



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

KERLEM LUINA VINHAS CARVALHO

**CORRENTES E MASSAS DE ÁGUA NO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO  
MARCOS E PLATAFORMA CONTINENTAL ADJACENTE**

São Luís - MA

2023

PPGOceano

KERLEM LUINA VINHAS CARVALHO

**CORRENTES E MASSAS DE ÁGUA NO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO  
MARCOS E PLATAFORMA CONTINENTAL ADJACENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Oceanografia, área de Oceanografia Física.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias

Linha de pesquisa: Dinâmica dos Sistemas Costeiros e Oceânicos

**São Luís - MA**

**2023**

**PPGOceano**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Carvalho, Kerlem Luina Vinhas.

Correntes e Massas de água no Complexo Estuarino de São Marcos e Plataforma Continental adjacente / Kerlem Luina Vinhas Carvalho. - 2023.

83 p.

Orientador(a): Francisco José da Silva Dias.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Oceanografia/ccbs, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

1. Balanço de sal. 2. Circulação. 3. Macromaré. 4. Abordagem Euleriana. I. Dias, Francisco José da Silva. II. Título.

KERLEM LUINA VINHAS CARVALHO

**CORRENTES E MASSAS DE ÁGUA NO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO  
MARCOS E PLATAFORMA CONTINENTAL ADJACENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Oceanografia, área de Oceanografia Física.

**Julgada em:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

**Orientador**

---

Prof. Dr. Audálio Rebelo Torres Junior  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

---

Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

**Membro Externo**

**São Luís - MA**

**2023**

**PPGOceano**

*A minha vó, Luzia Chaves,  
meu suporte de fé.  
Dedico!*

**PPGOceano**

## AGRADECIMENTOS

*Sou grata por Deus em ter me dado saúde para concluir mais uma etapa acadêmica.*

*Aos meus pais Valdson e Clenilde, e toda minha família por ser meu suporte, não importando o quão longe eu for. A minha vó Luzia por ser a minha maior incentivadora na vida.*

*Ao Paulo Lopes pelo companheirismo, amor e suporte nos dias não tão leves.*

*As minhas amigas de vida, Tatielly e Maynara pela amizade que ultrapassa o tempo.*

*Aos meus amigos de vida que conheci na UFMA, Isabel, Taiza, José Elias, Michelly, Priscila, tê-los na vida compartilhando momentos tem tornado essa trajetória melhor.*

*A minha amiga Poliana pelo trabalho na causa animal e por sua amizade que me traz bondade.*

*Ao meu amigo da causa ambiental, Denison Ferreira, sempre como inspiração no ativismo.*

*Agora neste espaço, quero acrescentar um cenário desafiador e que com toda certeza, sem ajuda eu não conseguiria. Ser cientista em um cenário pandêmico, acredito que tenha sido meu maior desafio, embora tenha sido um momento em que a vida de certa forma ficou mais fragilizada, recebi apoio e por isso, agradeço:*

*Ao meu orientador Prof. Francisco Dias, pela orientação e direção ao longo deste trabalho, certamente chegar ao final foi bem demorado, mas o ensinamento continuado desde à graduação permeará mesmo após a conclusão desta pesquisa.*

*Ao Prof. Audalio por suas contribuições precisas para o desenvolvimento deste trabalho.*

*A todos do Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (LHiCEAI), em especial aos meus amigos: Hugo Lima pela enorme ajuda na análise dos dados e pela imediata disposição; ao Vinicius Maciel pelas contribuições valiosas e ajuda nos dados; ao Jefferson Horley pelas boas risadas dentro e fora da academia e ao Rômulo Soares pela grande ajuda em várias etapas deste trabalho.*

*A minha amiga Kassandra Borges, sabemos que o caminho até aqui foi exaustivo, mas jamais soltamos a mão uma da outra e sou grata por nossa amizade.*

*A FAPEMA pela concessão da Bolsa de Mestrado ajudando na minha permanência durante a pandemia e ao Programa de Pós Graduação em Oceanografia, em especial a Coordenação pela Profa. Marianna Basso e Prof. Ricardo Luvizotto.*

*A Universidade Federal do Maranhão (UFMA) pela estrutura e ao corpo docente.*

*E as demais pessoas que ajudaram e que não estão listadas aqui, mas sigo meramente grata, Muito Obrigada!!*

## LISTA DE SIGLAS, SIMBOLOS E ABREVIATURAS

AC	Água Costeira.
ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler.</i>
AF	Água de Frente.
AR	Água de Rio.
BM	Baixa-mar.
BSM	Baía de São Marcos.
CEASJ	Complexo Estuarino Arraial/São José.
CESM	Complexo Estuarino de São Marcos.
CTD	<i>Conductive-Temperature-Deph.</i>
ENSO	<i>El Niño – Southern Oscillation</i>
FAPEMA	Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão.
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia.
LHiCEAI	Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores.
MEL	Modelagem Equatorial Litorânea.
NE	Nordeste.
NUGEO	Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão.
PCM	Plataforma Continental do Maranhão.
$Ri_L$	Número de Richardson por camada.
S	Salinidade.
SE	Sudeste.
SW	Sudoeste.
T	Temperatura.
TEOS-10	<i>Termodinamic Equation of Seawater.</i>
UFMA	Universidade Federal do Maranhão.
ZC	Zona Costeira.
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical.
ZM	Zona de Mistura.
ZR	Zona de Maré do Rio.
$\varphi$	phi.
$\sigma_t$	Sigma-t.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo localizado no Complexo Estuarino de São Marcos (CESM) e a Plataforma Continental do Maranhão (PCM) .....	20
Figura 2. Série histórica de precipitações médias mensais para a região de São Luís, entre os anos de 1979 a 2021. Fonte: INMET (2022) .....	21
Figura 3. ADCP acoplado à prancha, rebocado na popa da embarcação. Fonte: Autora (2020) .....	23
Figura 4. CTD (EXO2/YSI), com grade de proteção .....	24
Figura 5. Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio EST-01 durante a maré sizígia no período seco .....	33
Figura 6. Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio EST-02 durante a maré sizígia no período seco .....	34
Figura 7. Perfis médios da componente longitudinal da velocidade para EST-01 (A) e EST-02 (B) durante a maré sizígia no período seco. O $\langle u(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade e $u_a$ (linha tracejada) é a velocidade residual .....	35
Figura 8. Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio PC-01 durante a maré sizígia no período seco .....	37
Figura 9. Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio PC-02 durante a maré sizígia no período seco .....	38
Figura 10. Perfis médios da componente longitudinal da velocidade para PC-01 (A) e PC-02 (B) durante a maré sizígia no período seco. O $\langle u(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade e $u_a$ (linha tracejada) é a velocidade residual .....	39
Figura 11. Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio EST-01 durante a maré sizígia no período seco .....	40
Figura 12. Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio EST-02 durante a maré sizígia no período seco .....	41
Figura 13. Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio PC-01 estuário interno durante a maré sizígia no período .....	42
Figura 14. Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para a PC Externa interno durante a maré sizígia no período seco .....	43
Figura 15. Variação temporal do número de Richardson por camada para os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) referentes ao período seco .....	44
Figura 16. Variação temporal do número de Richardson por camada para os fundeios PC-01 (A) e PC-02 (B) referentes ao período seco .....	45
Figura 17. Diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966), com isolinhas do parâmetro $v$ para os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) durante período seco .....	46

Figura 18. Diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966), com isolinhas do parâmetro $v$ para os fundeios PC-01 (A) e PC-02 (B) durante período seco .....	47
Figura 19. Componente do transporte advectivo de sal, associado às seguintes forçantes: Descarga fluvial (1); Deriva de Stokes (2); Correntes de maré (3); Circulação gravitacional (4); Difusão turbulenta (5); Dispersão da maré (6); e Circulação residual (7). A soma dessas parcelas está indicada em (8) e o transporte total de sal integrado diretamente ao longo do ciclo de maré em (9). Os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) referentes ao período seco .....	49
Figura 20. Componente do transporte advectivo de sal, associado às seguintes forçantes: Descarga fluvial (1); Deriva de Stokes (2); Correntes de maré (3); Circulação gravitacional (4); Difusão turbulenta (5); Dispersão da maré (6); e Circulação residual (7). A soma dessas parcelas está indicada em (8) e o transporte total de sal integrado diretamente ao longo do ciclo de maré em (9). Os fundeios PC-01 (A) e PC-02 (B) referentes ao período seco .....	50
Figura 21. Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio EST-01 durante a maré sizígia no período de chuva .....	52
Figura 22. Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio EST-02 durante a maré sizígia no período de chuva .....	53
Figura 23. Perfis médios da componente longitudinal da velocidade para EST-01 (A) e EST-02 (B) durante a maré sizígia no período de chuva. O $\langle u(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade e $u_a$ (linha tracejada) é a velocidade residual .....	54
Figura 24. Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio PC-01 durante a maré sizígia no período de chuva .....	56
Figura 25. Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio PC-02 durante a maré sizígia no período de chuva .....	57
Figura 26. Perfis médios da componente longitudinal da velocidade para PC-01 (A) e PC-02 (B) durante a maré sizígia no período seco. O $\langle u(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade e $u_a$ (linha tracejada) é a velocidade residual .....	58
Figura 27. Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio EST-01 durante a maré sizígia no período de chuva .....	59
Figura 28. Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio EST-02 durante a maré sizígia no período de chuva .....	60
Figura 29. Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio PC-01 durante a maré sizígia no período de chuva .....	61

Figura 30. Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio PC-01 durante a maré sizígia no período de chuva .....	62
Figura 31. Variação temporal do número de Richardson por camada para os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) referentes ao período de chuva .....	63
Figura 32. Variação temporal do número de Richardson por camada para os fundeios PC-01 (A) e PC-02 (B) referentes ao período de chuva .....	64
Figura 33. Diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966), com isolinhas do parâmetro $v$ para os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) durante período de chuva .....	65
Figura 34. Diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966), com isolinhas do parâmetro $v$ para os fundeios PC-01 (A) e PC-02 (B) durante período de chuva .....	66
Figura 35. Componente do transporte advectivo de sal, associado às seguintes forças: Descarga fluvial (1); Deriva de Stokes (2); Correntes de maré (3); Circulação gravitacional (4); Difusão turbulenta (5); Dispersão da maré (6); e Circulação residual (7). A soma dessas parcelas está indicada em (8) e o transporte total de sal integrado diretamente ao longo do ciclo de maré em (9). Os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) referentes ao período de chuva .....	68
Figura 36. Componente do transporte advectivo de sal, associado às seguintes forças: Descarga fluvial (1); Deriva de Stokes (2); Correntes de maré (3); Circulação gravitacional (4); Difusão turbulenta (5); Dispersão da maré (6); e Circulação residual (7). A soma dessas parcelas está indicada em (8) e o transporte total de sal integrado diretamente ao longo do ciclo de maré em (9). Os fundeios PC-01 (A) e PCT-02 (B) referentes ao período de chuva .....	69
Figura 37. Diagrama TS espalhado referente aos quatro fundeios no período seco (A) e período chuvoso (B), para o EST-01 (o vermelha); EST-02 (o azul); PC-01 (□ vermelho) e PC-02 (o azul) .....	71
Figura 38. Diagrama conceitual dos cenários apresentados para a distribuição longitudinal da salinidade nos fundeios estuarinos e da Plataforma Continental. O período de seca em (A) e a chuva em (B). ZC – Zona Costeira; ZM – zona de mistura; AE – Água Estuarina; AF – Água de Frente .....	77

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Data e horários de coleta dos dados nos fundeios, no período seco de 2020 e chuvoso de 2021 .....	09
<b>Tabela 2.</b> Distribuição dos dados calculados correspondentes aos fundeios, onde: V: Velocidade total; u: componente longitudinal da velocidade; v: componente transversal da velocidade; S: salinidade e T: temperatura; Min: valores mínimos; Máx: valores máximos, MED: valores médios .....	18

## RESUMO

Este trabalho objetivou caracterizar a variação temporal da circulação e massas d'água no Complexo Estuarino de São Marcos (CESM) e Plataforma Continental (PC) adjacente, em períodos pluviométricos diferentes. As aquisições de dados ao longo dos fundeios foram feitas durante a estação seca de 2020 e chuvosa do ano de 2021, em condições de maré de sizígia. A medição do campo de correntes fora obtida com um ADCP (Sontek/YSI) com sensor acústico de frequência de 500 MHz e as variáveis de estado e campo de massa foram adquiridos utilizando um CTD (EXO2/YSI) como unidade autônoma. Os resultados obtidos da circulação mostraram que as regiões apresentaram escoamento bidirecional e com domínio de correntes de vazante, intensas correntes de até  $2 \text{ m s}^{-1}$  nos fundeios estuarinos atribuído ao afunilamento no CESM e a redução nas velocidades da PC atribuída a largura da mesma. As temperaturas variaram entre 27,5 a 30,7 °C e salinidades variaram entre 18,3 a 36,6  $\text{g kg}^{-1}$ . A análise dos índices termohalinos sugerem a presença de três massas de água, durante a seca uma Água Estuarina (AE) e Água Costeira (AC) e durante a chuva uma Água de Frente (AF) além de AE e AC. Para o transporte de sal, os fundeios estuarinos apresentaram-se como regiões exportadoras de sal, enquanto os fundeios da PC apresentaram-se como importadoras de sal. O número de Richardson por camada indicou comportamentos de moderada a alta estabilidade na coluna d'água associadas possivelmente às correntes de maré, e por meio do diagrama de estratificação-circulação as regiões foram caracterizadas como do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado) e 2a (parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical). O estudo considerou que a amostragem realizada representa mais um passo no entendimento de sistemas estuarinos e as mudanças ocorridas na bacia de drenagem.

**Palavras-chave:** Balanço de sal. Circulação. Macromaré. Abordagem Euleriana.

## ABSTRACT

This study aimed to characterize the temporal variation of circulation and water masses in the São Marcos Estuarine Complex (SMEC) and adjacent Continental Shelf (PC), in different rainfall periods. Data were acquired throughout along the anchorages were carried out during the dry season of 2020 and the rainy season of 2021, under spring tide conditions. Current velocity measurement was obtained with the aid of a 500 MHz frequency sensor ADCP (Sontek/YSI) and state variables and mass field was obtained using a CTD (EXO2 / YSI) as a stand-alone unit. The results obtained from the circulation showed that the regions presented bidirectional flow and with dominance of ebb currents, intense currents of up to  $2 \text{ m s}^{-1}$  in the estuarine anchorages attributed to the SMEC funneling and the reduction in the CP velocities attributed to its width. Temperatures ranged from 27.5 to 30.7 °C and salinities ranged from 18.3 to 36.6 g kg<sup>-1</sup>. The analysis of thermohaline indices suggests the presence of three water masses: during the dry season an Estuarine Water (AE) and Coastal Water (AC) and during the rain a Front Water (AF) in addition to AE and AC. For the transport of salt, the estuarine anchorages presented themselves as salt exporting regions, while the CP anchorages presented themselves as salt importers. The Richardson layer number indicated behaviors of moderate to high stability in the water column possibly associated with tidal currents, and through the stratification-circulation diagram the regions were characterized as type 1a (well mixed and weakly stratified) and 2a (partially mixed and with weak vertical stratification). The study considered that the sampling carried out represents another step in the understanding of estuarine systems and the changes that occurred in the drainage basin.

**Keywords:** Salt Balance. Circulation. Macrotime. Eulerian approach.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. QUESTÃO CIENTÍFICA.....	19
3. OBJETIVOS .....	19
3.1 Geral.....	19
3.2 Específicos .....	19
4. ÁREA DE ESTUDO.....	20
4.1 Localização .....	20
4.2 Aspectos Climáticos e Circulação .....	20
5. MATERIAL E MÉTODOS .....	22
5.1 Aquisição dos Dados .....	22
5.2 Caracterização do campo de correntes.....	22
5.3 Estrutura Termohalina .....	24
5.4 Massas d'água.....	26
5.5 Transporte advectivo de sal .....	27
5.6 Número de Richardson por camada.....	29
5.7 Diagrama de Classificação de Hansen & Rattray .....	29
6. RESULTADOS.....	31
6.1. Variação Temporal durante a estação de seca .....	32
6.1.1 Circulação Estuarina.....	32
6.1.2 Circulação da Plataforma Continental.....	36
6.1.3 Estrutura termohalina estuarina.....	40
6.1.4 Estrutura termohalina da Plataforma Continental .....	41
6.2. Estabilidade da coluna d'água na estação de seca .....	43
6.3. Classificação de estuário na estação de seca .....	46
6.4. Transporte de sal na estação de seca.....	48
6.5. Variação Temporal durante a estação de chuva.....	51
6.5.1 Circulação Estuarina.....	51
6.5.2 Circulação da Plataforma Continental.....	55
6.5.3 Estrutura termohalina estuarina.....	59
6.5.4 Estrutura Termohalina da Plataforma Continental .....	60
6.6. Estabilidade da coluna da água na estação de chuva .....	62
6.7. Classificação de estuário na estação de chuva.....	65
6.8. Transporte de sal na estação de chuva .....	67
6.9. Massas d'água.....	70

7. DISCUSSÕES.....	72
8. CONCLUSÃO .....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

## 1. INTRODUÇÃO

Os oceanos cobrem cerca de 70% da superfície da terra e tem um importante papel na definição e controle da circulação atmosférica e conseqüentemente no controle climático do planeta, sendo o principal sistema de suporte de vida, pois age como um condensador natural e de larga escala (Campos, 2020). O gradiente de temperatura é controlado pelas trocas de calor que ocorrem entre a atmosfera e pelo transporte de calor efetuado pelas correntes marítimas (Saraiva, et al. 2022).

A circulação superficial dos oceanos é predominantemente forçada pelos ventos que produzem uma tensão de cisalhamento na superfície, forçando a convergência/divergência dentro da camada de Ekman, provocando o Bombeamento de Ekman que rebaixa ou eleva a pycnoclina, gerando assim os gradientes de pressão que sustentam o fluxo geostrófico (Talley, 2002; Telles, 2019).

Entre os oceanos ocorrem trocas de massas d'água que, por sua vez, são corpos d'água descritos por meio de diagramas T-S, dado a partir da correlação entre os valores de temperatura e salinidade, pois são considerados parâmetros conservativos e com características físico-químicas bem definidas e relacionadas na sua região de formação. A utilização do diagrama T-S, apoiada na estratificação vertical das massas de água foi difundida por Bjorn Helland-Ransen em 1916 (Miranda, 1985; Silva, 2006).

De acordo com Sverdrup *et al.* (1942), uma massa de água é influenciada, principalmente por três fatores: latitude, grau de insolação e os tipos de corrente marinha. As massas de água que ocupam posições distintas da coluna da água foram formadas em diferentes locais e ao afundarem e serem transportadas pelas correntes têm as mesmas propriedades de temperatura e salinidade lentamente alteradas por meio da mistura vertical e lateral (Silveira, 2007; Monteiro, 2019).

Os ambientes como a plataforma continental e a zona costeira, são fortemente influenciadas pelas correntes oceânicas conduzidas pelos ventos de NE e E-NE (Vital *et al.* 2006; Vital *et al.* 2008). Dado que a morfologia de plataformas continentais é o resultado de interações complexas entre processos de longo e curto prazo, como: condições de hidrodinâmica, transporte de sedimento, mudanças relativas no nível do mar, entrada de sedimento, atividades biológicas e configuração geológica (Fontes, 2018).

