

Varição sazonal de propriedades hidrográficas ao largo do Parque Estadual Marinho Laje de Santos (SP)

Luiz Bruner de Miranda, Belmiro Mendes de Castro, Lúcio Figueiredo de Rezende e Raquel Leite Mello

Resumo — Características termohalinas sazonais das águas adjacentes ao Parque Estadual Marinho Laje de Santos foram estudadas. No verão, as temperaturas e salinidades variaram nos intervalos $14,5 < T < 24,5^{\circ}\text{C}$ e $34,7 < S < 35,8 \text{‰}$. Delimitadas pela termoclina sazonal, massas de água subjacentes quase-homogêneas ($T \approx 16^{\circ}\text{C}$; $S \approx 35,6 \text{‰}$) indicaram intrusão da Massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS). O resfriamento no inverno e o afastamento da ACAS para maiores profundidades (>50 m), ocasionaram acentuada alteração nas estruturas térmica ($16,8 < T < 20,8^{\circ}\text{C}$) e halina ($33,4 < S < 36,0 \text{‰}$). O Diagrama T-S demonstrou que a ACAS contribuiu predominantemente para a formação da massa de Água Costeira (AC).

Palavras-chave — Estruturas térmica e halina; Intrusão; massas de Água Central do Atlântico Sul e Costeira; Estabilidade vertical.

I. INTRODUÇÃO

Os dados hidrográficos analisados neste trabalho foram amostradas numa densa rede de estações, distribuídas ao largo da Ilha de São Vicente, onde está localizada a cidade de Santos (SP), circundando o Parque Estadual Marinho Laje de Santos (PEMLS) (Fig. 1). Embora esses experimentos tenham sido realizados há cerca de duas décadas (em agosto de 1981 e fevereiro de 1982), seus resultados mostram condições inéditas e detalhadas da variação espacial das estruturas térmica e halina dessa região costeira.

Resultados de pesquisas realizadas com bases de dados anteriores [1]-[2] e posteriores [3]-[4] a esses experimentos, foram resultantes de amostragens em grande e meso-escala, permitindo apenas o reconhecimento de características quase-sinóticas das condições oceanográficas ao largo da região de Santos.

Variações sazonais de temperatura (T), salinidade (S) e densidade das águas em superfície da região sudoeste do Atlântico Sul, foram apresentadas no trabalho pioneiro de G. Böhnecke [5], podendo-se obter informações muito gerais ao largo de Santos. Resultados mais recentes de padrões

climatológicos para condições hidrográficas de superfície e fundo [2], [7] e [8], permitem destacar as seguintes condições: i) $T \approx 27^{\circ}\text{C}$ ($S \approx 33,5 \text{‰}$) e $20 < T < 21^{\circ}\text{C}$ ($S \approx 34,5 \text{‰}$), na superfície; $T < 22^{\circ}\text{C}$ ($S \approx 35,0 \text{‰}$) e $T < 20^{\circ}\text{C}$ ($S \approx 35,0 \text{‰}$), no fundo, para o verão e inverno, respectivamente. ii) advecção do sul de águas frias na superfície ($T < 18^{\circ}\text{C}$) e pouco salinas ($S < 34,0 \text{‰}$), influenciando as características termohalinas regionais no inverno.

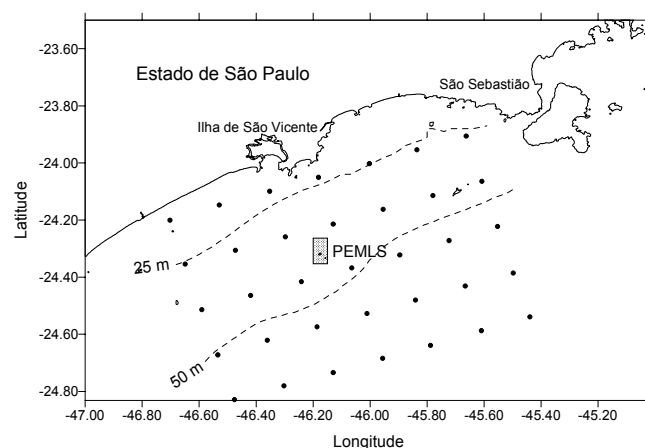


Fig. 1 O Parque Estadual Marinho Laje de Santos (PEMLS) e a localização das estações hidrográficas.

