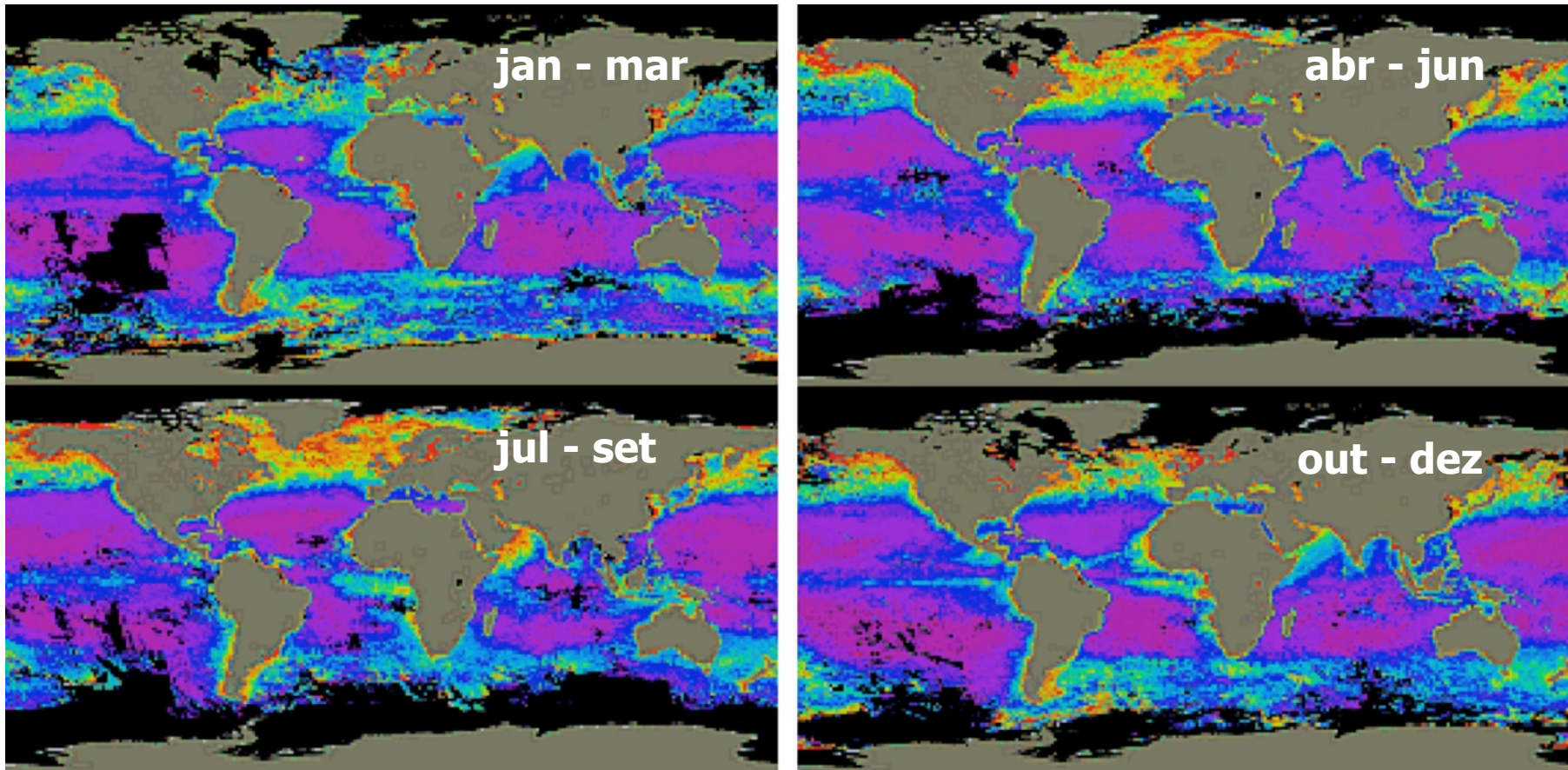
Profundidade média do disco de Secchi em função da latitude nos Oceanos Pacífico e Atlântico. Fonte Lewis et al (1988). Extraído de Talley et al (2011).