Por sua vez, a plataforma continental Brasileira se estende por cerca de 8.000 km, englobando diversas zonas climáticas que se expressam, de forma intensificada, na área

continental e na conseqüente aporte diferenciado à plataforma, da carga sólida e líquida do sistema hidrográfico (Muehe, 2005). Além disso, Fontes (2018) destaca que as feições morfológicas das plataformas no nordeste brasileiro são fortemente influenciadas pelas mudanças no nível do mar no Quaternário Superior.

Dentre os ambientes da zona costeira, os estuários são considerados um dos mais importantes, devido à grande produtividade ao longo da interface terra-mar, e são caracterizados, sobretudo, por sua elevada produção biológica, grande riqueza e diversidade de espécies (Pinto-Coelho; Havens, 2016), assim como hidrologicamente dinâmicos, devido as descargas dos rios, pelo efeito da precipitação, pela variação das marés e pela ação do vento (DAY JR *et al.*, 1989).

De acordo com Pritchard (1955), o estuário define-se como: um corpo de água costeiro semifechado, com livre ligação com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental. Levando em consideração não somente a gênese geológica, mas também os processos regionais, tais como fatores climáticos, sedimentação recente e forçantes dinâmicas, a definição de estuário apresentada por Kjerfve (1987) talvez seja a mais aceita atualmente pela comunidade científica, onde segundo o autor definiu-se como: “um ambiente costeiro que apresenta conexão restrita com o oceano adjacente. Tal conexão permanece aberta pelo menos intermitentemente”. Podendo ser subdividido em três zonas distintas: Zona de Maré do Rio (ZR), Zona de Mistura (ZM) e Zona Costeira (ZC).

Esses ambientes fornecem uma série de benefícios ecossistêmicos, como berçário para a vida marinha, proteção costeira, disponibilização de recursos renováveis e não renováveis, onde diversas atividades industriais e turísticas ocorrem (Ferreira; Marques; Seixas, 2017; Silva, 2016), devido a sua localização, estes ambientes apresentam grande contingente populacional e por seus múltiplos usos, encontram-se sob severa pressão ambiental (Nicolodi; Zamboni; Barroso, 2009).

A água do mar que entra no ambiente estuarino é diluída pela água da descarga fluvial por processos de mistura (advecção e difusão turbulenta) gerados por forçantes oceanográficas (marés, ondas, ventos), geomorfológicas e do fluxo fluvial (Medeiros *et al.*, 2014; Miranda *et al.*, 2002). Estudos evidenciam a ocorrência de movimentos gerados por influência baroclínica, que podem transportar concentrações de substâncias e sedimentos em suspensão para o interior do estuário, ou seja, estuário acima. Logo, a intrusão salina é um importante fator a ser observado em ambientes costeiros, visto que a

salinidade é um relevante fator ecológico no ambiente estuarino. Neste contexto, tais parâmetros contribuem para um conhecimento e caracterização da hidrodinâmica local.

A hidrodinâmica estuarina primariamente condiciona a distribuição e o transporte de materiais - matéria orgânica, sedimentos, nutrientes, clorofila, etc. (Ribas, 2004). Assim, o conhecimento da hidrodinâmica e dos fatores envolvidos é fundamental para o entendimento dos diversos processos que ocorrem nesses ambientes (Siegle *et al.*, 2009). Conseqüentemente, o estudo das massas d'águas é uma importante ferramenta para a compreensão da hidrodinâmica dos sistemas estuarinos (Tomczak, 1999). Dado a sua importância frente à aspectos como, a influência exercida nos padrões de circulação e na definição climática, como por exemplo, o fenômeno do El Niño; pela recirculação de nutrientes e produção primária e no transporte de poluentes através dos oceanos (Sperb *et al.*, 1999).

A necessidade do conhecimento da circulação, representa vital importância no que se refere à qualidade ambiental do ambiente, uma vez que alterações no padrão de circulação em corpos de água afetam substancialmente o transporte dos materiais (Scudelari; Figueirêdo; Rosman, 2008).

Um dos métodos utilizados para estudar a cinemática de escoamento geofísicos parcialmente incompressíveis, foi proposto por Euler, o qual considera todas as partículas que passam em um determinado ponto de controle (fixo) em um dado volume no espaço, em um intervalo de tempo. As informações do escoamento são obtidas em função do que acontece no ponto de controle (Miranda; Castro Filho; Kjerfve, 2002).

O Complexo Estuarino de São Marcos (CESM), denominado comumente de Baía de São Marcos (BSM) e objeto deste estudo é o corpo receptor de principais sistemas estuarinos, pois além da bacia hidrográfica do rio Mearim, a região ainda recebe o aporte de outras cinco pequenas bacias: Rio dos Cachorros, Bacanga, Anil, Rio Aurá e Salgado (Lima, 2019). No CESM está localizado no extremo norte do estado do Maranhão e amplamente aberto sobre a plataforma continental maranhense (PCM).

A bacia hidrográfica do rio Mearim possui uma área de 99.058,68 km<sup>2</sup>, do qual corresponde a 29,84% da área total do estado do Maranhão, considerada a maior entre todas as bacias hidrográficas do Estado (NUGEO, 2009). Os principais rios que compõem essa bacia são o Mearim, Pindaré, Grajaú, Corda e Flores.

Cunha (2003) destaca que o rio Mearim configurou uma parte importante da história do Maranhão, visto que o rio proporcionou o estabelecimento de uma importante rota de inserção ao interior do estado, permitindo a expansão da produção agrícola e o

comércio. Diante deste contexto histórico, muitas cidades e povoados se desenvolveram às margens do Rio Mearim, que a partir do seu caudal fluvial, foi capaz de suprir as necessidades hídricas da população, sendo fonte de água para consumo humano, e para manutenção das atividades agrícola, pecuária, piscicultura, carcinicultura, pesca artesanal e industrial, e ainda servindo como hidrovia através da Hidrovia Mearim.

Apesar da bacia do rio Mearim possuir ainda considerável reserva hídrica, ela tem apresentado locais de avançada degradação de suas nascentes, notadamente onde nasce o rio Mearim, na região da Serra Negra (porção geográfica que mais contribui com aporte hídrico da bacia) e nas nascentes dos rios Grajaú, Pindaré, Flores e nas várias micro bacias que se encontram impactadas pela supressão de matas ciliares, requerendo especial atenção de políticas públicas de todas as esferas dos governos e da sociedade em geral (CODEVASF, 2019). Diversos outros fatores contribuem para a alteração do estado natural do rio, tais como projetos de construção de diques, aumento da rizicultura (MENEZES, 2021), piscicultura e carcinicultura (SAGRIMA, 2018).

A manutenção adequada da bacia de drenagem consiste em oferecer condições necessárias para que todas as funções que ela desempenha, e as que dependem dela, sejam efetuadas dentro da normalidade. Essas funções incluem a necessidade da manutenção da mata ciliar para boas condições de precipitação, escoamento, vazões e uma boa gestão de outorga hídrica. Os impactos físicos que a bacia de drenagem do rio Mearim vem sofrendo nos últimos anos e a relação do regime de precipitação com as anomalias do El Niño – Southern Oscillation (ENSO) chamam atenção para a necessidade da determinação de vazões ecológicas e/ou de outorga, que garantam que a capacidade de suporte dos cursos de água não seja excedida, tornando viável a manutenção de fluxos mínimos em períodos de seca prolongada, que se mostram cada vez mais frequentes, como a observada entre 2010 e 2019 (Cunha et al. 2019).

O conhecimento adequado dos processos hidrológicos é essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos em uma bacia de drenagem, principalmente no que refere a dinâmica dos fluxos fluviais e a disponibilidade hídrica. Nisto se insere, a análise do regime de vazões que permita o equacionamento da oferta e volume de água dos cursos d'água, utilizado em tomadas de decisões orientadas a racionalização e preservação deste recurso (MACIEL, 2017).

## **2. QUESTÃO CIENTÍFICA**

A possível diminuição das precipitações, devido à drásticas mudanças no uso e ocupação dos solos da bacia de drenagem e diante à cenários de mudanças climáticas regionais e globais do sistema hidrológico Mearim/Pindaré, tem provocado o avanço de águas marinhas estuário acima.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 Geral**

Caracterizar a variação temporal da circulação e massas d'água no Complexo Estuarino de São Marcos (CESM) e Plataforma Continental (PC) adjacente, em períodos pluviométricos diferentes.

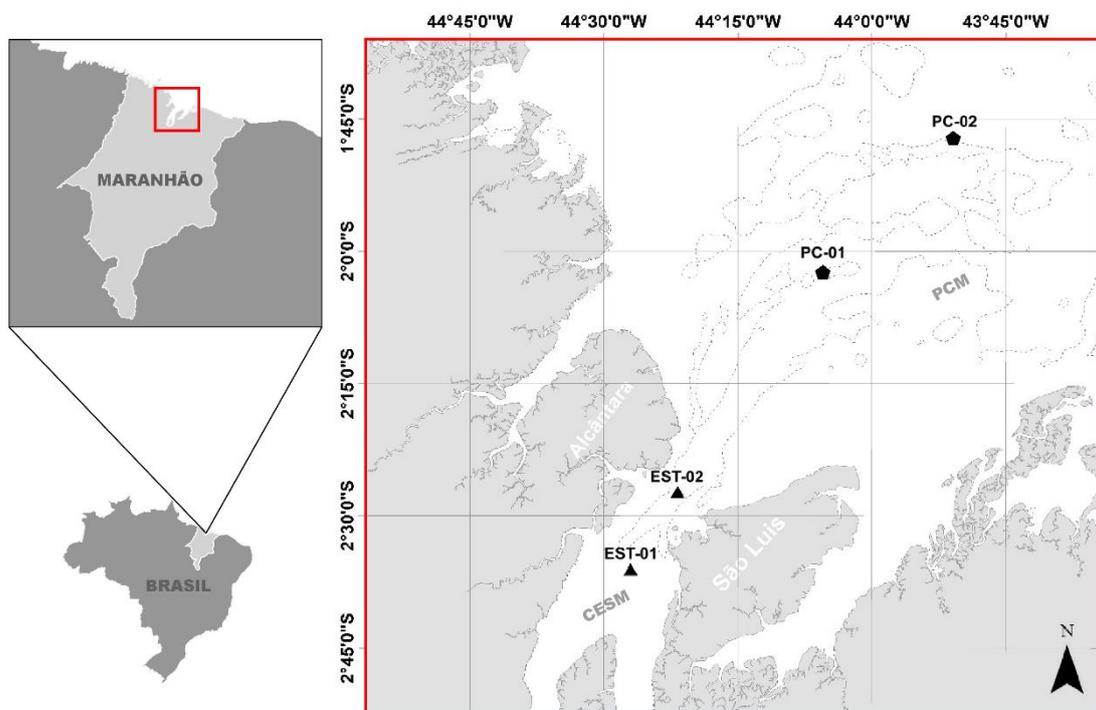
### **3.2 Específicos**

- Caracterizar temporalmente o padrão de circulação;
- Caracterizar a variação sazonal da estrutura termohalina (salinidade, temperatura);
- Estabelecer os índices termohalinos através do uso do diagrama T-S espalhado;
- Calcular o transporte advectivo de sal e a contribuição relativa das parcelas advectivas;
- Calcular o número de Richardson por camada, para determinar a estabilidade vertical do escoamento;
- Classificar o estuário de acordo com o diagrama de estratificação-circulação de Hansen e Rattray (1966).

## 4. ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 Localização

A Plataforma Continental Maranhense (PCM) se localiza na borda oeste do oceano Atlântico equatorial, dentro do domínio da Margem Equatorial Brasileira, entre 2,5°S – 0,5°N de Latitude e 41,0°W – 45,0°W de Longitude (Santos, 2018a). O Complexo Estuarino de São Marcos (CESM), denominado comumente de Baía de São Marcos (BSM) é uma vasta zona estuarina (El-Robrini, 2006) localizado no extremo norte do estado do Maranhão, com orientação principal NE-SW, amplamente aberta sobre a plataforma continental maranhense (Figura 1).



**Figura 1.** Área de estudo localizado no Complexo Estuarino de São Marcos (CESM) e a Plataforma Continental do Maranhão (PCM).

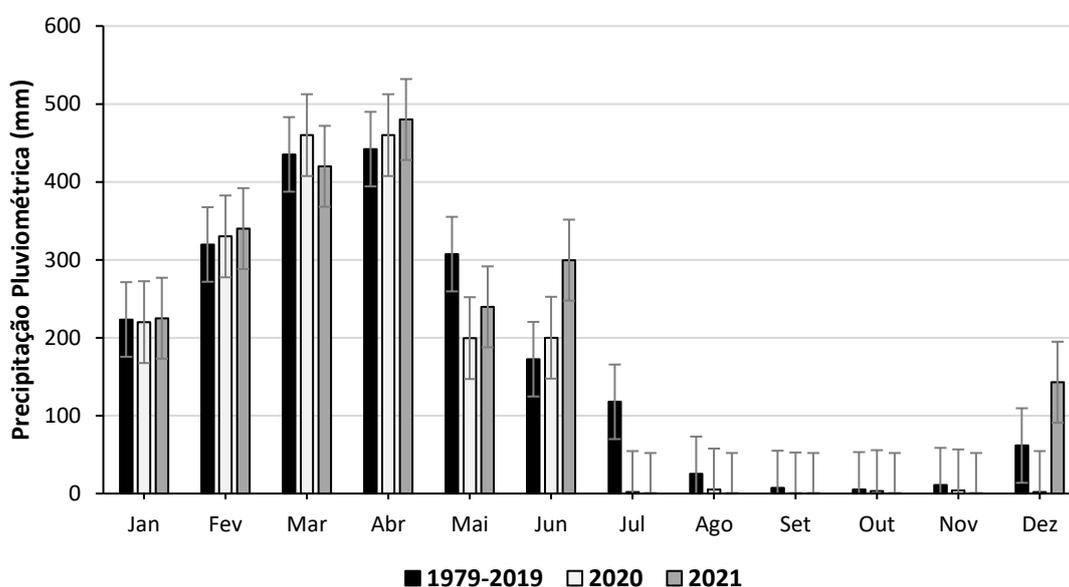
Segundo Moraes (1977), a largura do complexo estuarino varia de 55 km no seu limite norte em direção ao mar a 13 km na sua meia extensão, aumentando para 25 km no seu limite sul ao iniciar-se a Ilha dos Caranguejos, sendo seu comprimento de aproximadamente 64 km.

### 4.2 Aspectos Climáticos e Circulação

O Estado do Maranhão localiza-se em uma região de transição climática, devido a localização de algumas áreas próximas ao Semiárido Nordestino (quente e seco), à

Amazônia (quente e úmida), ao Oceano Atlântico e ao Planalto Central Brasileiro, tornando a existência de significativa variabilidade na precipitação, umidade e temperatura (NUGEO, 2016).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal mecanismo climático de geração de chuvas na Ilha do Maranhão (Pinheiro, 2017). Assim, o período chuvoso ao longo do litoral setentrional do Nordeste ocorre quando a ZCIT está posicionada ao sul da linha do Equador, apresentando ventos de NE, que trazem massa de ar, resultando em elevadas pluviosidades na região, já no período seco, a ZCIT enfraquece, associada aos ventos alísios de SE, resultando em menores pluviosidades neste período (Figueroa; Nobre, 1990; Lima, 2019). Na Figura 2, pode-se observar uma série temporal de 40 anos da pluviosidade na região onde se localiza os fundeios.



**Figura 2.** Série histórica de precipitações médias mensais para a região de São Luís, entre os anos de 1979 a 2021. Fonte: INMET (2022)

A hidrodinâmica na região é controlada pelas variações de maré de regime semidiurna, pois apresenta duas baixa-mares e duas preamares (Feitosa, 1989), com intervalos proporcionais de aproximadamente 6,2 horas e alturas máximas de aproximadamente 7 metros, caracterizando assim, como um estuário de macromaré (Lima, 2019). De acordo com Moraes (1977) o CESM apresenta intensas correntes que atingem velocidades de até  $2 \text{ m.s}^{-1}$ , sendo observadas as maiores intensidades no canal de acesso à região portuária. As correntes na região apresentam assimetria das intensidades entre a maré vazante e enchente, onde geralmente, as correntes se mantêm praticamente

normais à costa, nos sentidos nordeste na vazante e sudoeste na enchente (Morais, 1977; Pereira; Harari, 1995; Samaritano *et al.*, 2013).

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Aquisição dos Dados

As atividades em campo foram desenvolvidas sob regime de maré de sizígia, com duas campanhas em 4 fundeios, para aquisição dos dados de correntes e de parâmetros físico-químicos da água. Estas campanhas foram realizadas em setembro e outubro de 2020 (período seco) e abril e maio de 2021 (período chuvoso) descritas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Data e horários de coleta dos dados nos fundeios, no período seco de 2020 e chuvoso de 2021.

MARÉ	CAMPANHA	ESTAÇÃO	TEMPO DE AQUISIÇÃO (h)	DATA
SIZÍGIA	SECA	Est-01	13	18/09/2020
		Est-02	25	19/09/2020
		PC-01	25	20/09/2020
		PC-02	13	02/10/2020
	CHUVA	Est-01	13	27/04/2021
		Est-02	25	29/04/2021
		PC-01	25	01/05/2021
		PC-02	13	03/05/2021

### 5.2 Caracterização do campo de correntes

Os dados dos campos de corrente foram adquiridos com um *Acoustic Doppler Current Profiler* – ADCP (Sontek/YSI) com frequência de operação de 500 KHz e aquisição de dados (*Burst interval*) a cada 120 segundos, acoplado ao uso do sistema *BottomTracking* que usa como referencial o fundo do canal e possibilitará a aquisição de velocidades na faixa de  $0,001$  a  $10 \text{ m s}^{-1} \pm 1\%$  com precisão de  $0,001 \text{ m s}^{-1}$ . A extensão vertical de cada célula foi de 1 m, com distância de branco de 1,5 m e alcance máximo de 80 m (Figura 3).



**Figura 3.** ADCP acoplado à prancha, rebocado na popa da embarcação. Fonte: Autora (2020).

Para a decomposição de um vetor qualquer ( $\vec{V}$ ), relativo a um referencial cartesiano ortogonal (Oxy), de acordo com o referencial adotado, as componentes  $u$  e  $v$  deste vetor em relação aos eixos Ox e Oy, podem ser expressos pelas equações abaixo:

$$u = |\vec{V}| \cdot \cos\theta \quad (1)$$

$$v = |\vec{V}| \cdot \sen\theta \quad (2)$$

onde ( $\vec{V}$ ) é o módulo do vetor velocidade e  $\theta$  é o ângulo trigonométrico formado entre o vetor e o eixo das abscissas (Ox) medido no sentido anti-horário. Como o ângulo  $\theta$  precisa ser corrigido quanto à origem, foi usada a correção proposta por Miranda et. al. (2002):

$$\theta = 90^\circ - (dd \mp D) \mp \gamma \quad (3)$$

onde  $D$  é a declinação magnética,  $dd$  é o ângulo medido pelo ADCP e  $\gamma$  é o ângulo do eixo longitudinal.

Na plataforma continental (PC-01 e PC-02, o vetor velocidade foi decomposto em componentes longitudinal  $v$  (“*Along Shelf*”) e transversal  $u$  (“*Cross Shelf*”), enquanto no sistema estuarino (EST-01 e EST-02) a decomposição foram feitas em componentes longitudinal  $u$  (“*Along Channel*”) e transversal  $v$  (“*Cross Channel*”).