Resultados climatológicos clássicos de A. Schumacher [6], apresentam características gerais da variação sazonal da circulação na superfície ao largo de Santos, tais como: vórtices na região de cisalhamento ciclônico da Corrente do Brasil (CB) nos meses de fevereiro a maio, com intensidades variando de $0,2$ a $0,3 \text{ m s}^{-1}$.

Um dos primeiros resultados das características termohalinas quase-sinóticas ao largo de Santos foram obtidas por pesquisadores do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), em outubro de 1955, a bordo do barco Presidente Vargas da Escola de Pesca da restinga da Marambaia (RJ). Nesse cruzeiro, realizando uma seção longitudinal entre Santos (SP) e a Barra do Araruama (SC), foram obtidos resultados inéditos da distribuição da temperatura e da salinidade na plataforma continental, com amostragens até 125 m de profundidade (Fig. 2). Nessa figura pode-se observar núcleos de baixa salinidade ($S < 33,5 \text{‰}$) ao largo do estuário de Santos, indicando a presença de plumas estuarinas sobre a plataforma continental. Esses núcleos de

¹Luiz Bruner de Miranda, miranda@ceres.io.usp.br, ²Belmiro Mendes de Castro, bmcastro@usp.br, ³Lúcio Figueiredo de Rezende, lucio@uesc.br, ⁴Raquel Leite Mello, raquellm@ceres.io.usp.br. ¹Instituto Oceanográfico da USP, Praça do Oceanográfico, 191; CEP 05508-900 S. Paulo, SP, Tel. +55-11-3091-6598; ²Universidade Estadual de Santa Cruz, Dcet, Rod. Ilhéus – Itabuna, km 16, CEP 45650-000 Ilhéus, BA, Tel. +55-73-680-5270.

Trabalho recebido em 30 de maio de 2003.

baixa salinidade estavam associados a águas com temperatura próxima a 27°C.

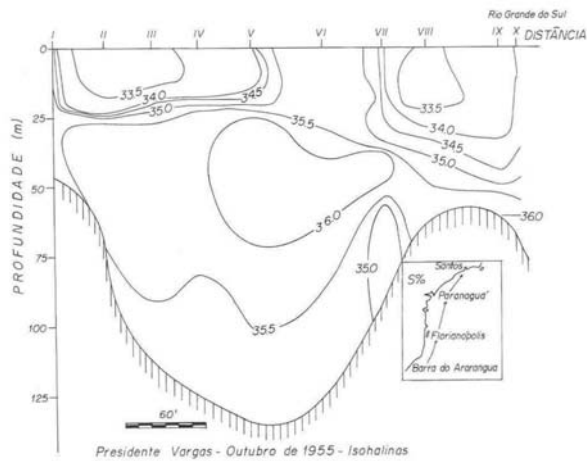


Fig. 2-Plumas estuarinas e frentes salinas ao largo de Santos (SP) e da Barra do Araranguá (SC), observadas em outubro de 1955. Levantamento oceanográfico pioneiro efetuado por equipe do Instituto Oceanográfico da USP, a bordo do barco de pesca Presidente Vargas.

Em 1956, em colaboração com a Diretoria de Hidrografia e Navegação, o Instituto Oceanográfico realizou um levantamento oceanográfico em grande escala da costa sudeste e sul brasileira, com o objetivo de estabelecer características termohalinas, classificar as massas de água e uma primeira abordagem da distribuição espacial de propriedades. Os principais resultados [1], indicaram a presença de águas superficiais de baixa salinidade ($S < 34,5 \text{‰}$) adjacente à baía de Santos e de origem tropical ($S > 36,0 \text{‰}$) ao largo.