Propriedades óticas da água do mar

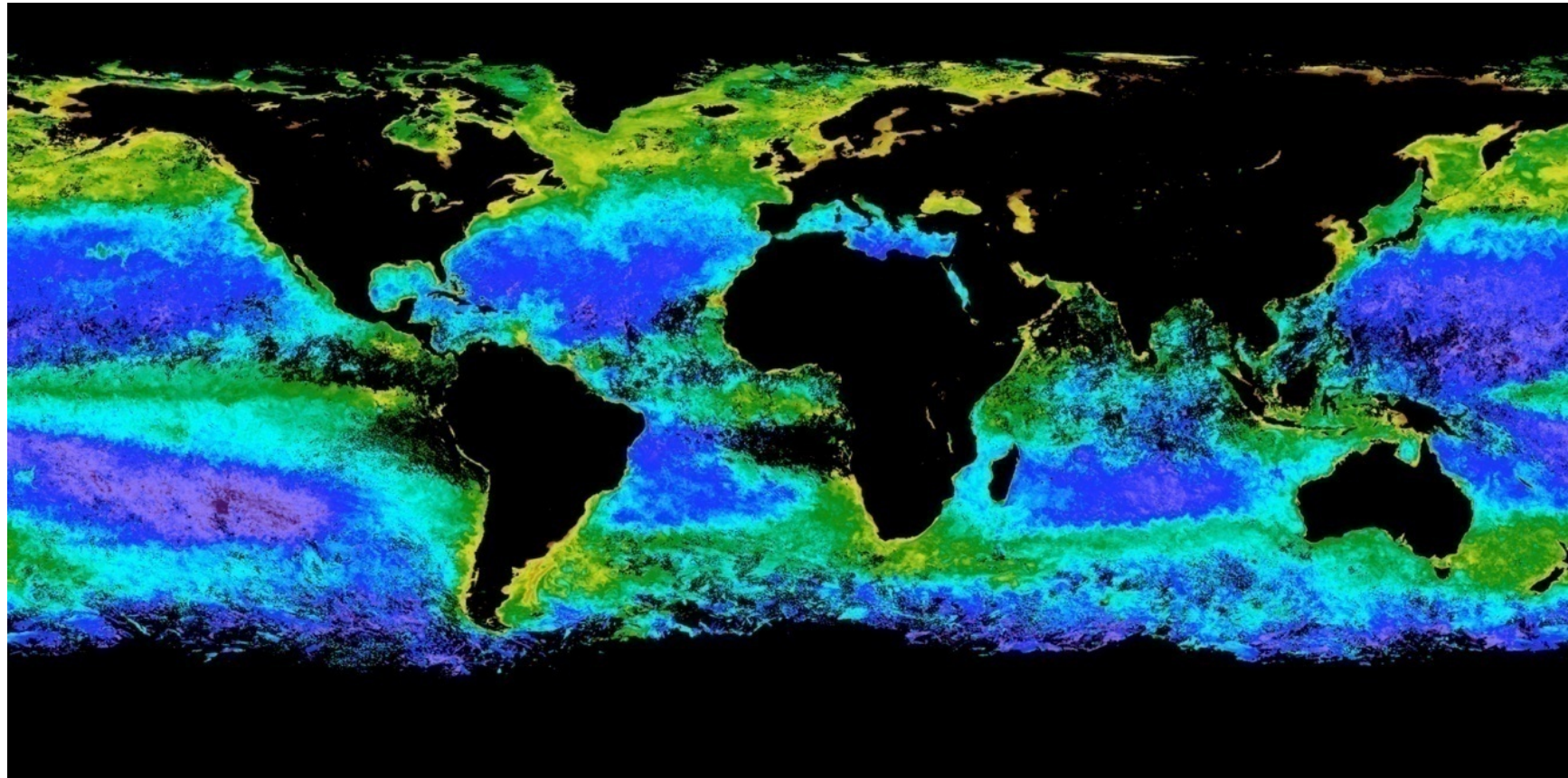
- Atualmente as medições óticas também são capazes de avaliar o espalhamento e absorção por partículas e pela água



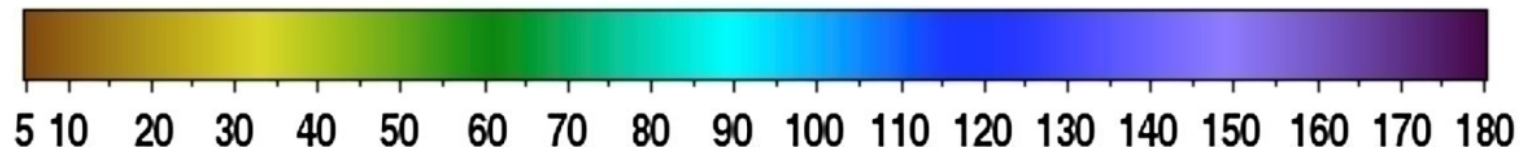
Perfil do coeficiente de atenuação de um feixe em 660 nm para um transmissômetro, convertido em Carbono Orgânico particulado – POC (linha sólida) e medições in situ de POC (círculos) para o Oceano Pacífico nas regiões (a) equatorial e (b) nordeste na estação OWS Papa . Extraído de Talley et al (2011).



Imagens globais de clorofila derivadas do Coastal Zone Color Scanner (CZCS). A variação global da concentração de fitoplâncton muda sazonalmente, como pode ser observado pelos composites climatológicos de 3 meses entre Novembro - 1978 e Junho - 1986, dentro do qual foram coletados dados para o janeiro - março (superior esquerdo), abril - junho (superior direito), julho - setembro (inferior esquerdo) e Outubro - dezembro (inferior direito). Aspectos importantes a serem observados incluem i) o bloom de fitoplâncton no Oceano Atlântico Norte durante a primavera e os aumentos sazonais nas concentrações de fitoplâncton ii) nas regiões equatoriais dos Oceanos Atlântico e Pacífico e iii) na costa oeste da África e do Peru. Fonte NASA (2009a). Extraído de Talley et al (2011).



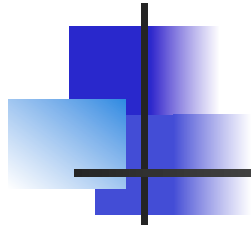
Euphotic Depth (meters)



Profundidade da zona **eufótica** (1% da penetração da luz) com base no satélite Aqua MODIS, com resolução de 9 km e para um composite do mês de setembro de 2007. As áreas em preto representam nuvens que não puderam ser removidas no composite mensal. Extraído de Talley et al (2011).



Animação global de clorofila com base no satélite MODIS Aqua da NASA.
http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MY1DMM_CHLORA



Referências Bibliográficas

Talley et al (2011). *Typical Distributions of Water Characteristics*. In *Descriptive Physical Oceanography: an introduction*, pp. 67-110.

Talley et al (2011). *Typical Distributions of Water Characteristics*. In *Supplementary Materials of Chapter S4*, pp. 1-4.