A decomposição foi efetuada levando-se em conta a declinação magnética local ( $D$ ) fornecida pela carta náutica 411 da DHN, o valor de  $-21^\circ$  em 2017. O ângulo do eixo

longitudinal utilizado em ambas as regiões foi de  $-50^\circ$ . Sendo que os fundeios da plataforma continental (PC-01 e PC-02) e áreas internas do CESM (EST-01 e EST-02) tiveram seu  $u > 0$  apontado para NE ( $40^\circ$ ).

Para remoção dos dados inconsistentes armazenados pelo equipamento durante o tempo de fundeio, utilizamos o método estatístico de eliminação dos registros que excederam a média  $\pm 3$  vezes o valor do desvio padrão, a partir da aplicação de uma janela móvel retangular com 0,5 horas de largura. As lacunas deixadas nos dados, geradas pela remoção dos dados espúrios, foram preenchidas com o uso de interpolação linear. O percentual de preenchimento de lacunas através da interpolação linear não excedeu 1 % do número total de dados da série original.

Nesse estudo foi adotada a convenção de ( $u > 0$ ) para expressar velocidades de maré vazante e ( $u < 0$ ) para expressar velocidades de maré enchente. Para a variação do campo de correntes, foi utilizada a condição de não escorregamento junto ao fundo, onde assumimos velocidades iguais a zero no fundo ( $u = 0$ ).

### 5.3 Estrutura Termohalina

Os dados da estrutura termohalina foram mensuradas com um *Conductive-Temperature-Depth* - CTD (EXO2/YSI). O equipamento (Fig. 4) foi imerso na coluna d'água de forma lenta ( $0,5 \text{ ms}^{-1}$ ), com uma frequência de aquisição de dados de 4 Hz. A resolução do sensor de condutividade foi de  $0,0001$  a  $0,01 \text{ mS cm}^{-1}$ , com amplitude de  $0$  a  $200 \text{ mS cm}^{-1}$ , a temperatura foi medida em uma resolução de  $0,001 \text{ }^\circ\text{C}$ , com uma amplitude de  $-5$  a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , enquanto a profundidade foi medida em resolução de  $0,001 \text{ m}$ .



**Figura 4.** CTD (EXO2/YSI), com grade de proteção. Fonte: Santos (2018b).

O CTD foi utilizado como uma unidade autônoma, sendo os dados armazenados na memória do equipamento e, quando o CTD era retirado da água os dados eram descarregados, passando por controle de qualidade inicial. Foram eliminados dados inconsistentes, tendo em vista que tais erros são provenientes de erros sistemáticos e aleatórios e estas lacunas foram preenchidas através do uso de uma interpolação linear: apenas os perfis que tiveram um nível de interpolação menores que 5% foram considerados na análise. Apenas os dados obtidos durante a descida do CTD foram considerados, pois o processo de subida do aparelho é considerado mais turbulento que o processo de descida, gerando perturbações na estratificação da coluna d'água. As variáveis de estado foram calculadas seguindo a metodologia da *International Thermodynamic Equation of Seawater 2010 - TEOS-10*.

Durante a etapa de tratamento dos dados de CTD, foram detectados e eliminados os dados espúrios, através do uso de uma taxa de máxima variação de cada propriedade, eliminando assim quaisquer valores que excederam a este limite. Desta forma, para uma melhor análise dos dados, os perfis hidrográficos realizados com CTD foram divididos em blocos de 0,5 m de espessura, da superfície ao fundo. Em cada bloco, os dados que foram diferentes da média  $\pm 3$  vezes o desvio padrão do bloco, foram eliminados (Emery e Thomson, 2014).

A utilização do CTD em uma velocidade de descida de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  e frequência de aquisição de dados de 4 Hz, permitiu a aquisição de 8 dados de temperatura e condutividade por metro de coluna de água. No entanto, devido ao jogo da embarcação, não podemos garantir um equi-espacamento vertical entre as amostras no momento da amostragem. Assim, foi calculada uma média vertical para cada 1 m de coluna de água, o que resultou em perfis equi-espaçados verticalmente.

Após a determinação de valores em cada intervalo e a remoção dos valores espúrios, os espaços deixados pelos dados em cada intervalo de 1 m foram preenchidos utilizando uma janela móvel e um procedimento de filtragem; os valores retirados nesse procedimento, são substituídos por uma média ponderada entre eles mesmos e os valores adjacentes. O número de valores adjacentes incluídos na média corresponde ao tamanho da janela e a distribuição dos valores corrigidos em relação ao valor central será determinado pelo tipo de janela utilizada. O alisamento por janela móvel que foi utilizado

é a do tipo *Hanning*, que promove uma distribuição de pesos de caráter gaussiano, privilegiando a medida central.

#### 5.4 Massas d'água

Foi empregado o Diagrama TS espalhado, pois representa graficamente as observações de temperatura e salinidade, visando a identificação de fontes de massas de água para a formação da massa de água estuarina (MIRANDA; CASTRO FILHO; KJERFVE, 2002). Para a estimativa da área horizontal e vertical de influência de um dado par TS (Temperatura e Salinidade), foi levada em consideração a isotropia na distribuição das estações hidrográficas. A distância vertical da temperatura e da salinidade foi definida de acordo com a equação 4:

$$d_i = \begin{cases} \frac{h_{i-1} - h_i}{2} & \text{se } i = 1 \\ \frac{h_{i+1} - h_i}{2} & \text{se } 1 < i < n \\ Z - h_i + \frac{h_i - h_{i-1}}{2} & \text{se } i = n \end{cases} \quad (4)$$

O índice  $i$  representa a  $i$ -ésima observação na coluna de água, numeradas consecutivamente a partir da superfície livre até o fundo ( $i = 1$  é a observação mais próxima à superfície e  $i = n$  é a observação mais próxima ao fundo);  $d_i$  representa a distância vertical de influência da  $i$ -ésima observação na coluna de água;  $h_i \geq 0$  é a profundidade da  $i$ -ésima observação;  $Z$  é a profundidade da estação.

#### 5.5 Cálculo dos valores médios no espaço e no tempo

A integração numérica para as médias no espaço e no tempo foi realizada de acordo com os métodos propostos por Miranda, Castro e Kjerfve (2002) e Bergamo, Miranda e Corrêa (2002), onde o espaço equivale à profundidade. Para os perfis verticais de propriedades escalares denotados genericamente por  $P = P(Z_j, t)$ , amostradas em profundidades adimensionais discretas ( $Z_j = 0, -0.1, -0.2, \dots -1$ ), as médias desses perfis no tempo foram calculadas por integração numérica, conforme:

$$\langle P(Z_j, t) \rangle = P(Z_j) \frac{1}{M} \int_0^{t_n} P(Z_j, t) dt \quad (5)$$

$$\overline{P(Z_j, t)} = P(t) = \int_{-1}^0 P(Z_j, t) dZ \quad (6)$$

$$\langle \overline{P(Z_j, t)} \rangle = P = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_n} \left[ \int_{-1}^0 P(Z_j, t) dZ \right] dt \quad (7)$$

Os símbolos ( $\langle \rangle$ ) e a barra ( $\overline{\quad}$ ) indicam médias no tempo e no espaço, respectivamente, durante intervalos de tempo iguais a um período de um ciclo completo de maré ( $T$ ) e ao longo da coluna de água.

Nas equações (5) a (7),  $P(Z_j)$  é a média temporal,  $P(\hat{z})$  é a média espacial e  $P$  é a média no tempo e espaço ou valor residual, aplicada ao perfil vertical observado de uma propriedade escalar qualquer  $P(Z, t)$ , que neste caso são representadas pela salinidade [ $S = S(Z, t)$ ], temperatura [ $T = T(Z, t)$ ] e componente longitudinal da velocidade [ $u = u(Z, t)$ ]. Com base no período ( $T$ ), equivalente ao ciclo completo de maré, a interpolação é feita com  $T = n\Delta t = t_n - t_0$  (onde  $\Delta t = 1h$  e  $n = 13h$ ). As integrações foram feitas numericamente aplicadas aos valores discretos no tempo e/ou espaço, e discretizadas da seguinte forma (KJERFVE, 1979; MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002):

$$\langle P(Z_j, t) \rangle = \frac{1}{n} \left[ \frac{P(Z_j, t_0)}{2} + \sum_k P(Z_j, t_k) + \frac{P(Z_j, t_n)}{2} \right] \quad (8)$$

$$\overline{P(t)} = \frac{1}{10} \left[ \frac{P(0, t)}{2} + \sum_k P(Z_j, t) + \frac{P(1, t)}{2} \right] \quad (9)$$

$$\langle \overline{P(Z_j, t)} \rangle = P \frac{1}{n} \left[ \frac{P(t_0)}{2} + \sum_k P(t_k) + \frac{P(t_n)}{2} \right] \quad (10)$$

Através deste método, foram obtidos os perfis verticais quase estacionários da salinidade, temperatura e da componente longitudinal da velocidade, bem como seus valores residuais,  $Sa$ ,  $Ta$  e  $ua$ , para os quatros fundeios oceanográficos. Mais detalhes acerca desta metodologia podem ser obtidos em Miranda, Castro e Kjerfve (2002).

### 5.5 Transporte advectivo de sal

O transporte médio de sal ( $Ts$ ) durante um ou mais ciclos completos de maré é dado pela equação 11 e foi aplicada somente para todos os perfis Eulerianos.

$$Ts = \frac{1}{M} \int_0^M \left[ \int_0^h \rho u S dz \right] dt = \langle \overline{\rho u S h} \rangle \quad (11)$$

Onde  $\rho$ ,  $u$  e  $S$  indicam a densidade, o componente longitudinal da velocidade e a salinidade, respectivamente, e  $h$  é a espessura da coluna de água. A barra ( $\bar{\quad}$ ) sobre as variáveis denota o valor médio ao longo da coluna de água e o símbolo  $\langle \rangle$  denota a média no tempo, ou seja, o segundo membro da equação (11) envolve o cálculo de médias no espaço e no tempo das propriedades que foram calculadas numericamente pelas equações 8 a 10.

Para que seja possível calcular os componentes do transporte advectivo de sal, visto que somente uma parte deste transporte de sal foi calculada pela equação (11), foi necessário decompor em parcelas o componente longitudinal da velocidade (quatro parcelas), a salinidade (quatro parcelas) e a espessura da coluna de água (duas parcelas) (BOWDEN, 1963; DYER, 1974; FISCHER, 1976; HUNKINS, 1981; KJERFVE, 1986). Para um canal estuarino lateralmente homogêneo, essa decomposição é expressa por:

$$u(x, Z, t) = u_a(x) + u_t(x, t) + u_s(x, Z) + u'(x, Z, t) \quad (12)$$

$$S(x, Z, t) = S_a(x) + S_t(x, t) + S_s(x, Z) + S'(x, Z, t) \quad (13)$$

$$h(x, t) = h_a + h_t(x, t) \quad (14)$$

As primeiras parcelas do segundo membro das equações (12) e (13), representam o efeito advectivo gerado pela descarga fluvial ( $u_a$ ) na redistribuição advectiva da salinidade ( $S_a$ ). Os segundos termos [ $u_t(x, t)$  e  $S_t(x, t)$ ] simulam os efeitos cíclicos da corrente de maré, e os terceiros termos [ $u_s(x, Z)$  e  $S_s(x, Z)$ ] simulam o efeito da circulação gravitacional, ou seja, gradientes barotrópico e baroclínico da força de gradiente de pressão, respectivamente. E por fim, os últimos termos  $u'(x, Z, t)$  e  $S'(x, Z, t)$ , são parcelas residuais, resultantes de processos físicos de pequena escala. O  $h_a = \langle h \rangle$  é a média no tempo da profundidade local e  $h(x, t)$  é a variação no tempo da altura da maré.

Substituindo as equações (12), (13) e (14) na equação (11), o transporte advectivo de sal resultante fica decomposto em 32 parcelas, no entanto, existem parcelas muito pequenas que acabam sendo desprezadas ou que não apresentam uma correlação com

significado físico definido, resultando em sete (7) parcelas para o transporte total médio de sal:

$$T_s = \bar{\rho} \left( u_a h_a S_a + \langle h_t u_t \rangle S_a + h_a \langle u_s S_t \rangle + h_a \overline{u_s S_t} \right) + h_a \langle \overline{u' S'} \rangle + \langle u_t S_t h_t \rangle + u_a \langle S_t h_t \rangle \quad (15)$$

As sete parcelas da equação (15) estão relacionadas, respectivamente, aos seguintes processos físicos: descarga fluvial, deriva de Stokes, correntes de maré, circulação gravitacional, flutuações turbulentas, correlação tríplice e corrente residual. Maiores detalhes acerca desta metodologia podem ser adquiridos em Bergamo, Miranda e Corrêa (2002) e Miranda, Castro e Kjerfve (2002).

### 5.6 Número de Richardson por camada

A estabilidade vertical da coluna de água pode ser expressa por vários números adimensionais. O número de Richardson por camada (RiL) definido por Bownden (1978), utilizado no presente estudo, foi calculado da seguinte maneira:

$$R_{iL} = \frac{gh \Delta\rho_v}{(\bar{u})^2 \bar{\rho}} \quad (16)$$

Onde  $h = h(t)$  é a profundidade local,  $\Delta\rho_v$  é a diferença da densidade do fundo e da superfície,  $\bar{u}$  é o valor médio da velocidade na coluna e  $\bar{\rho}$  é a densidade média da coluna de água. Os limites inferiores ( $R_{iL} = 2,0$ ) e superiores ( $R_{iL} = 20,0$ ) estabelecem as condições de instabilidade e alta estabilidade vertical na coluna de água. Para os valores de  $R_{iL} < 2$ , os processos de mistura dominam na coluna d'água, indicando uma condição de instabilidade. Em valores de  $2 < R_{iL} < 20$ , há uma formação de estratificação relativamente moderada e a coluna d'água tem uma fraca estabilidade. Para valores de  $R_{iL} > 20$ , os mecanismos de mistura não foram suficientes para quebrar a estratificação da coluna d'água, apresentando uma alta estabilidade vertical (DYER, 1986).

### 5.7 Diagrama de Classificação de Hansen & Rattray

Para classificação do estuário foi utilizado o Diagrama de Estratificação-circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), de acordo com os parâmetros de estratificação (Pe) e circulação (Pc):

$$pe = \frac{\delta S}{\bar{s}} = \frac{s_f - s_s}{\bar{s}} \quad (17)$$

$$pc = \frac{u_s}{u_f} \approx \frac{u_s}{\bar{u}} \quad (18)$$

Onde  $\delta S = S_f - S_s$  é a diferença entre os valores de salinidade no fundo ( $S_f$ ) e de superfície ( $S_s$ ),  $\bar{s}$  é o valor médio da salinidade na coluna de água. A  $u_s$  é o valor médio da componente longitudinal de velocidade na superfície,  $u_f$  é a velocidade da descarga fluvial. Quando a velocidade da descarga fluvial não é conhecida, utiliza-se o valor médio da velocidade na coluna de água representado pelo  $\bar{u}$ . Os parâmetros foram calculados com as médias no tempo e no espaço utilizando as equações de (8) a (10).

Os parâmetros de estratificação e circulação estão teoricamente relacionados com uma grandeza  $v$ , que representa a proporção relativa do transporte de sal estuário acima, resultante do processo de mistura advectivo e difusivo (BÉRGAMO; MIRANDA; CORRÊA, 2002).

Segundo Hansen e Rattray (1966), os estuários podem ser classificados de acordo com o diagrama em:

- Tipo 1 – O fluxo resultante (residual) é estuário abaixo em todas as profundidades, e o transporte de sal estuário acima é devido somente ao processo de difusão turbulenta;
- Tipo 2 – O fluxo resultante reverte com a profundidade e os processos advectivos e dispersivos são importantes para contribuir no transporte de sal estuário acima;
- Tipo 3 – O transporte de sal estuário acima ocorre quase que exclusivamente pelo processo advectivo;
- Tipo 4 – Esse tipo tem estratificação de salinidade máxima e corresponde aos estuários já classificados como cunha salina.

## 6. RESULTADOS

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2, mostrando as variáveis de estado e o campo de correntes correspondentes aos fundeios em diferentes períodos climáticos, sob regime de maré de sizígia. Tais dados são apresentados sequenciados e divididos pela área de aquisição de dados, sendo descritos como circulação estuarina compreendidos pelas estações EST-01 e EST-02 e da Plataforma Continental correspondentes ao PC-01 e PC-02.

**Tabela 2.** Distribuição dos dados calculados correspondentes aos fundeios, onde: V: Velocidade total; u: componente longitudinal da velocidade; v: componente transversal da velocidade; S: salinidade e T: temperatura; Min: valores mínimos; Máx: valores máximos, MED: valores médios.

Parâmetro	EST-01			EST-02			
	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	
<b>SECA</b>	V	-1.82	1.92	0.02	-1.82	2.24	0.10
	<i>u</i>	-1.82	1.89	0.02	-1.76	2.23	0.08
	<i>v</i>	-0.10	0.44	0.05	-0.46	0.54	0.12
	S	25.27	28.9	26.95	26.69	31.80	29.28
	T	28.58	29.09	28.86	28.40	28.96	28.64
<b>CHUVA</b>	V	-1.55	2.02	0.08	-1.81	1.97	0.11
	<i>u</i>	-1.54	2.01	0.08	-1.73	1.97	0.14
	<i>v</i>	-0.24	0.43	-0.01	-0.48	0.73	0.11
	S	18.35	26.27	22.86	21.02	28.95	25.45
	T	29.67	30.50	30.02	29.59	30.70	29.85
Parâmetro	PC-01			PC-02			
	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	
<b>SECA</b>	V	-0.84	0.84	-0.02	-0.91	1.01	0
	<i>u</i>	-0.82	0.84	-0.02	-0.86	1.00	0.09
	<i>v</i>	-0.12	0.27	0.04	-0.09	0.30	0.01
	S	34.86	35.27	35.22	34.40	34.60	34.56
	T	28.98	27.98	28.07	27.45	27.54	27.50
<b>CHUVA</b>	V	-0.86	1.18	0.01	-0.70	0.56	-0.06
	<i>u</i>	-0.85	1.18	0.03	-0.66	0.51	-0.06
	<i>v</i>	-0.19	0.31	0.01	-0.01	0.38	0.14
	S	30.58	35.05	33.43	35.82	36.66	36.35
	T	29.14	29.52	29.34	28.65	29.51	29.07