No período de 1960 a 1963, pesquisadores do IOUSP realizaram quinzenalmente observações hidrográficas e biológicas em quatro estações fixas, localizadas ao longo de uma seção transversal à plataforma continental ao largo da Baía de Santos. Durante esse período, na estação localizada a 50 m de profundidade, foram feitas medidas de propriedades hidrográficas e simultaneamente coletadas amostras de plâncton com o barco fundeado, durante 24 horas em intervalos de 4 horas, em 12 experimentos em diferentes meses. A análise dos dados de temperatura do experimento de março de 1962 indicou a presença de ondas internas geradas pela maré, com predomínio da componente semidiurna, mas com as componentes diurnas tendo também contribuição importante [9].

Perfilamentos recentes de corrente, na forma de séries temporais nas proximidades da Laje de Santos, durante o inverno [10], indicaram que: i) a componente de velocidade paralela à costa apresenta oscilações de alta (módulo $< 0,2 \text{ m s}^{-1}$) e baixa frequência (com extremos entre $0,5$ e $-0,7 \text{ m s}^{-1}$) forçadas pela maré e pelo vento e, ii) a componente perpendicular à costa é menos intensa (módulo $< 0,4 \text{ m s}^{-1}$), sendo forçada predominantemente pela maré.

Recentemente, em um experimento quase-sinótico em pequena escala no PEMLS [11], realizado no outono, foi observada a presença da Massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS) nas camadas próximas ao fundo. Nesse trabalho,

foram também apresentados resultados de experimentos numéricos de circulação na superfície e em profundidade, forçada pelo vento, demonstrando a influência topográfica da Laje de Santos sobre a configuração das linhas de corrente e na intensidade do movimento.

II. METODOLOGIA

Todos os dados hidrográficos foram coletados em estações oceanográficas clássicas, distribuídas entre o Arquipélago Alcatrazes e as Ilhas Queimadas (Grande e Pequena) (Fig. 1). As garrafas-de-Nansen utilizadas nesses experimentos, realizados nas épocas sazonais de inverno (agosto de 1981) e verão (fevereiro de 1982), foram lançadas entre a superfície e proximidades do fundo em intervalos de profundidade que permitiram uma amostragem detalhada da coluna de água. A temperatura “*in situ*” foi determinada com termômetros de reversão protegidos, cujas leituras foram corrigidas do erro de índice e da dilatação volumétrica do sistema termométrico. Amostras da água foram coletadas em frascos de 300 ml para medida da razão de condutividade elétrica (R_t) com um salinômetro indutivo Beckman, modelo RS-7C, padronizado periodicamente com água normal. Essa propriedade física foi convertida em salinidade com as equações utilizadas internacionalmente na época [12].

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No verão, as temperaturas e salinidades variaram nos intervalos $14,5 < T < 24,5^\circ\text{C}$ e $34,7 < S < 35,6 \text{‰}$ (Fig. 3). Na superfície, a estrutura térmica apresentou-se bastante estratificada ao redor de um núcleo de baixa temperatura ($T \approx 20,5^\circ\text{C}$), localizado no limite nordeste da região (Fig. 3a), entre as isóbatas de 25 e 50 m. Ao redor do PEMLS observa-se um mínimo secundário ($T \approx 23^\circ\text{C}$). Nas proximidades do fundo (Fig. 3b), a temperatura aumenta em direção à costa de $14,5$ a $21,5^\circ\text{C}$. A intrusão de águas de baixa temperatura ($T < 16,0^\circ\text{C}$), na forma de línguas, orientadas no sentido oeste, é um indicador de trocas de águas da plataforma continental com as oceânicas de origem subtropical. A compressão das isotermas, no entorno da profundidade de 25 m, que intensifica-se para oeste, mostra claramente a presença da Frente Térmica Profunda (FTP). Detalhes dessa frente, porém com menores gradientes horizontais de temperatura por tratar-se de outra época sazonal (primavera de 1988), mas apresentando continuidade com a intrusão de águas que ressurgem na região de Cabo Frio (RJ), podem ser obtidos em [3].