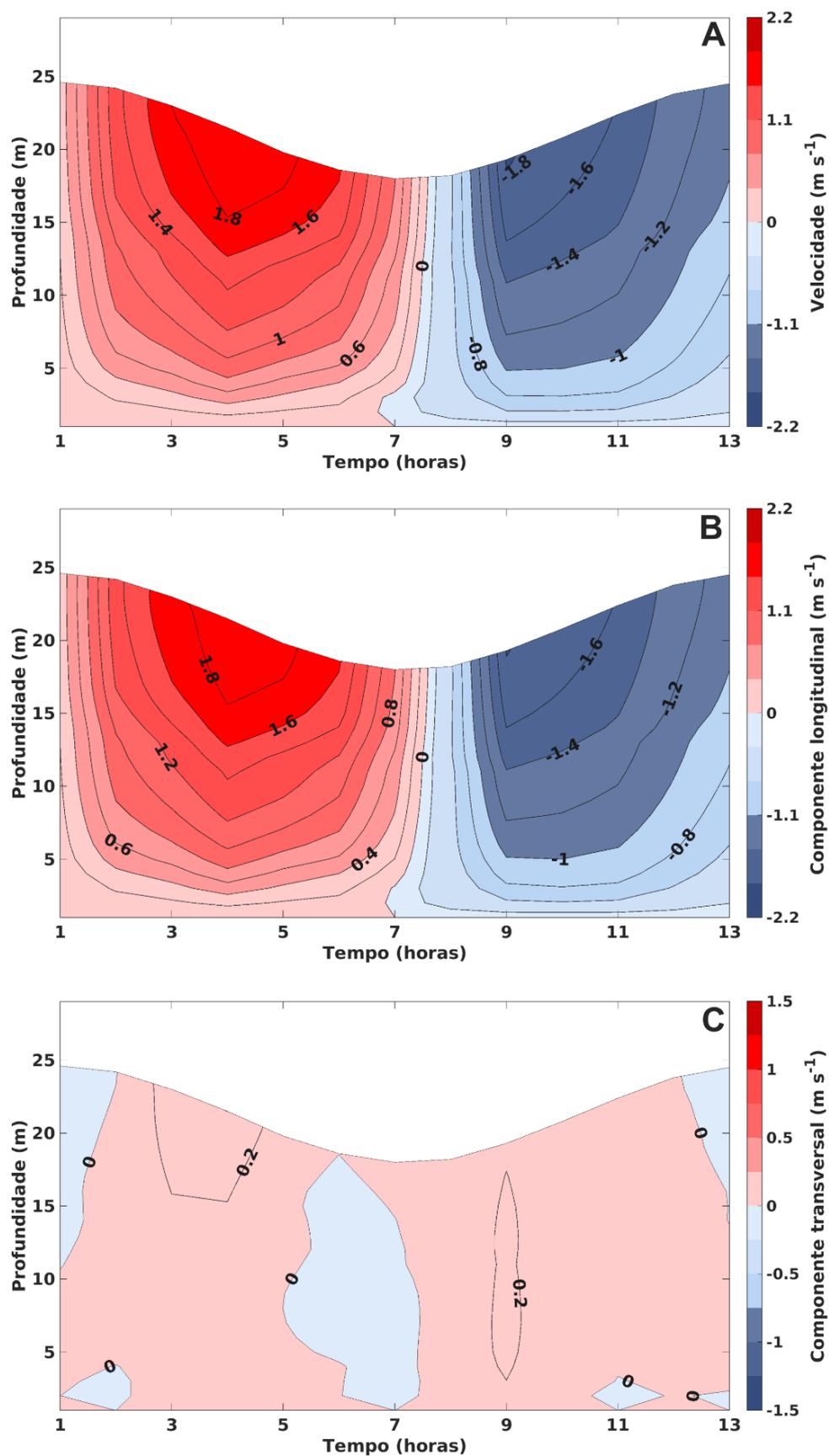
## 6.1. Variação Temporal durante a estação de seca

### 6.1.1 Circulação Estuarina

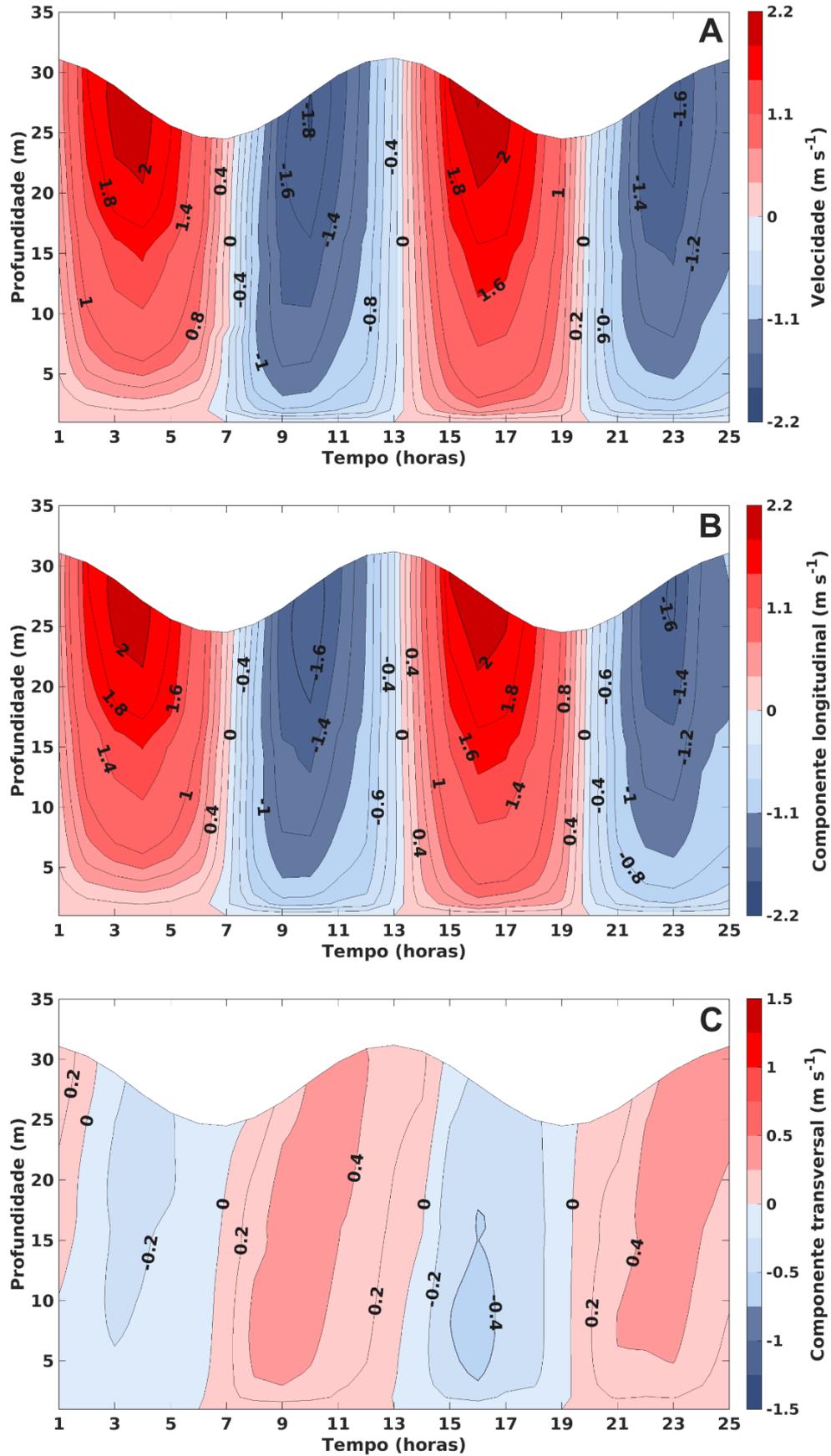
Na região do EST-01, podemos observar que as velocidades totais variaram de  $-1,8$  a  $1,8 \text{ m s}^{-1}$  (Fig. 5A). O perfil de velocidade da componente longitudinal ( $u$ ) apresentou velocidades máximas 3 horas antes da maré baixa durante a vazante ( $1,8 \text{ m s}^{-1}$ ) e 3 horas depois da maré enchente ( $-1,8 \text{ m s}^{-1}$ ) (Figura 5B), observando comportamento similar às velocidades totais. Entretanto, a componente transversal ( $v$ ) apresentou velocidades máximas de  $0,2 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 5C).

Por outro lado, no EST-02, podemos observar núcleos de mínimas e máximas velocidades nos dois ciclos de maré (25h), onde os máximos valores ocorreram 3 horas antes da maré baixa durante a vazante ( $2 \text{ m s}^{-1}$ ) e 3 horas após a maré baixa durante a enchente ( $-1,6 \text{ m s}^{-1}$ ) (Figura 6A). A componente longitudinal apresentou dois núcleos de máxima velocidade correspondente a  $2 \text{ m s}^{-1}$  durante a maré vazante entre as horas 3-4 e 15-17 (Figura 6B). A componente transversal ( $v$ ), por outro lado, apresentou valores variando de  $-0,2$  a  $0,4 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 6C).

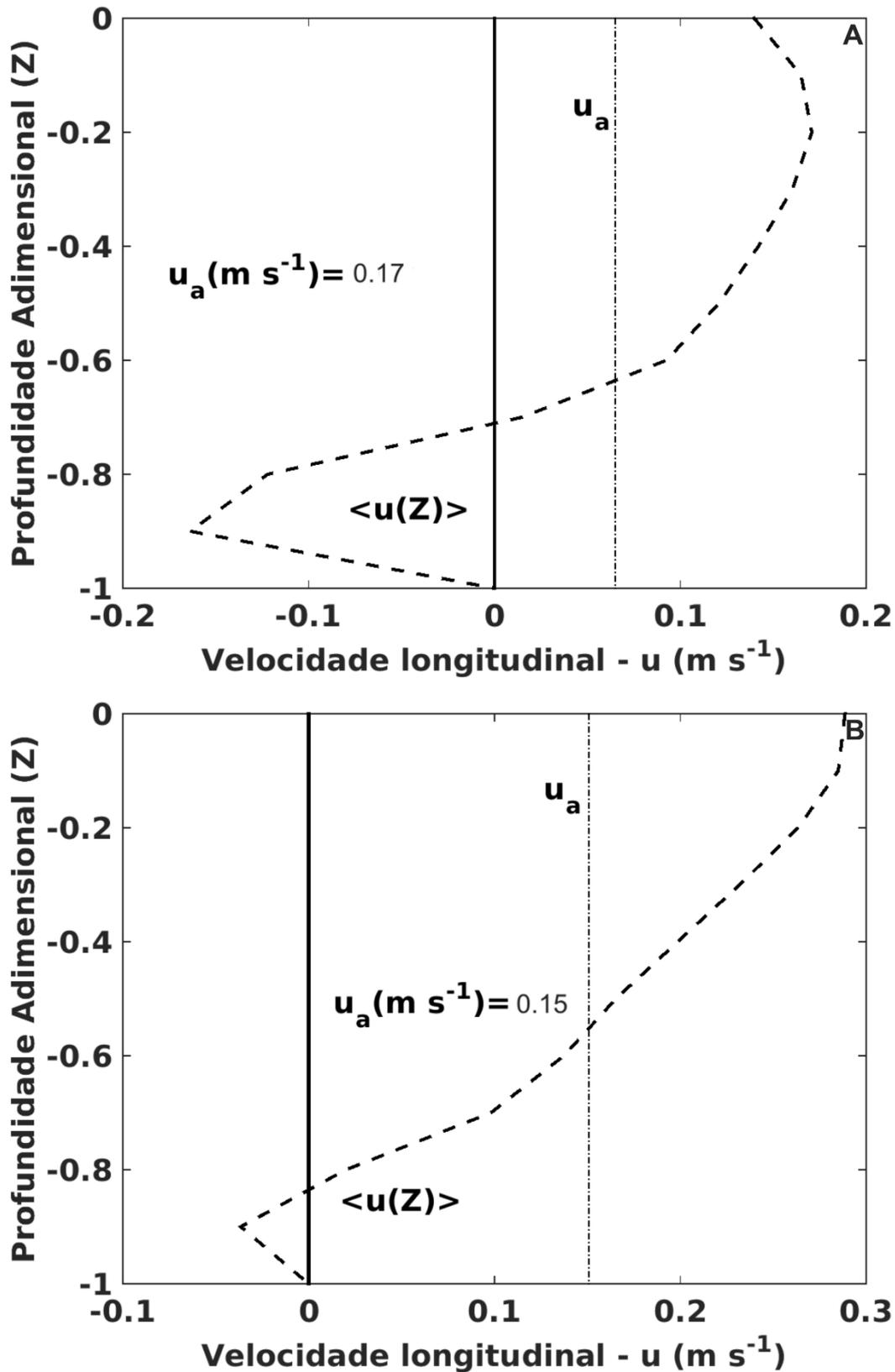
Com base no perfil médio da velocidade ( $\langle u(Z) \rangle$ ) no EST-01, verificamos que as correntes de vazante predominam sobre as de enchente, com correspondente velocidade residual ( $u_a$ ) de  $0,17 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 7A), ou seja, com sentido estuário abaixo. Assim como a predominância da vazante sobre a enchente verificada no EST-02, com a velocidade residual ( $u_a$ ) de  $0,15 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 7B).



**Figura 5.** Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio EST-01 durante a maré sizígia no período seco.



**Figura 6.** Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio EST-02 durante a maré sizígia no período seco.



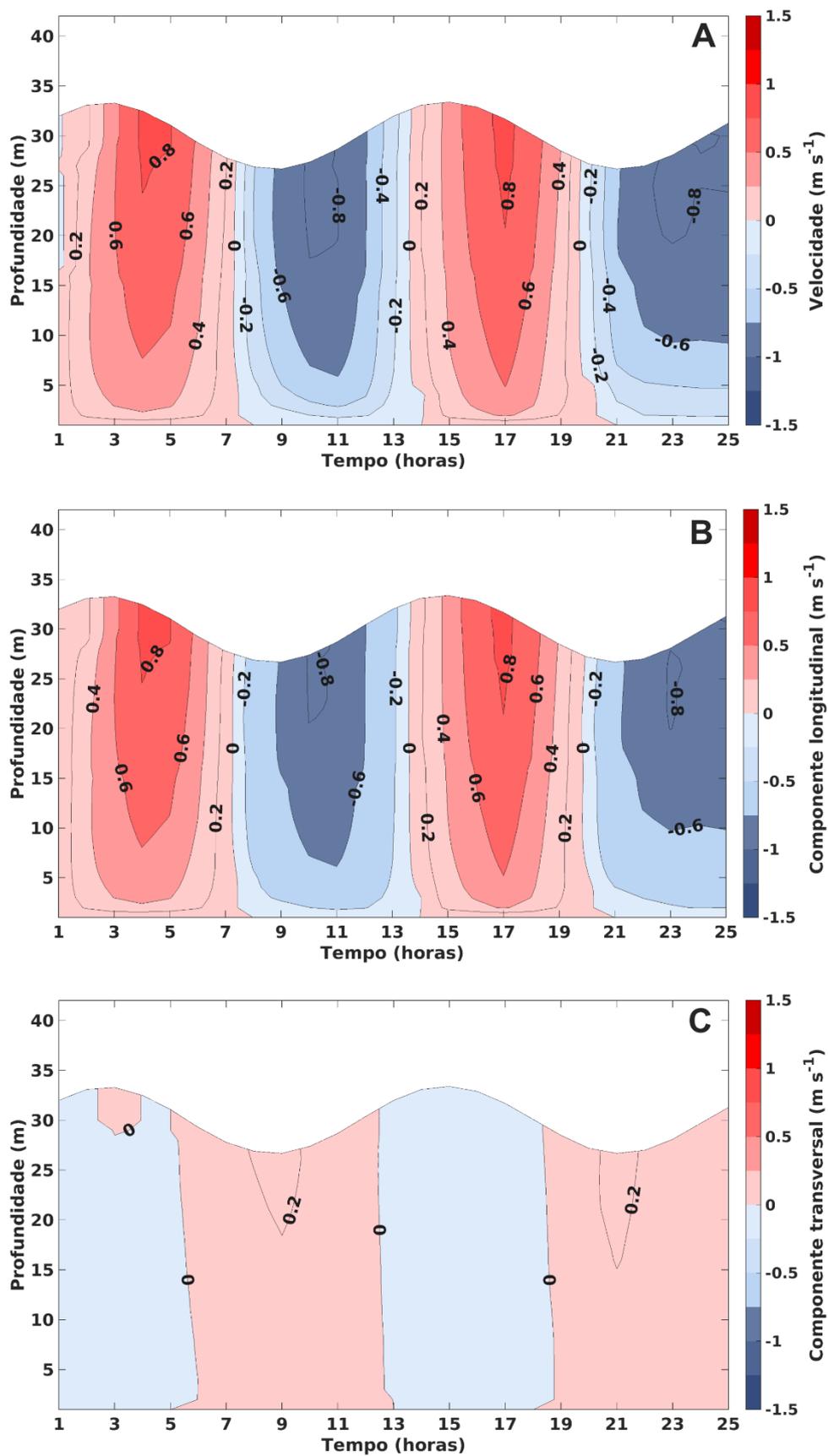
**Figura 7.** Perfis médios da componente longitudinal da velocidade para EST-01 (A) e EST-02 (B) durante a maré sizígia no período seco. O  $\langle u(Z) \rangle$  (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade e ua (linha tracejada) é a velocidade residual.

### 6.1.2 Circulação da Plataforma Continental

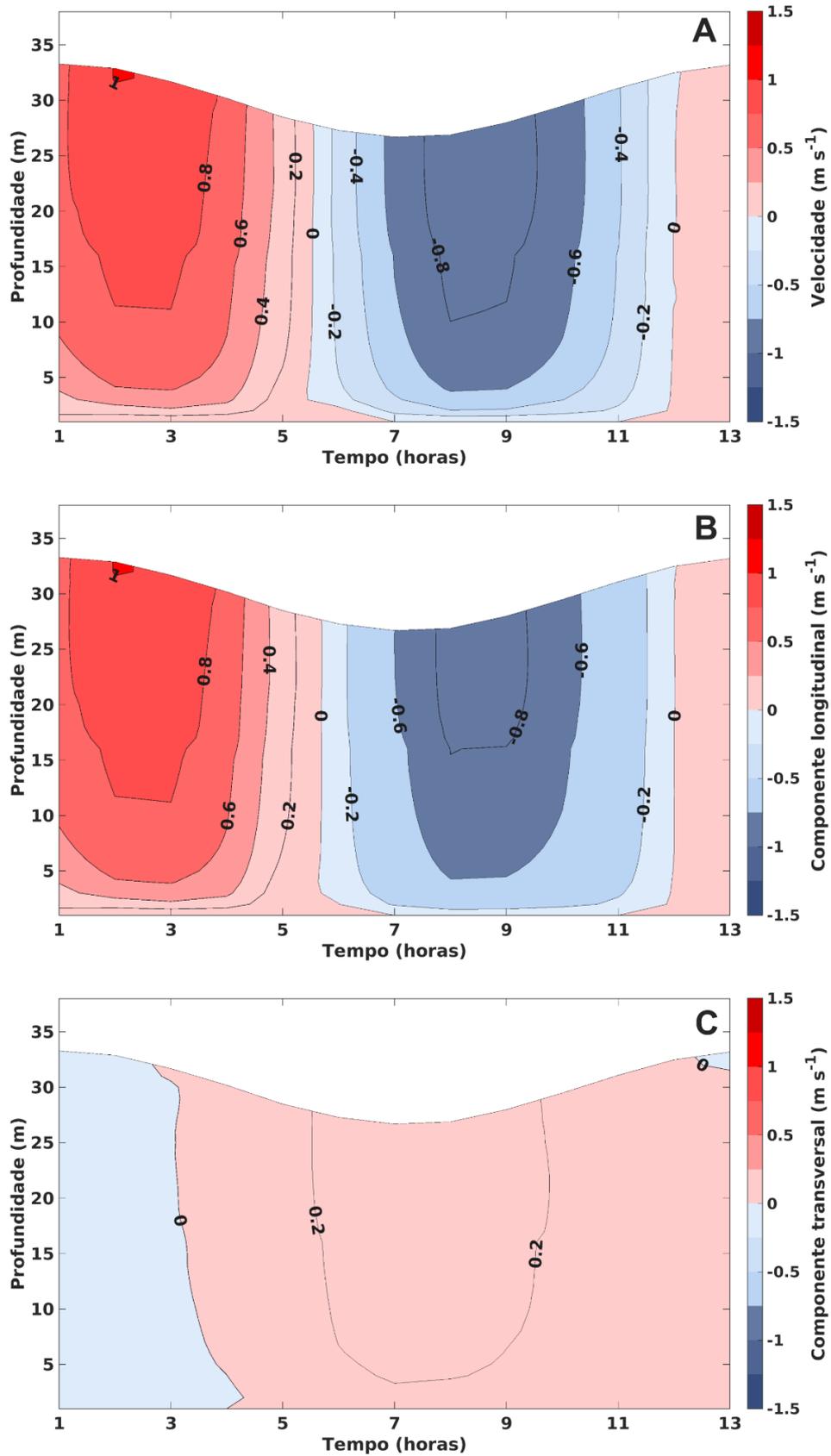
Na região do fundeio PC-01, podemos observar que as velocidades totais variaram de  $-0,8$  a  $0,8 \text{ m s}^{-1}$ , sendo observadas as maiores velocidades na maré vazante nos dois ciclos de maré (Figura 8A). O perfil de velocidade da componente longitudinal ( $u$ ) apresentou velocidades máximas 4h antes da maré baixa durante a vazante ( $0,8 \text{ m s}^{-1}$ ) e 3 horas antes da maré enchente ( $-0,8 \text{ m s}^{-1}$ ) (Fig. 8B), observando comportamento similar às velocidades totais. Entretanto, a componente transversal ( $v$ ) apresentou velocidades máximas de  $0,2 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 8C).