O núcleo de mínima temperatura descrito no parágrafo anterior está associado à salinidades próximas a $35,3 \text{‰}$ (Fig. 3c). Há indícios, pela configuração da estrutura térmica, que o segundo núcleo ($T \approx 23,0^\circ\text{C}$), centrado no PEMLS e também associado a salinidade próxima a $35,3 \text{‰}$, pode ter sido gerado por transporte advectivo de massas de água ressurgidas no núcleo principal. Na estrutura halina na superfície, os maiores gradientes horizontais podem ser observados no entorno do núcleo de baixa salinidade ($S < 34,8 \text{‰}$), adjacente à Baía de Santos, o qual está associado a temperaturas próximas a $24,0^\circ\text{C}$. Esse núcleo identifica a

pluma estuarina advectada para a plataforma continental nos estágios de vazante.

A estrutura térmica nas proximidades do fundo (Fig. 3b) está associada a águas quase isohalinas 35,5-35,6 ‰ (Fig. 3d). Esse fato, mostra conclusivamente um processo bastante eficiente de trocas de massas de água entre o oceano adjacente e a plataforma continental nesta época sazonal.

A massa de água sob a termoclina sazonal ($17 < T < 24^{\circ}\text{C}$), apresenta-se quase-isotérmica ($T \approx 16^{\circ}\text{C}$) e isohalina ($S \approx 35,6$), indicando a intrusão de águas de origem oceânica, cuja classificação será feita com base no Diagrama T-S. Em consequência, a intrusão e o aquecimento sazonal favoreceram a intensificação do gradiente vertical de temperatura e da estabilidade vertical da coluna de água. Sendo assim, o fluxo de sais nutrientes para a zona eufótica, gerado pelos processos advectivo e difusivo, fica atenuado, inibindo a produção biológica nesta época do ano.

No inverno, as temperaturas na superfície apresentaram pequena variação espacial ($19,6 < T < 20,8^{\circ}\text{C}$) (Fig. 4a), sendo o resfriamento sazonal responsável por um decréscimo entre 3 e 4 °C. A isoterma de $20,0^{\circ}\text{C}$ cruza o PEMLS e o mínimo de temperatura pode ser observado no extremo oeste da

região. Nas proximidades do fundo, entre a costa e a isóbata de 50 m, predominam águas com temperatura variando entre $19,0$ e $19,4^{\circ}\text{C}$ (Fig. 4b), indicando fraca estratificação vertical e, em consequência, a intensificação da mistura vertical. A localização do mínimo de temperatura ($16,8^{\circ}\text{C}$) é praticamente coincidente com a do verão, mas com temperaturas mais elevadas ($> 2,3^{\circ}\text{C}$). O afastamento da costa das águas mais frias para profundidades maiores do que 50 m, forçada pelos efeitos dinâmicos dos ventos predominantes de SW, que atuam na plataforma continental SE nesta época do ano, são consistentes com os resultados anteriores [4]-[14].

A estrutura halina na superfície (Fig. 4c) no inverno apresentou, tal como no verão, o mínimo ($33,6$ ‰) ao largo da Baía de Santos. O máximo ($35,2$ ‰), cuja configuração sugere a forma de um núcleo, ocorreu ao largo em profundidades superiores a 50 m. Nas proximidades do fundo (Fig. 4d) a estrutura halina apresenta-se bastante estratificada ($34,4 < S < 36,0$ ‰), contrastando com os valores quase homogêneos observados no verão (Fig. 3d).

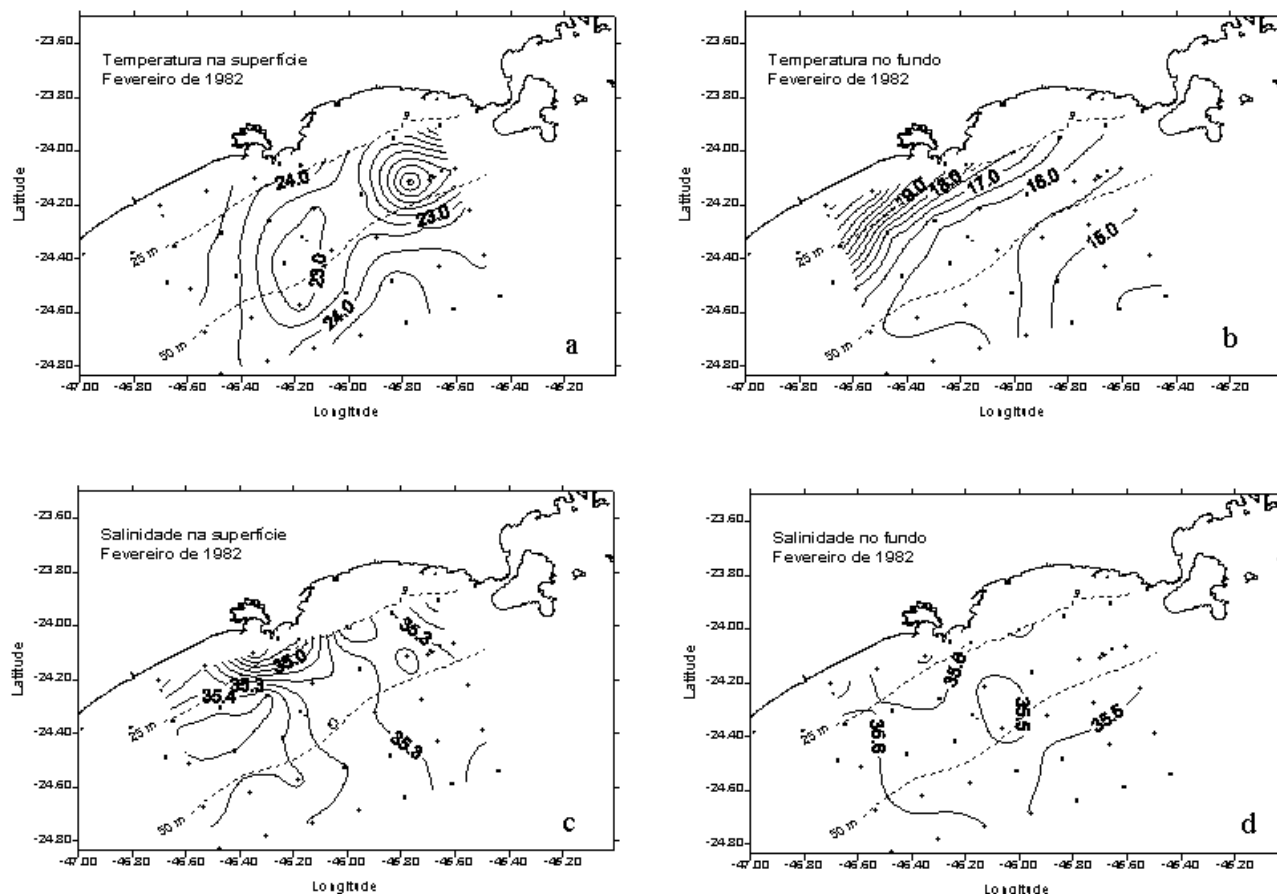


Fig. 3 Distribuição horizontal da temperatura e salinidade na superfície e no fundo no período de fevereiro de 1982.