Na região correspondente ao PC-02, por outro lado, podemos observar valores mínimos e máximos de  $1 \text{ m s}^{-1}$  durante a hora 2 e  $-0,8 \text{ m s}^{-1}$  durante a hora 8-9, sendo esta velocidade máxima observada durante a maré vazante (Figura 9A). A componente longitudinal apresentou uma redução de 50% durante a hora 6 a 11, apresentando valores de  $-0,2 \text{ m s}^{-1}$  durante a maré enchente (Figura 9B). A componente transversal ( $v$ ), por outro lado, apresentou valores variando de  $-0,2 \text{ m s}^{-1}$  similar ao apresentado no PC-01 (Figura 9C).

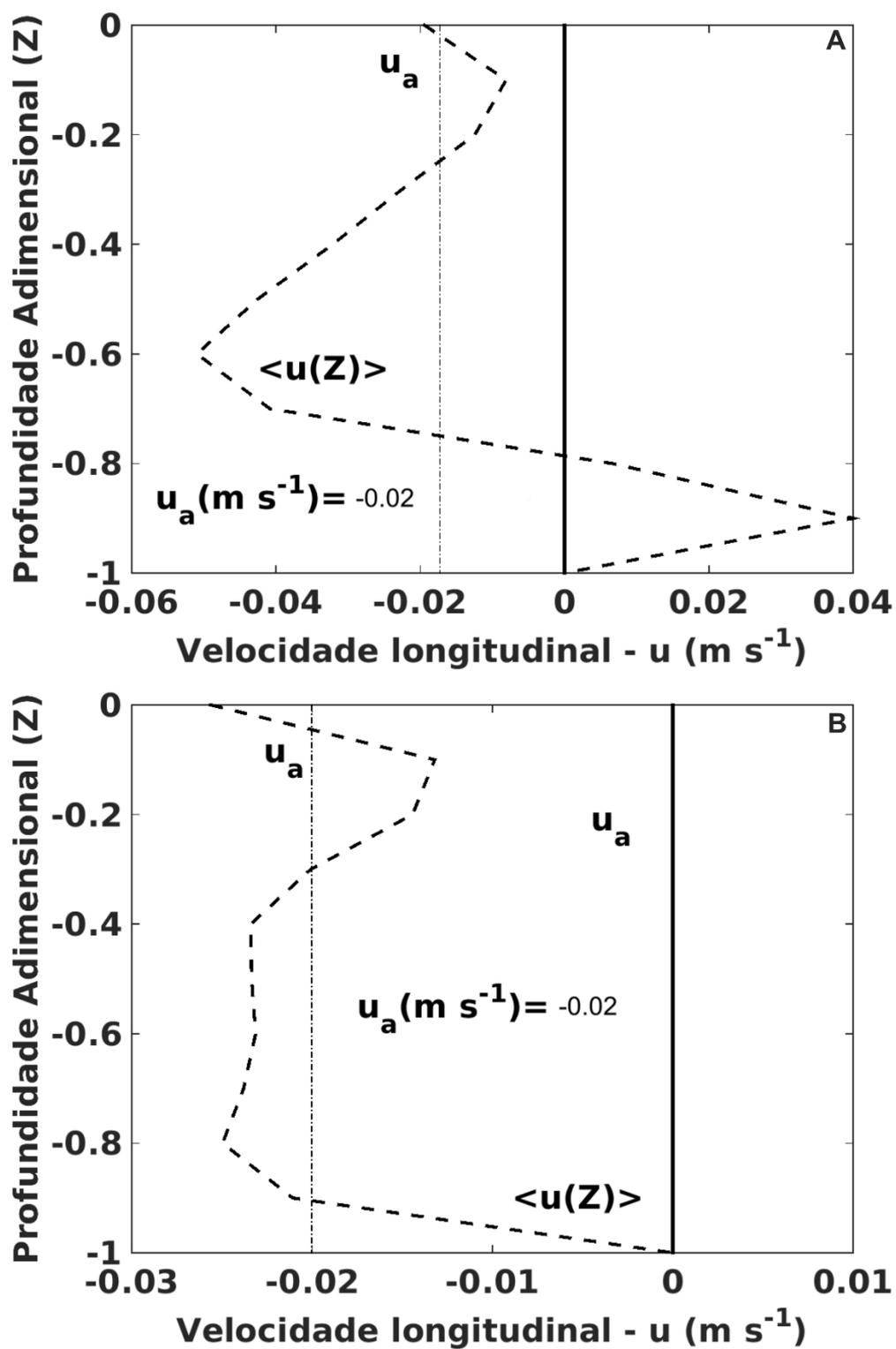
A partir do perfil médio da velocidade ( $\langle u(Z) \rangle$ ) no PC-01, verificamos que as correntes de enchente predominam sobre as de vazante, com correspondente velocidade residual ( $u_a$ ) de  $-0,02 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 10A), ou seja, com sentido estuário abaixo. Assim como a predominância da enchente sobre vazante observada no PC-02, com a mesma velocidade residual ( $u_a$ ) de  $-0,02 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 10B).



**Figura 8.** Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio PC-01 durante a maré sizígia no período seco.



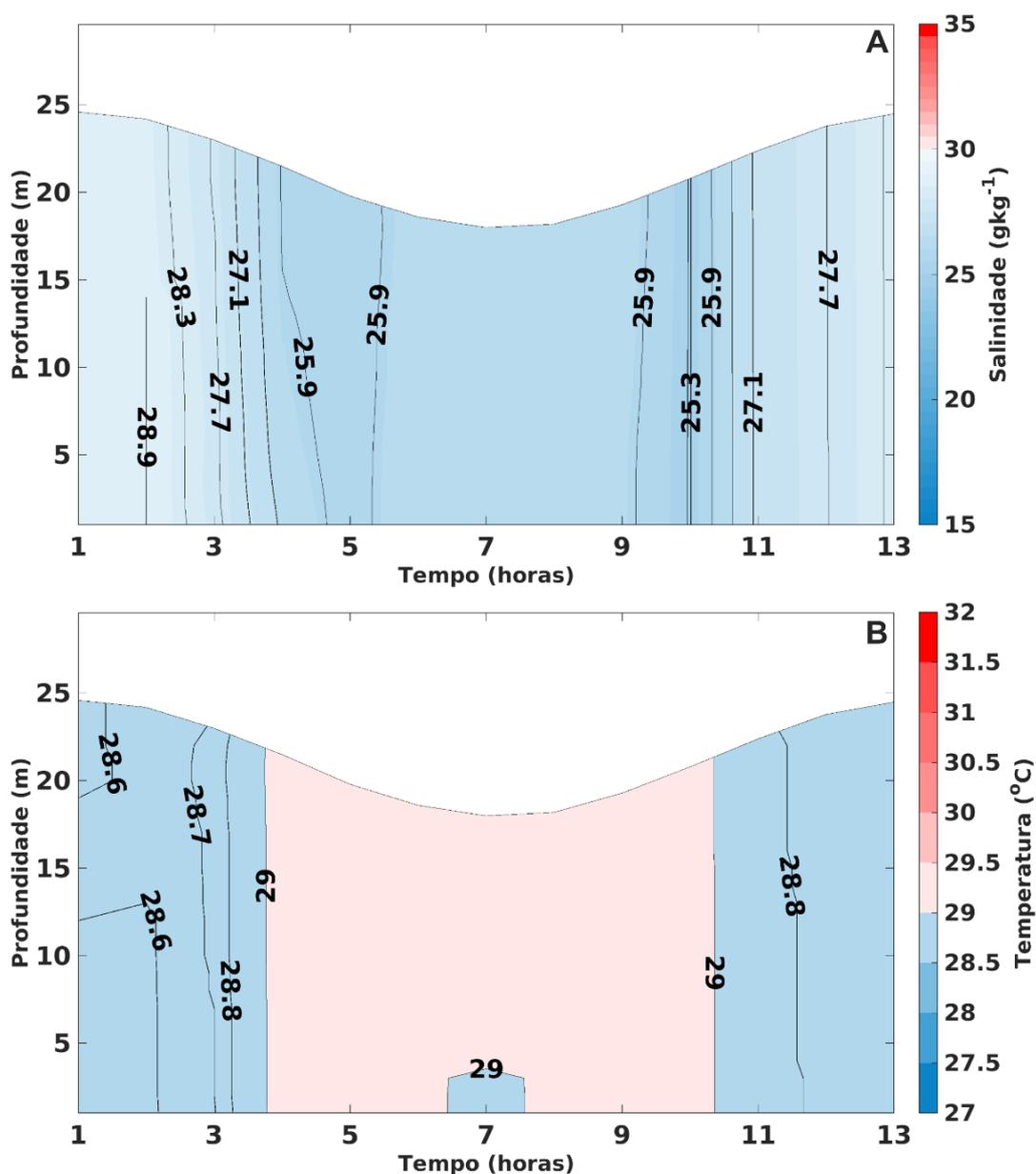
**Figura 9.** Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio PC-02 durante a maré sizigia no período seco.



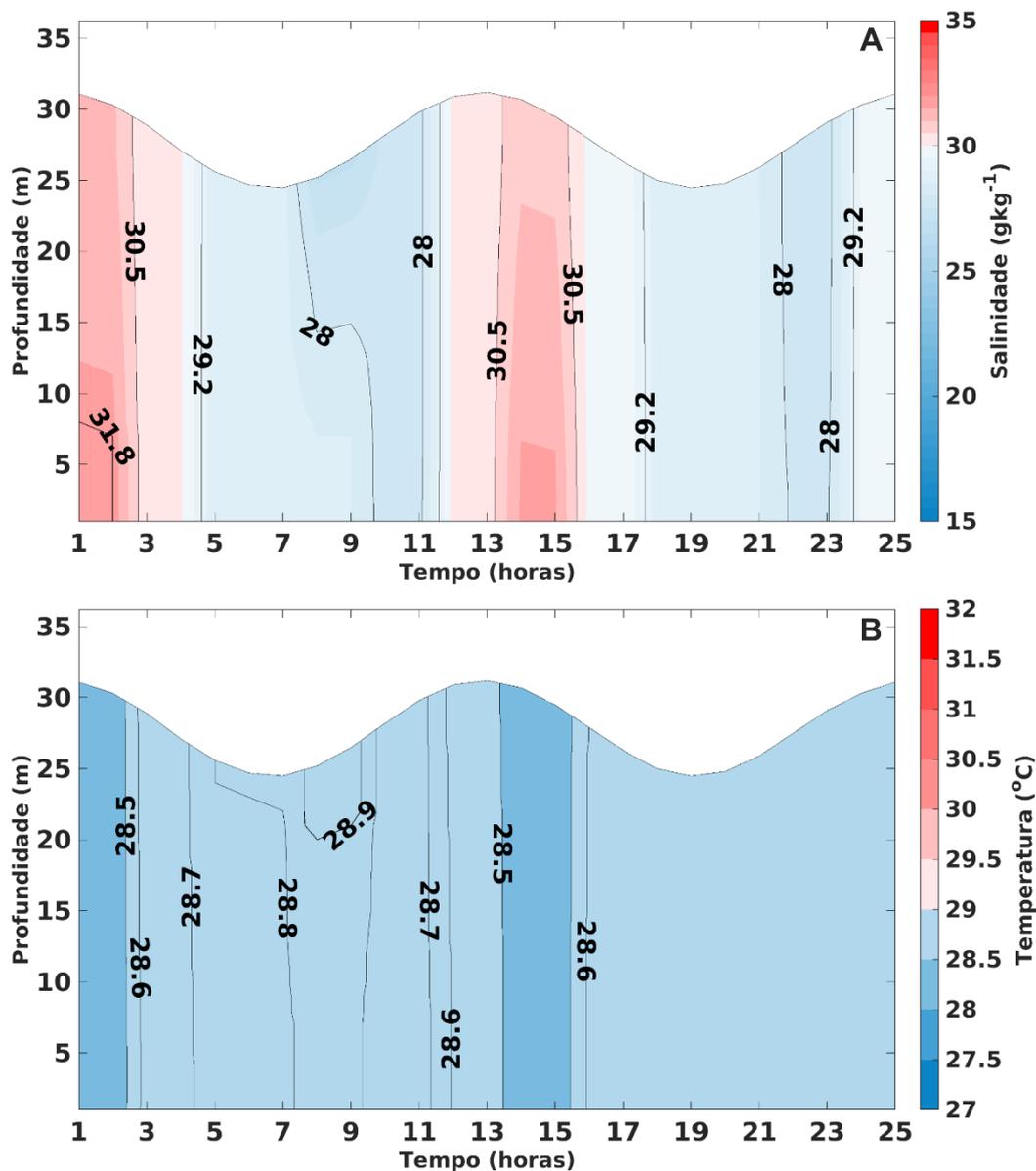
**Figura 10.** Perfis médios da componente longitudinal da velocidade para PC-01 (A) e PC-02 (B) durante a maré sizígia no período seco. O  $\langle u(Z) \rangle$  (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade e  $u_a$  (linha tracejada) é a velocidade residual.

### 6.1.3 Estrutura termohalina estuarina

No EST-01, a salinidade apresentou um pequeno gradiente de  $3,6 \text{ g kg}^{-1}$  ao longo das 13 horas de fundeio, onde a mínima observada foi de  $25,3 \text{ g kg}^{-1}$  (3 horas depois da maré baixa) e a máxima de  $28,9 \text{ g kg}^{-1}$  na estofa de enchente para vazante (Figura 11A). Durante o ciclo de maré vazante e enchente, entre a hora 4 e 10, observou-se isothermas constantes de  $29 \text{ }^\circ\text{C}$  (Figura 11B). A salinidade foi ligeiramente maior no fundeio EST-02, com uma amplitude de  $3,8 \text{ g kg}^{-1}$  ao longo dos dois ciclos de maré (Figura 12A), além disso, as isohalinas revelaram um comportamento semelhante ao observado no EST-01, não havendo variação representativa (Figura 12B).