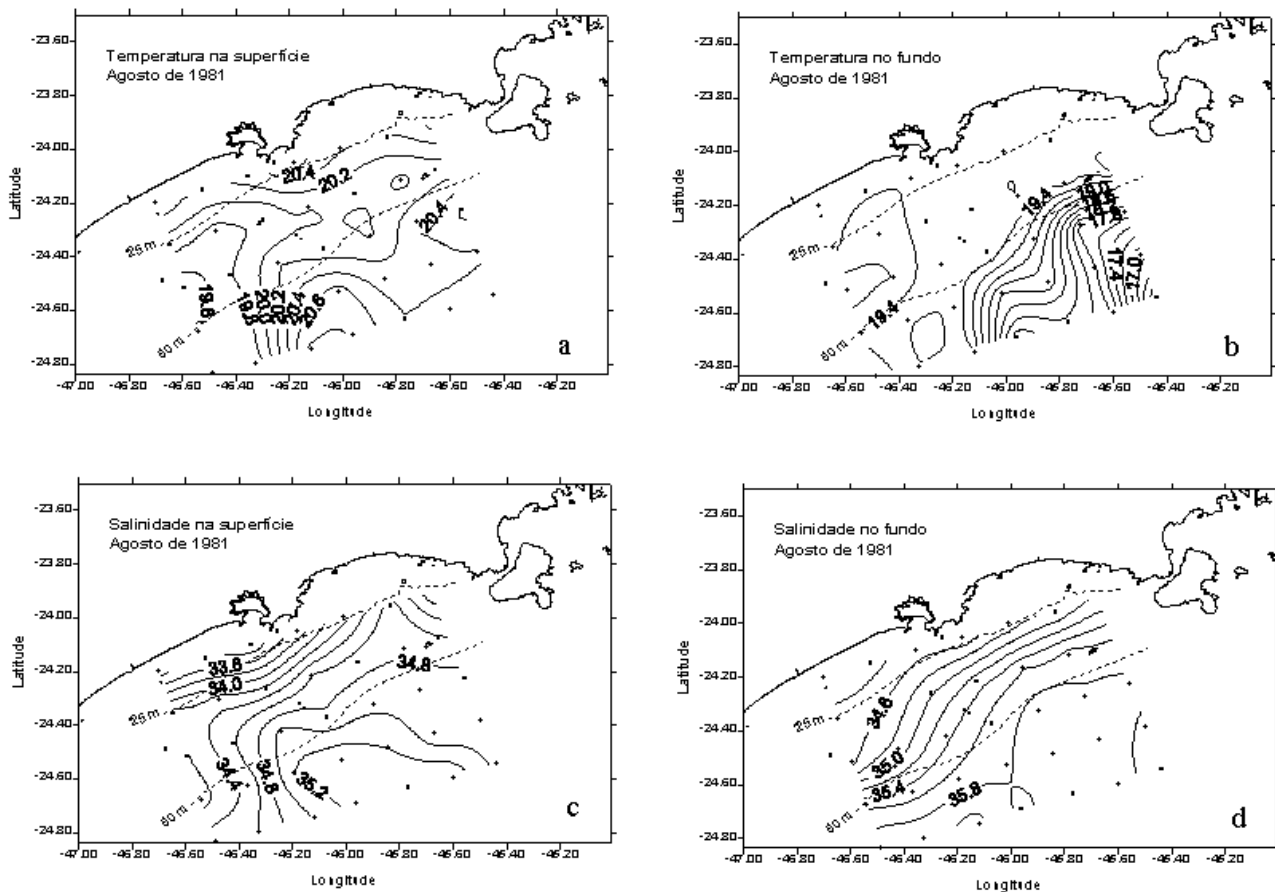


Fig.4-Distribuição horizontal da temperatura e salinidade na superfície e no fundo no período de agosto de 1981.

As características termohalinas dos pares (S,T), locados no Diagrama T-S *espalhado*, observadas nos experimentos quase-sinóticos de inverno e verão (Fig. 5), apresentam características bastante distintas: ($15 < T < 26^{\circ}\text{C}$; $34,5 < S < 36,0$ ‰) e ($18 < T < 22^{\circ}\text{C}$; $33,0 < S < 36,2$ ‰), respectivamente. A convergência das curvas T-S, para as características termohalinas da Massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS), indicada pelas envoltórias do espalhamento da camada superior [15]-[16], mostram claramente a maior influência dessa massa de água sobre as águas da plataforma continental no experimento de fevereiro, que podemos assumir como representativo de características de verão.

Nesse diagrama (Fig. 5) observa-se que, no verão, as massas de água menos densas ($\sigma_t < 25,0$, em unidades de Sigma-t) têm características termohalinas cujos pares (S,T) apresentam espalhamento orientado quase ortogonalmente às isopicnais. Tal fato indica grande estabilidade e, em consequência, acentuada dissipação de energia é necessária para ocorrência de mistura vertical não isopical. Por sua vez, as características termohalinas das massas de água com densidade maior do que 25,0 mostram menor estabilidade vertical, e as imagens dos pares (S,T) convergem para as envoltórias da camada superior da ACAS.

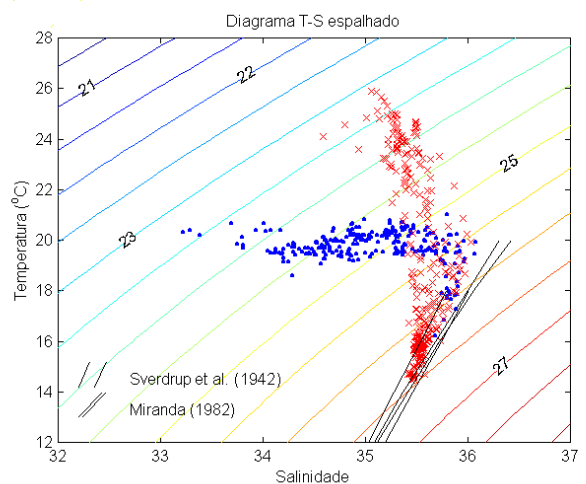


Fig.5-Diagrama T-S espalhado das estações hidrográficas ao largo de Santos em agosto de 1981 (•) e fevereiro de 1982 (×) [17]. As envoltórias contínuas [15]-[16] delimitam a camada superior da ACAS para o Atlântico Sul e entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP).

No inverno, as águas apresentaram menores salinidades do que no verão, mas o resfriamento sazonal compensou o decréscimo da densidade; de fato, tanto no inverno quanto no verão, as menores densidades apresentam valores próximos a

23,0. O espalhamento das imagens dos pares (S,T), cruzando obliquamente as isopícnais (Fig. 5), indica que a estrutura termohalina apresentou, em relação ao verão, menor estabilidade vertical da coluna de água. Sendo assim, processos de mistura vertical podem ser gerados com menor dissipação de energia do que no verão.

Em ambos os experimentos, o sinal da ACAS é evidenciado pela convergência do espalhamento dos pares (S,T) para as condições termohalinas próximas a 15°C, 35,4 ‰ e $\sigma_t=26,5$ (em unidades de Sigma-t), que são valores característicos da camada superior da ACAS na região Sudeste Brasileira [16].

IV. CONCLUSÕES

Em geral, as águas rasas da plataforma continental que circundam o PEMLS, respondem rapidamente às influências climáticas e do vento, da descarga fluvial e aos meandros de vórtices formados na região de cisalhamento ciclônico da Corrente do Brasil. No verão, as temperaturas e salinidades variaram nos intervalos 14,5—24,5°C e 34,7—35,8 ‰, e ocorreu um núcleo de baixa temperatura (20,5°C) na superfície. A formação da Frente Térmica Profunda (FTP), característica desta época sazonal, interceptou o fundo em profundidades próximas a 25 m. Sob a termoclina sazonal observou-se massas de água quase-isotérmicas ($T \approx 16^\circ\text{C}$) e isohalinas ($S \approx 35,6 \text{ ‰}$), indicando intrusão da massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS).

O resfriamento sazonal no inverno, o afastamento da ACAS para profundidades maiores do que 50 m e a intensificação da mistura vertical, ocasionaram acentuada alteração nas estruturas térmica e halina. Em consequência, a termoclina apresentou fraco gradiente vertical. Por sua vez a FTP, com menores gradientes horizontais de temperatura do que no verão e configuração de isotermas mais complexa migrou para leste, ocorrendo nesta época sazonal a maiores distâncias da costa.

A análise dos Diagramas T-S *espalhado* indicou que a ACAS contribuiu predominantemente para a formação da massa de Água Costeira (AC), formando-se através de mistura não isopícnal. Embora a mistura vertical seja reduzida no verão, principalmente pela estratificação térmica, movimentos verticais sugeridos pela presença de núcleo de baixa temperatura na superfície, podem favorecer localmente o transporte para a zona eufótica da concentração de propriedades biologicamente importantes. O reconhecimento de características oceanográficas em parques marinhos representa uma contribuição importante para o manejo ambiental e a conservação dessas áreas naturais protegidas.