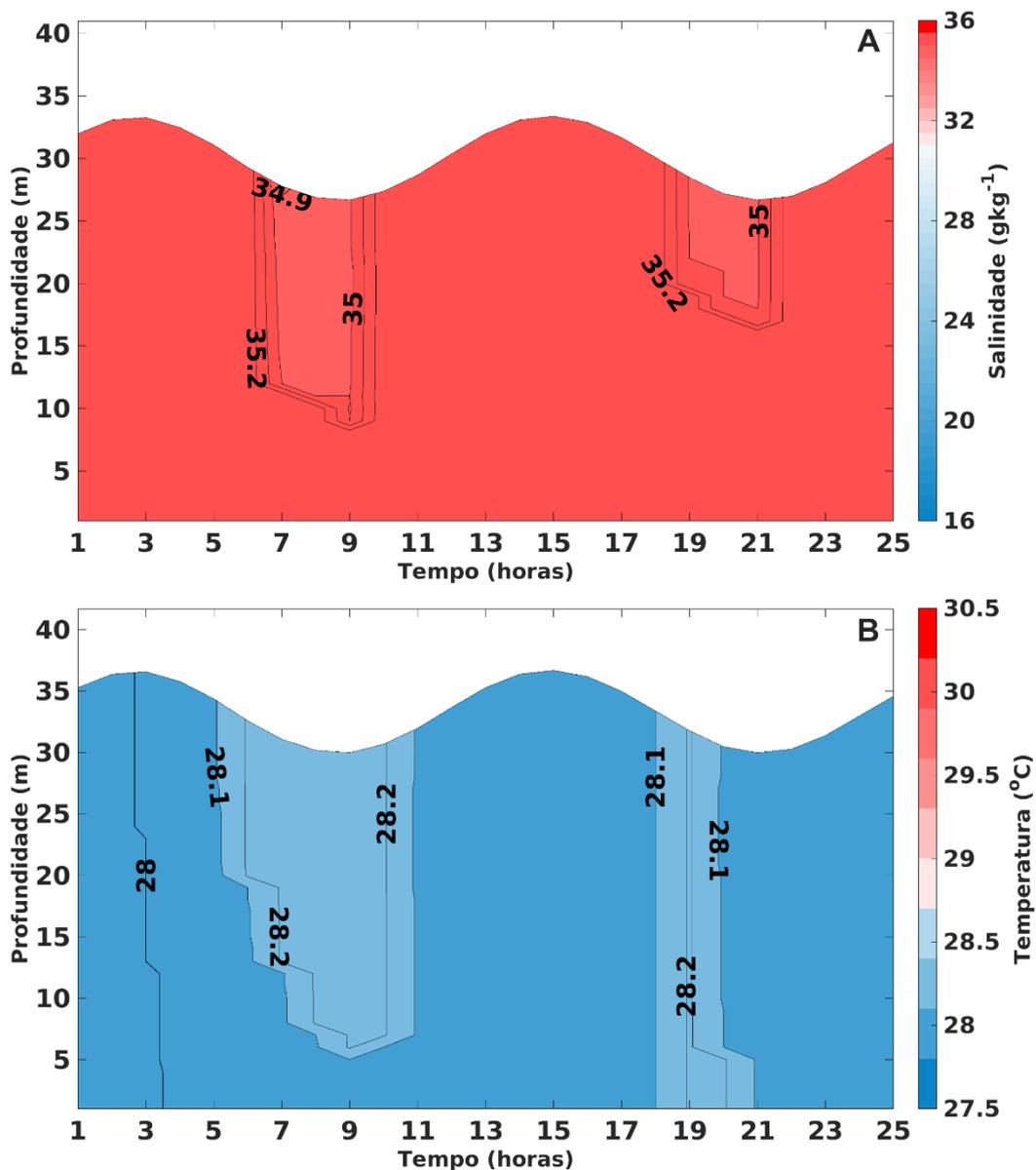


**Figura 11.** Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio EST-01 durante a maré sizígia no período seco.



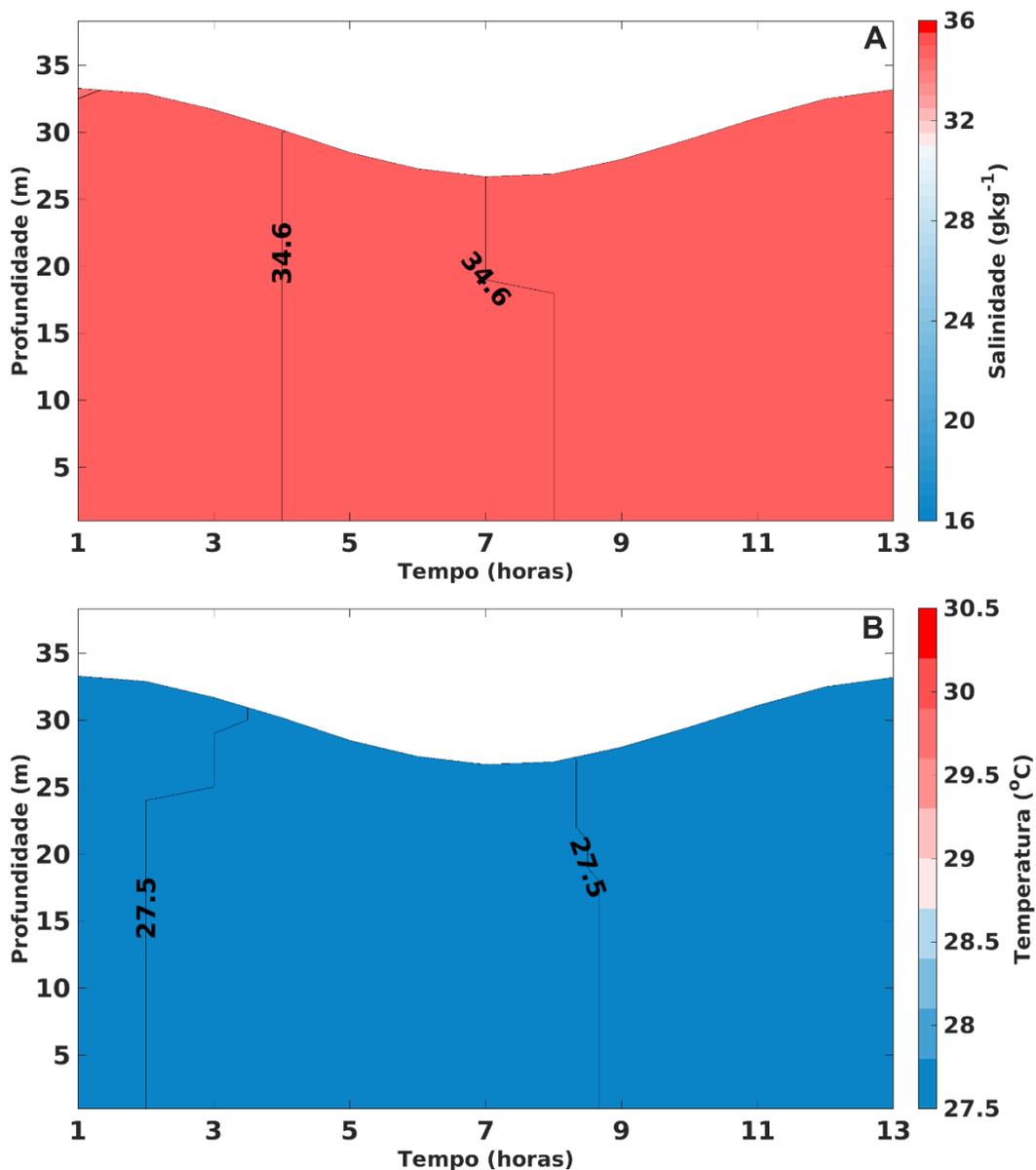
#### 6.1.4 Estrutura termohalina da Plataforma Continental

Na região do PC-01, a isohalinas não apresentaram expressivo gradiente totalizando  $0,3 \text{ g kg}^{-1}$ , demonstrando uma massa de água homogênea, do qual a máxima salinidade observada foi de  $35,2 \text{ g kg}^{-1}$  ao longo das 25 horas e um núcleo de mínima observada de  $34,9 \text{ g kg}^{-1}$  apresentada 2 horas antes da maré baixa (Figura 13A). A temperatura por sua vez, apresentou dois núcleos de isothermas com valores de  $28,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , porém não houve variação durante os dois ciclos de maré de 25h (Figura 13B).



**Figura 13.** Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio PC-01 estuário interno durante a maré sizígia no período seco.

Assim como observada em PC-02, a salinidade manteve-se constante com valores de 34,6 g kg<sup>-1</sup> durante o ciclo completo de maré, sendo observadas as isohalinas durante a maré vazante (Figura 14A). As isotermas durante o ciclo de maré apresentaram apenas um núcleo com máximas temperaturas de 27,5 °C a partir da hora 2 e manteve-se constante durante o ciclo de 13h (Figura 14B).

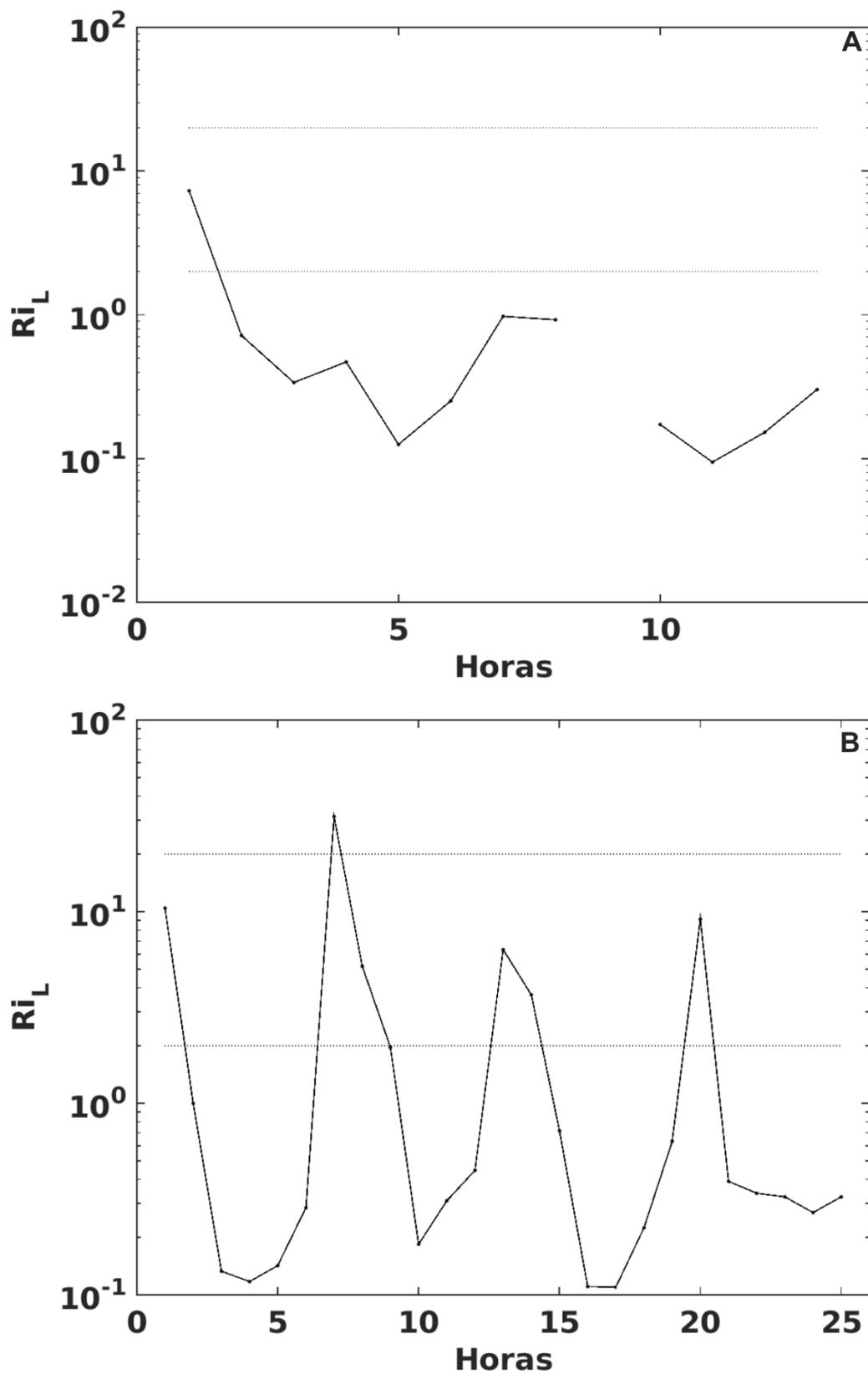


**Figura 14.** Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para a PC Externa interno durante a maré sizígia no período seco.

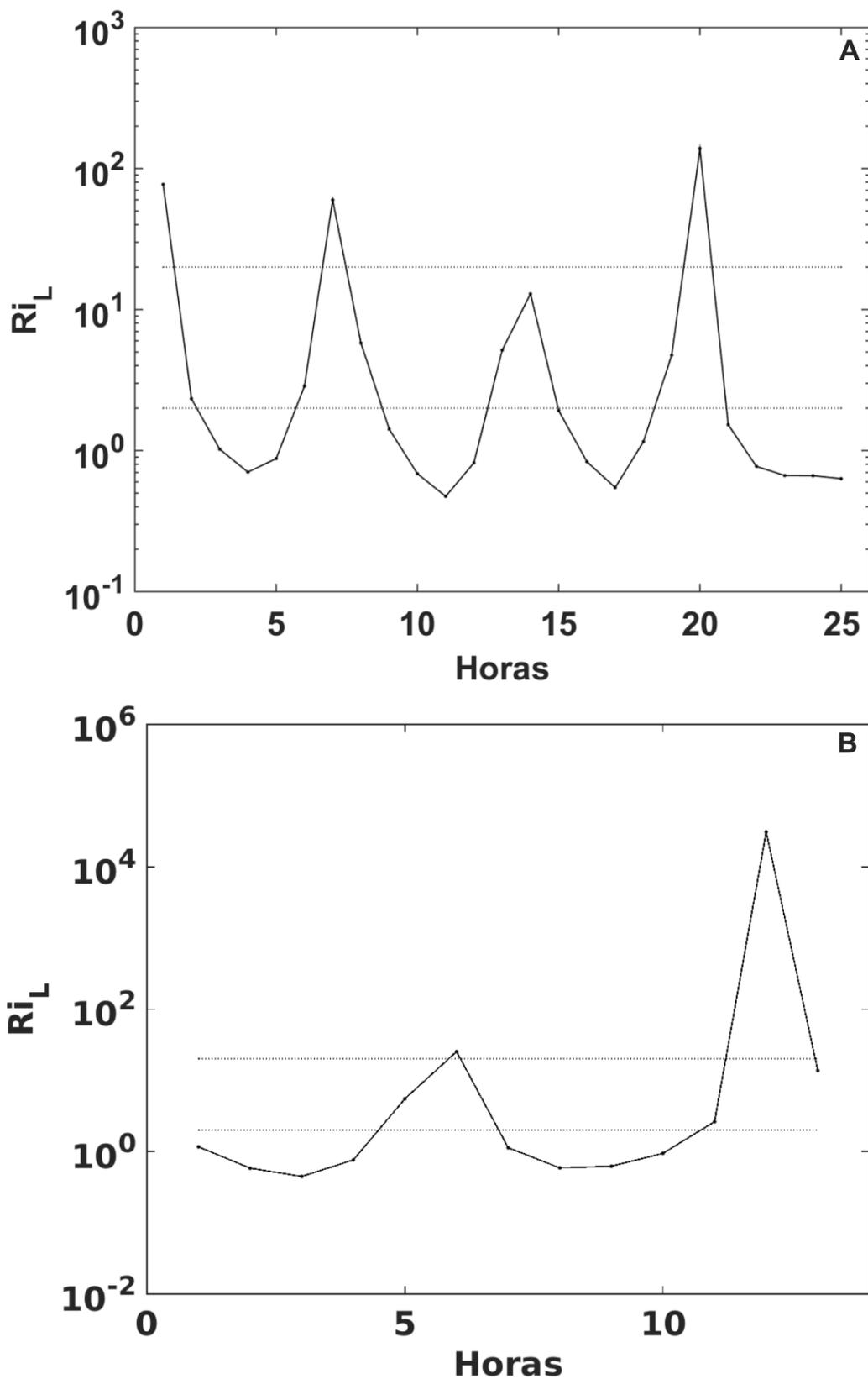
## 6.2. Estabilidade da coluna d'água na estação de seca

Nas figuras 15 e 16 são apresentadas as variações temporais do número de Richardson por Camada ( $Ri_L$ ), para a estação de seca, esta análise foi utilizada para investigar a estabilidade da coluna d'água. Nos fundeios estuarinos (EST01 e 02) foram encontrados baixos valores de Richardson por Camada ( $Ri_L < 2$ ), estes baixos valores são indicativos de uma condição de alta instabilidade vertical nestas áreas.

Nos fundeios da PC-01 e PC-02 (Fig.16A-B), foram observados momentos durante o ciclo completo de maré (PC-02) que oscilaram e apresentaram condições de alta estabilidade vertical ( $Ri_L < 20$ ), tendo no PC-01  $Ri_L > 10^2$  (hora 20) e PC-02  $Ri_L > 10^4$  (a partir da hora 12), muito provavelmente relacionados com instantes de estufa de maré.



**Figura 15.** Variação temporal do número de Richardson por camada para os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) referentes ao período seco.



**Figura 16.** Variação temporal do número de Richardson por camada para os fundeios PC-01 (A) e PC-02 (B) referentes ao período seco.

### 6.3. Classificação de estuário na estação de seca

Durante o período de seca, as regiões dos fundeios EST-01 e EST-02 foram classificados como do tipo a 2a (parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical) onde a circulação gravitacional é praticamente inexistente e o transporte de substâncias estuário acima é basicamente realizado pela difusão turbulenta (Figura 17A-B).

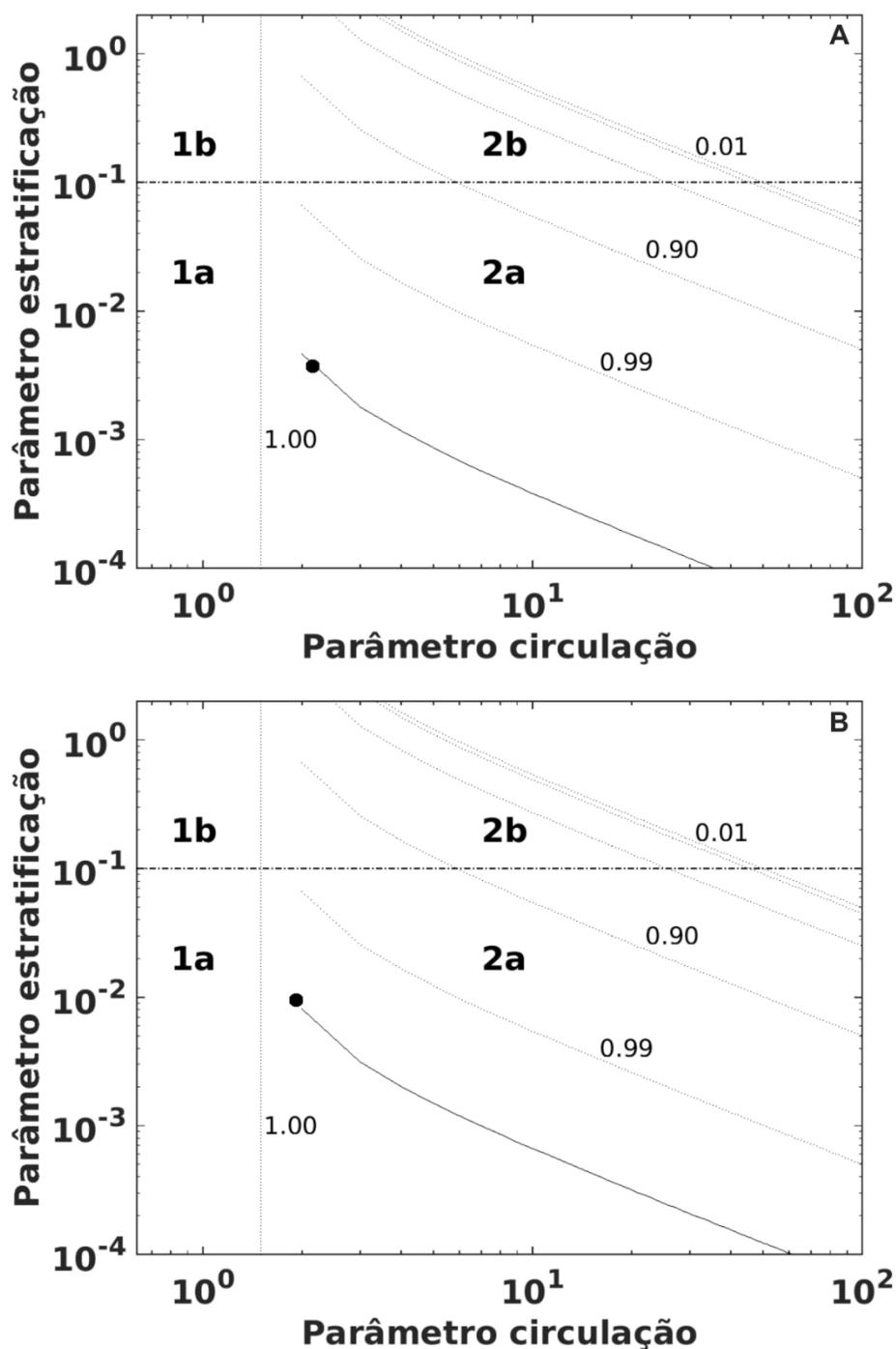
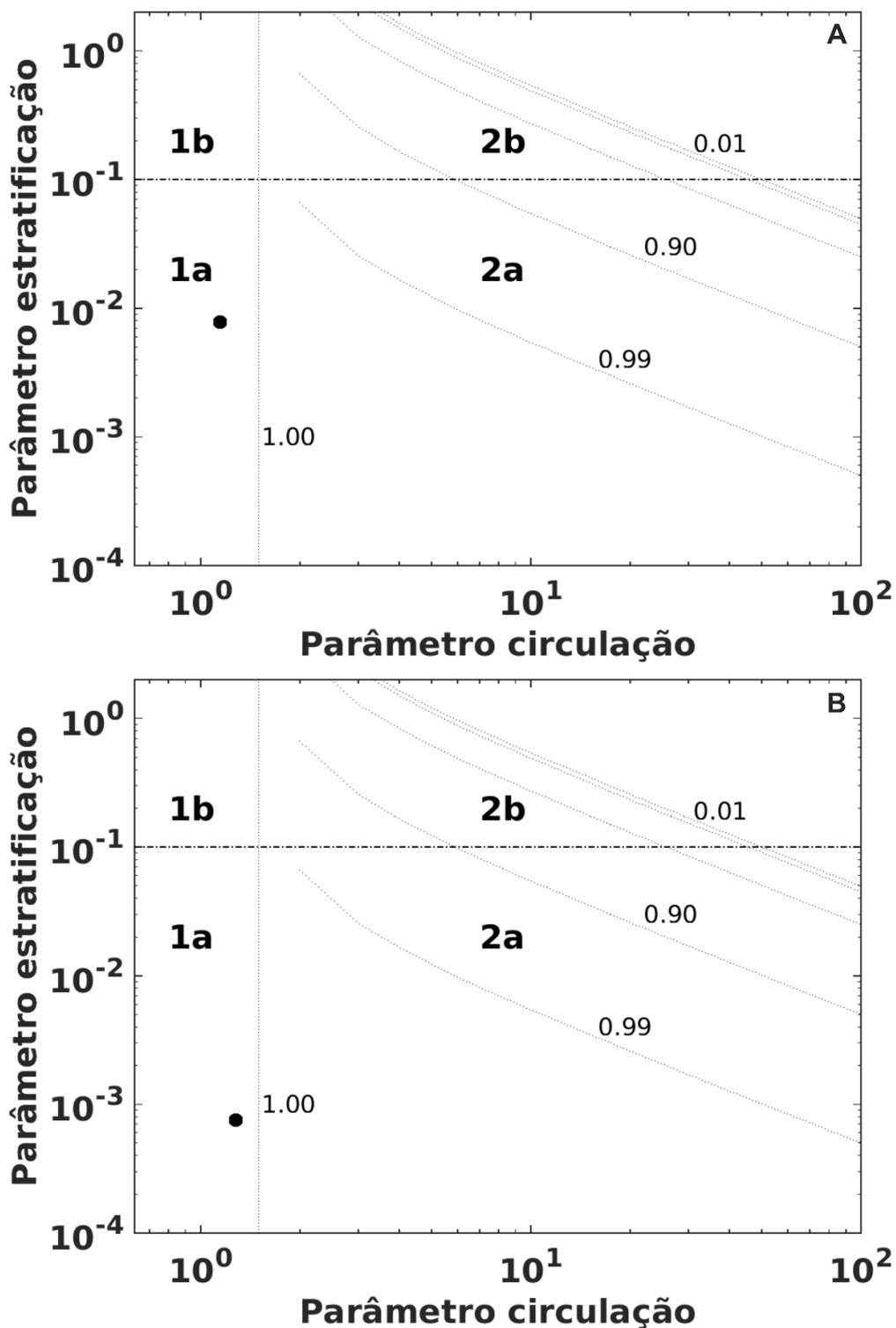


Figura 17. Diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966), com isolinhas do parâmetro  $v$  para os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) durante período seco.