REFERÊNCIAS

- [1] Emilsson, I. 1961. The shelf and coastal waters off southern Brazil. Bol. Inst. Oceanogr., São Paulo, 11(2), 101-112.
- [2] Matsuura, Y. 1986. Contribuição ao estudo da estrutura oceanográfica da região sudeste entre Cabo Frio (RJ) e Cabo de Santa Marta Grande (SC). Ciênc. & Cultura, S Paulo, 38(8):1439-1450.
- [3] Miranda, L. B. & M. Katsuragawa, 1991. Estrutura Térmica na Região Sudeste do Brasil (outubro/novembro de 1998). Publção esp. Inst. Oceanogr., S Paulo, (8):1-14.
- [4] Campos, E. J. D.; J. A. Lorenzetti, M. R. Stevenson, J. L. Stech. & R. B. Souza, 1996. Penetration of Waters from the Brazil-Malvinas Confluence Region Along the South American Continental Shelf up to 23°S. An. Acad. Bras. Ci., nº 68(supl. 1):49-58.
- [5] Böhncke, G. 1936. Temperatur, Salzgerhalt und Dichte an der Oberfläche des Atlantischen Ozean, Wiss. Ergbn dt. Atlant. Exped. "METEOR", 5(1):1-186. Translated from German by the National Science Foundation in 1991.
- [6] Schumacher, A. 1943. Monatskartender Oberflächenstromungen in Aquatorialen und Sudlichen Ozean. Annln Hydrogr. Berl., 2(4-6):209-2219.
- [7] Bakun, A. & R. H. Parrish, 1990. Comparative studies of coastal pelagic fish reproductive habitats: the Brazilian sardine (*Sardinella aurita*). J. Cons. Int. perm. Explor. Mer, 46:269-283.
- [8] Castro, B. M. & L. B. Miranda, 1998. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf Located Between 4°N and 34°S - Coastal Segment (4,W). In: Allan R. Robinson and Kenneth H. Brink, *The Sea*. John Wiley & Sons, Inc., New York, v.11, pp. 209-251.
- [9] Johannessen, O. M. 1967. Note on the diurnal temperature observations off the coast of Santos, Brazil. Contrções Inst. Oceanogr; Univ. S Paulo. Sér. Ocean. Fis. (9):1-7.
- [10] Harari, J.; L. B. Miranda & M. A. Corrêa, 2001. ADCP Observations off São Paulo State Coastal Area (Brazil. 24°S). Afro-America Gloss News, S Paulo. 5(1):1-7.
- [11] Silva, L. dos S. 2001. Estrutura Termohalina e Análise de Massas de Água no Parque Estadual Marinho da Laje de Santos-SP. Revista da Universidade Monte Serrat, Santos, 2(2):116-129.
- [12] UNESCO, 1966. Second Report on the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards. Unesco Technical Papers in Marine Science, 4, 9p
- [13] Castro, B. M. 1996. Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo. Tese de Livre-docência. Instituto Oceanográfico da USP, São Paulo, 248 p.
- [14] Castro, B. M., L. B. Miranda & S. Y. Miyao, 1987. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em mesoescala. Bolm. Inst. oceanogr., 35(2): 135-151.
- [15] Sverdrup, H. U.; M. W. Johnson & R. H. Fleming, 1942. The Ocean: Their physics, Chemistry, and General Biology. Prentice-Hall, Inc., N.Y., 1087 p.
- [16] Miranda, L. B. 1985. Forma da correlação T-S de massas de água das regiões costeiras e oceânicas entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), Brasil. Bolm. Inst. oceanogr., S. Paulo, 33(2):105-119.
- [17] Mello, R. L. 2003 Características hidrográficas e da circulação da Enseada de Santo Amaro (SP). Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 107 p.