As regiões dos fundeios PC-01 e PC-02 foram classificadas como do tipo a 1a (bem misturado e fracamente estratificado), onde a circulação gravitacional é praticamente inexistente e o transporte de sal estuário acima é realizado inteiramente pela difusão turbulenta (Figura 18A-B).



**Figura 18.** Diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966), com isolinhas do parâmetro  $v$  para os fundeios PC-01 (A) e PC-02 (B) durante período seco.

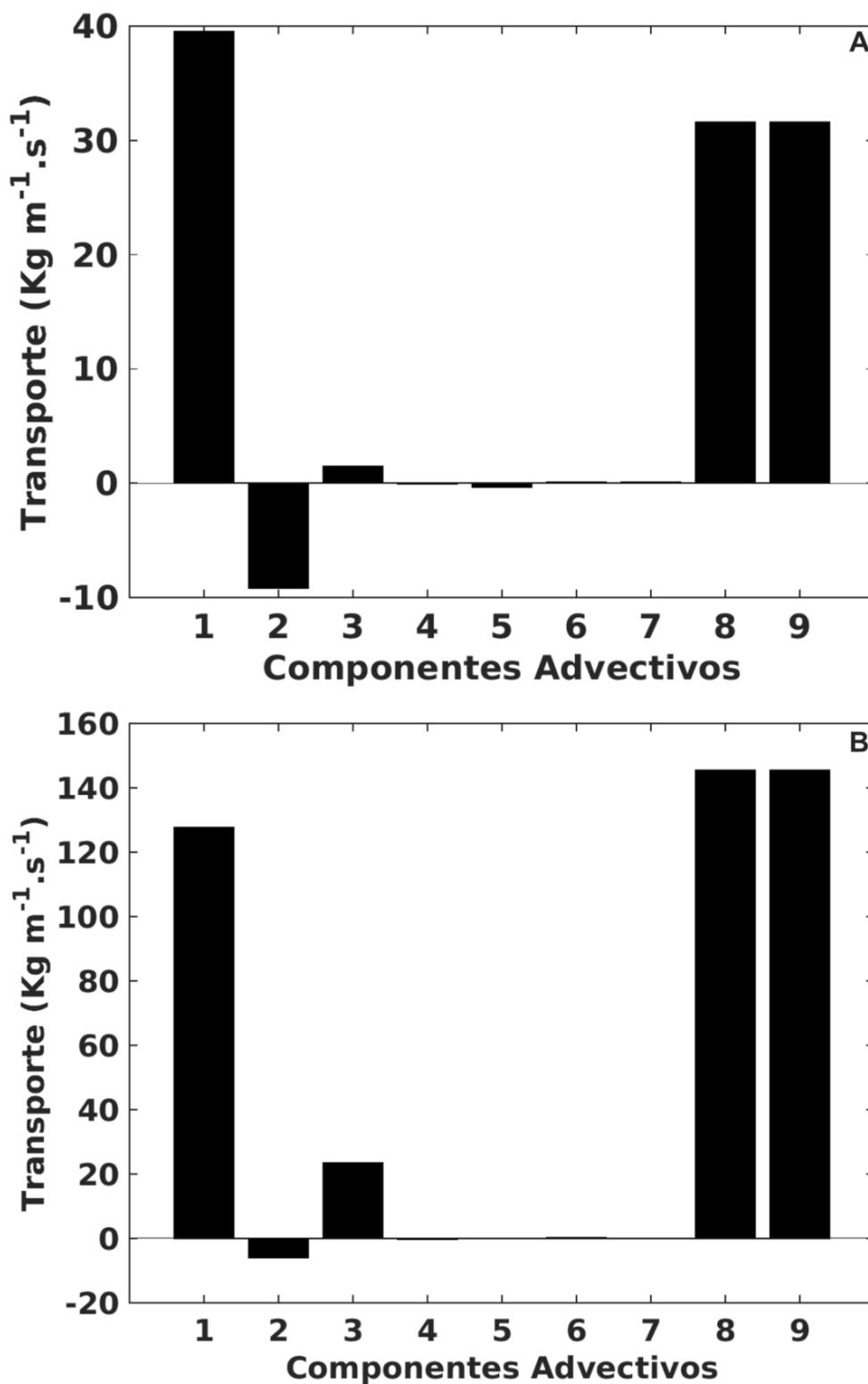
#### 6.4. Transporte de sal na estação de seca

As principais parcelas responsáveis pelo transporte advectivo de sal durante a estação de seca em EST-01 foram a descarga fluvial, a deriva de Stokes e a corrente de maré (Fig. 19A). As parcelas que contribuíram com o transporte de sal estuário abaixo (vazante) foram a descarga fluvial ( $39,55 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) e a corrente de maré ( $1,49 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ), enquanto a deriva de Stokes ( $-9,20 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) contribuiu com o transporte de sal estuário acima (enchente). O transporte total foi de  $31,61 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ , calculado através da somatória das parcelas advectivas e dispersivas.

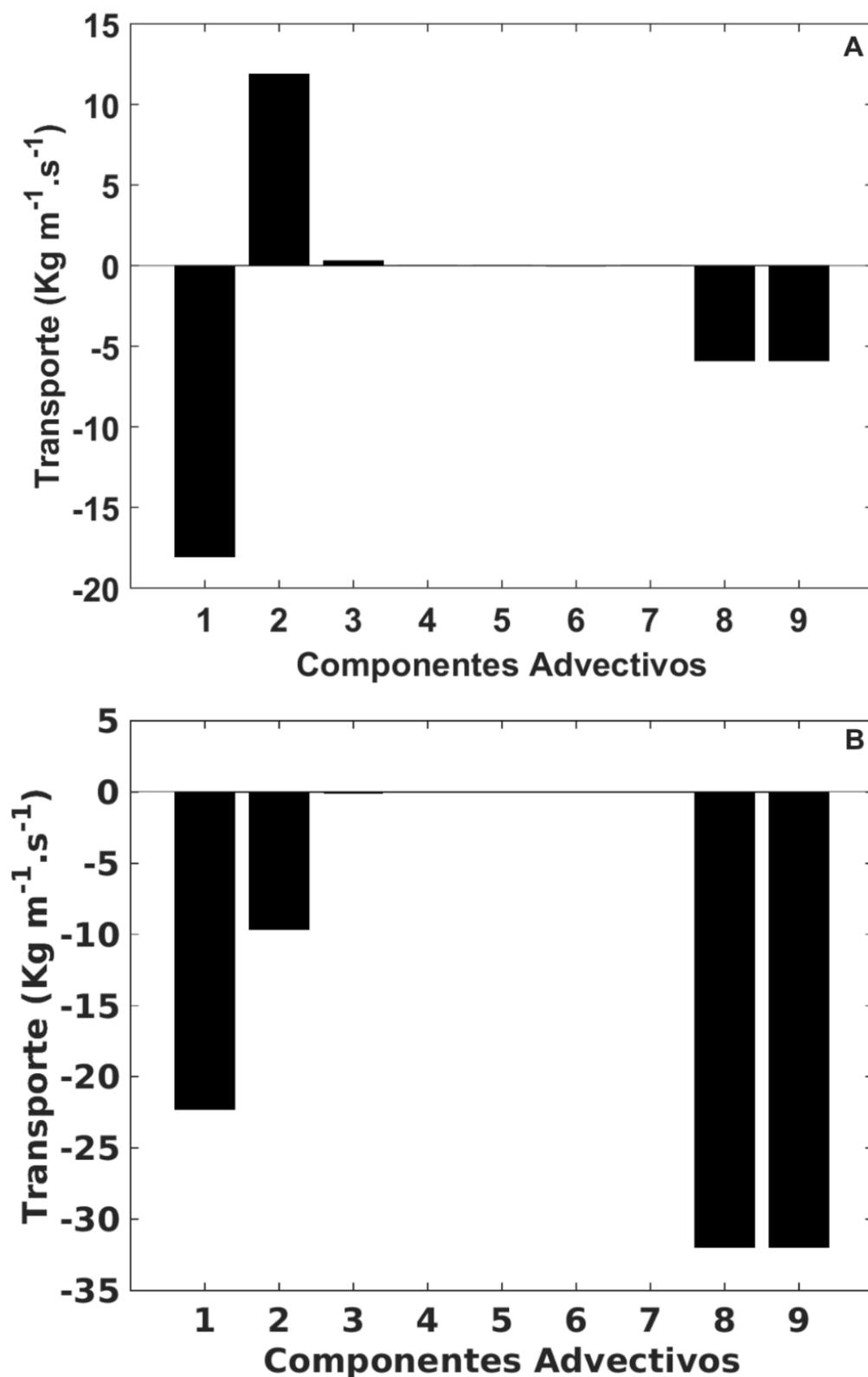
Em EST-02 (Fig. 19B), o valor do transporte total calculado a partir da somatória das seguintes parcelas foi de  $145,50 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ , onde as principais parcelas responsáveis pelo transporte advectivo de sal foram a descarga fluvial ( $127,64 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ), corrente de maré ( $23,50 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) contribuindo com o transporte de sal estuário abaixo e a deriva de Stokes ( $-5,91 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ), estuário acima.

Na região do PC-01, entretanto, as principais parcelas responsáveis pelo transporte advectivo de sal durante a estação de seca foram a descarga fluvial e a deriva de Stokes (Fig. 20A). A descarga fluvial ( $-18,33 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) contribuiu com o transporte estuário acima, enquanto a deriva de Stokes ( $12,13 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) suportou o transporte estuário abaixo.

Em PC-02 durante o mesmo período, o transporte total calculado através da somatória das parcelas advectivas e dispersivas foi de  $-31,95 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ , e as principais parcelas responsáveis pelo transporte advectivo de sal foram a descarga fluvial e a deriva de Stokes. A descarga fluvial ( $-22,27 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) e a deriva de Stokes ( $-9,63 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) contribuíram com o transporte estuário acima (Figura 20B).



**Figura 19.** Componente do transporte advectivo de sal, associado às seguintes forçantes: Descarga fluvial (1); Deriva de Stokes (2); Correntes de maré (3); Circulação gravitacional (4); Difusão turbulenta (5); Dispersão da maré (6); e Circulação residual (7). A soma dessas parcelas está indicada em (8) e o transporte total de sal integrado diretamente ao longo do ciclo de maré em (9). Os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) referentes ao período seco.



**Figura 20.** Componente do transporte advectivo de sal, associado às seguintes forçantes: Descarga fluvial (1); Deriva de Stokes (2); Correntes de maré (3); Circulação gravitacional (4); Difusão turbulenta (5); Dispersão da maré (6); e Circulação residual (7). A soma dessas parcelas está indicada em (8) e o transporte total de sal integrado diretamente ao longo do ciclo de maré em (9). Os fundeios PC-01 (A) e PC-02 (B) referentes ao período seco.

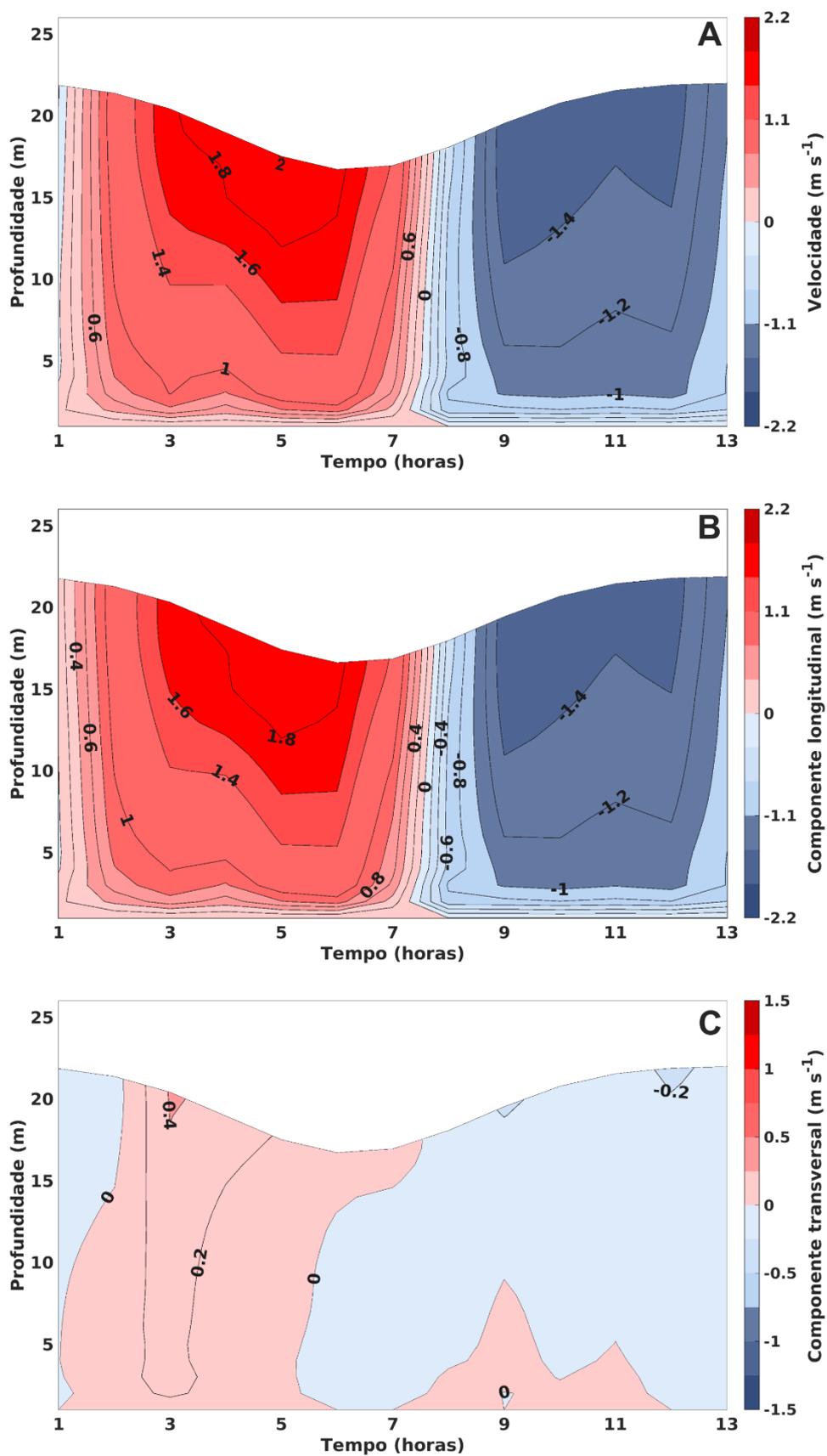
## 6.5. Variação Temporal durante a estação de chuva

### 6.5.1 Circulação Estuarina

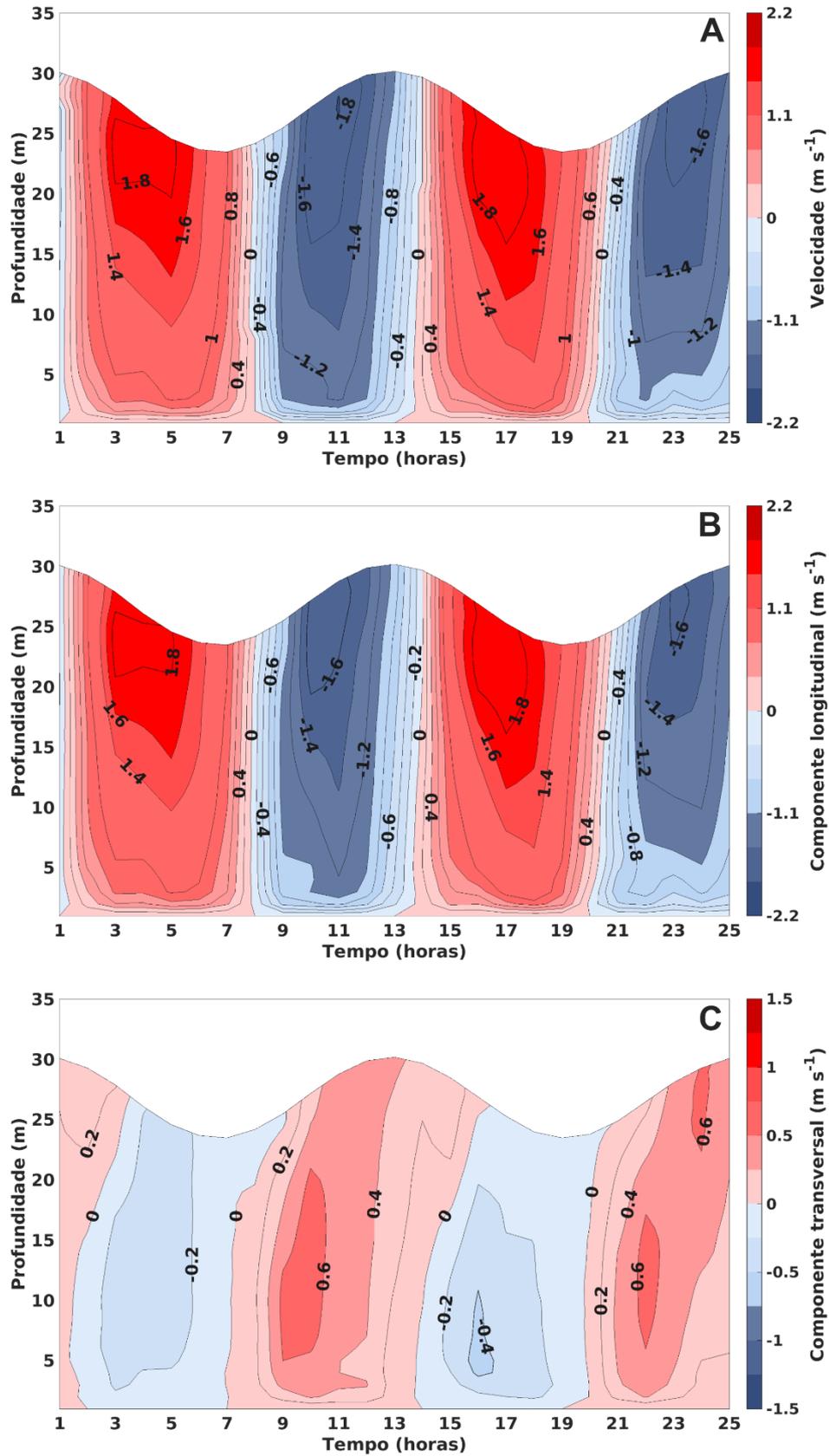
Na região do fundeio EST-01, em maré de sizígia, podemos observar que as velocidades totais variaram de  $-1,4$  a  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ , sendo observadas as maiores velocidades na maré vazante após a hora 3 até a hora 6 (Figura 21A). O perfil da componente longitudinal ( $u$ ) apresentou velocidades máximas 4 horas antes da maré baixa durante a vazante ( $1,8 \text{ m s}^{-1}$ ) e 1 hora após a maré enchente ( $-1,4 \text{ m s}^{-1}$ ) (Fig. 21B), observando comportamento similar às velocidades totais. Entretanto, a componente transversal ( $v$ ) apresentou velocidades máximas de  $-0,2$  a  $0,4 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 21C).

Porém no EST-02, podemos observar dois núcleos definidos de mínimas e máximas velocidades nos dois ciclos de maré (25h), onde os máximos valores ocorreram 4 horas antes da maré baixa durante a vazante ( $1,8 \text{ m s}^{-1}$ ) e 4 horas após a maré baixa durante a enchente ( $-1,8 \text{ m s}^{-1}$ ) (Figura 22A). A componente longitudinal apresentou dois núcleos de máxima velocidade correspondente a  $1,8 \text{ m s}^{-1}$  durante a maré vazante entre as horas 3-4 e 15-17 (Figura 22B). A componente transversal ( $v$ ), por outro lado, apresentou valores variando de  $-0,4$  a  $0,6 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 22C).

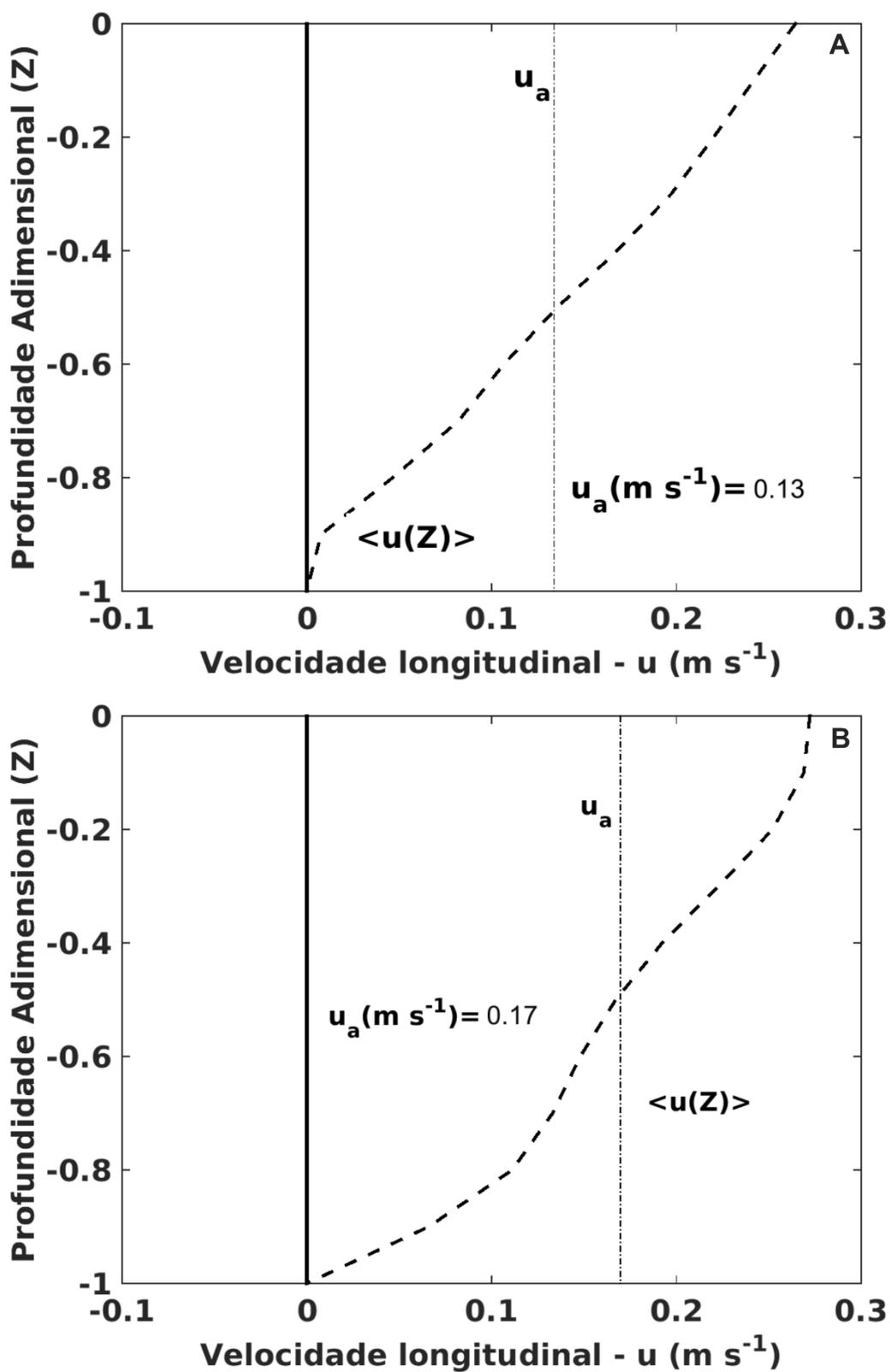
No perfil médio da velocidade ( $\langle u(Z) \rangle$ ) no EST-01, verificamos que as correntes de vazante predominam sobre as de enchente, com correspondente velocidade residual ( $u_a$ ) de  $0,13 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 23A), ou seja, com sentido estuário abaixo. Assim como a predominância da vazante sobre a enchente verificada no EST-02, com a velocidade residual ( $u_a$ ) de  $0,17 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 23B).



**Figura 21.** Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio EST-01 durante a maré sizígia no período de chuva.



**Figura 22.** Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio EST-02 durante a maré sizígia no período de chuva.



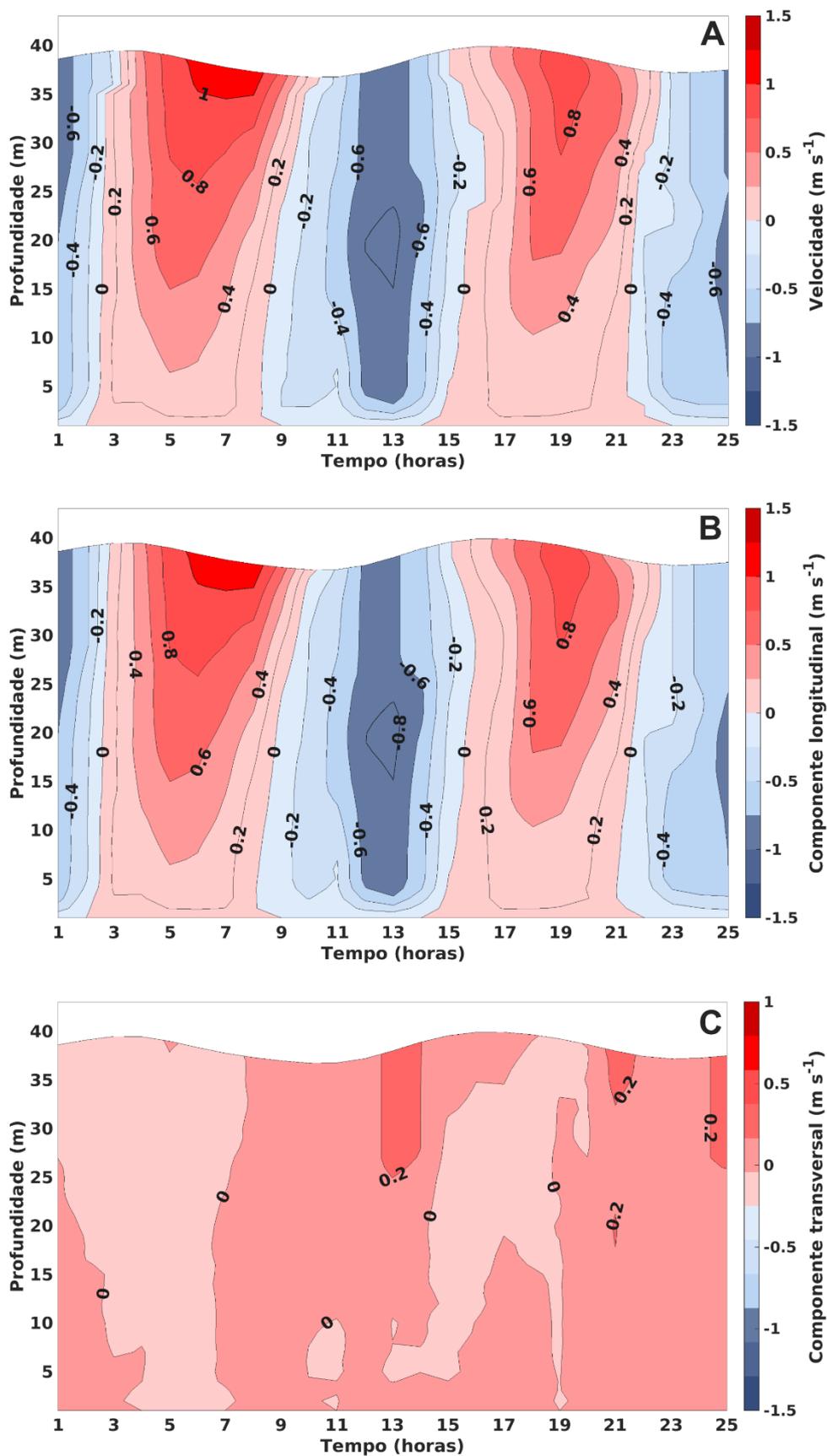
**Figura 23.** Perfis médios da componente longitudinal da velocidade para EST-01 (A) e EST-02 (B) durante a maré sizígia no período de chuva. O  $\langle u(Z) \rangle$  (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade e  $u_a$  (linha tracejada) é a velocidade residual.

### 6.5.2 Circulação da Plataforma Continental

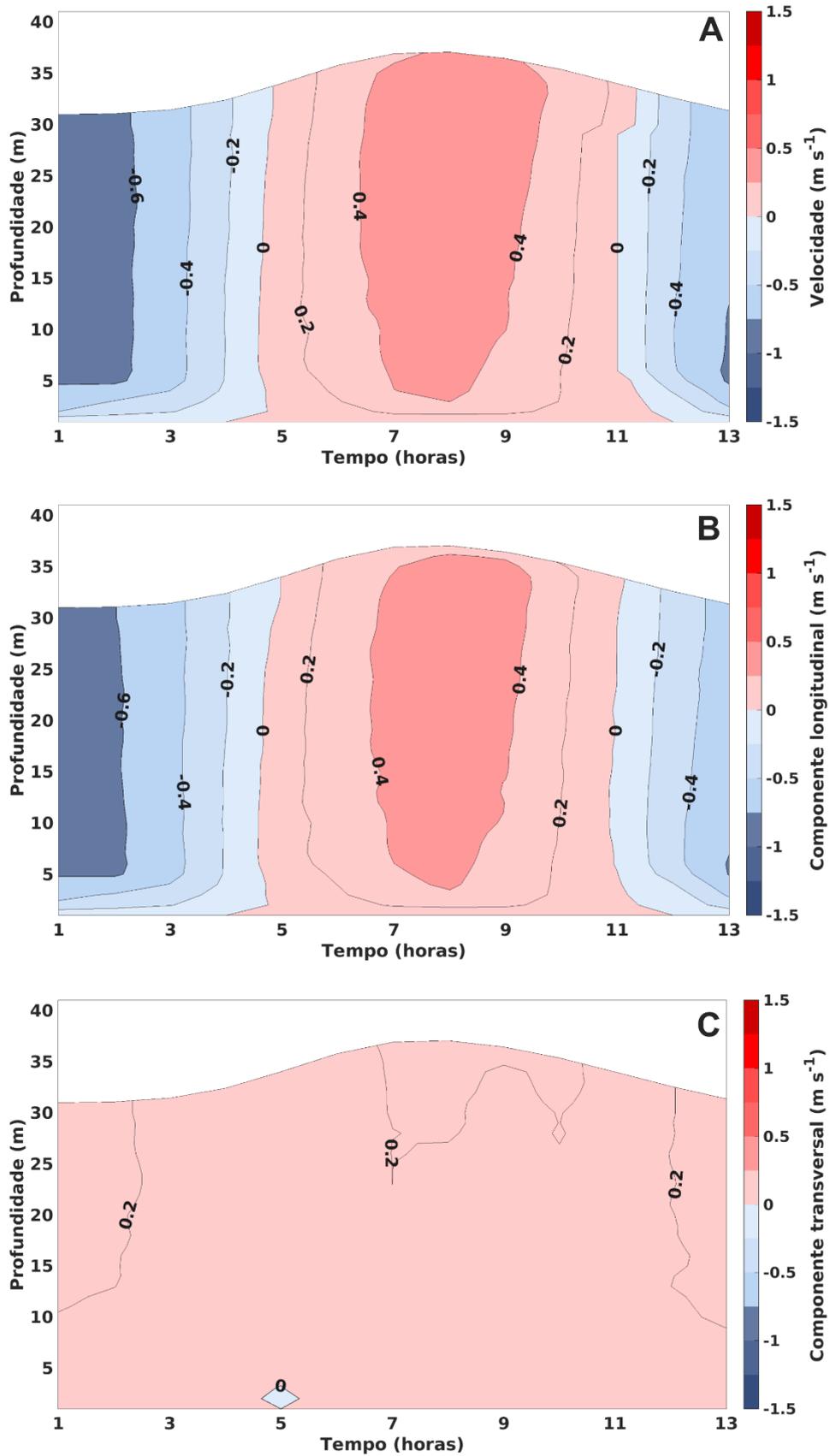
Na região do fundeio PC-01, podemos observar que as velocidades totais variaram de  $-0,6$  a  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ , sendo observadas as maiores velocidades na maré vazante nos dois ciclos de maré (Figura 24A). O perfil de velocidade da componente longitudinal ( $u$ ) apresentou velocidades máximas 4h antes da maré baixa durante a vazante ( $0,8 \text{ m s}^{-1}$ ) e 3 horas antes da maré enchente ( $-0,8 \text{ m s}^{-1}$ ) (Fig. 24B), observando comportamento similar às velocidades totais. Entretanto, a componente transversal ( $v$ ) apresentou velocidades máximas de  $0,2 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 24C).

No fundeio correspondente ao PC-02, podemos observar valores mínimos e máximos de  $-0,6$  durante a hora 1-2 e  $0,4 \text{ m s}^{-1}$  entre a hora 7 e 9, sendo esta velocidade máxima observada durante a maré enchente (Figura 25A). A componente longitudinal apresentou valores de iguais a velocidade total, mantendo 100% do comportamento durante o ciclo completo de maré (Figura 25B). A componente transversal ( $v$ ), por outro lado, apresentou valores variando de  $0,2 \text{ m s}^{-1}$  (Fig. 25C).

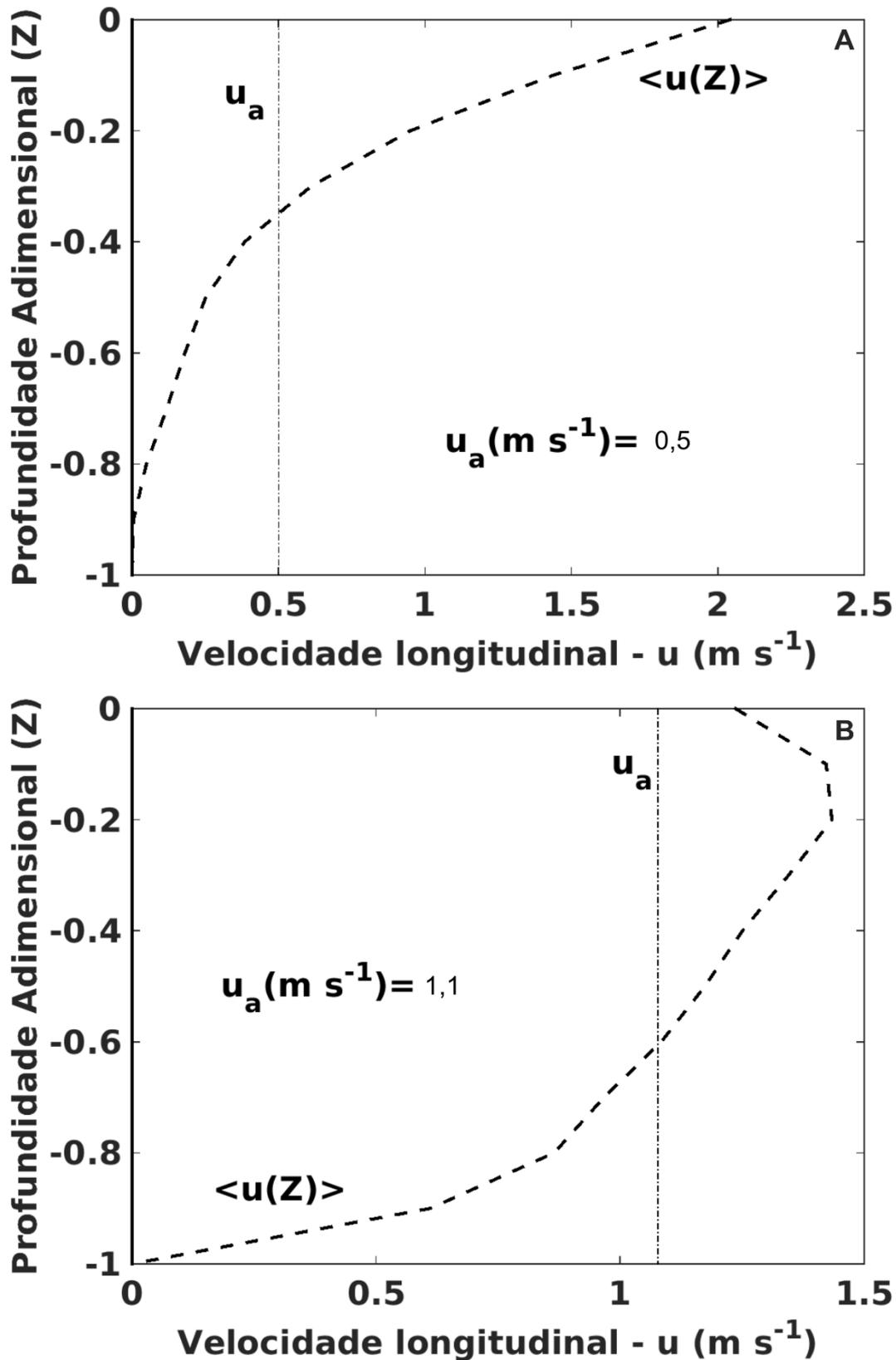
O perfil médio da velocidade ( $\langle u(Z) \rangle$ ) observado nos fundeios PC-01, verificou-se que as correntes de vazante predominam sobre as de enchente, com correspondente velocidade residual ( $u_a$ ) de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 26A), sentido estuário abaixo. Assim como a predominância da vazante sobre a enchente verificada no PC-02, com a velocidade residual ( $u_a$ ) de  $1,1 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 26B).



**Figura 24.** Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio PC-01 durante a maré sizígia no período de chuva.



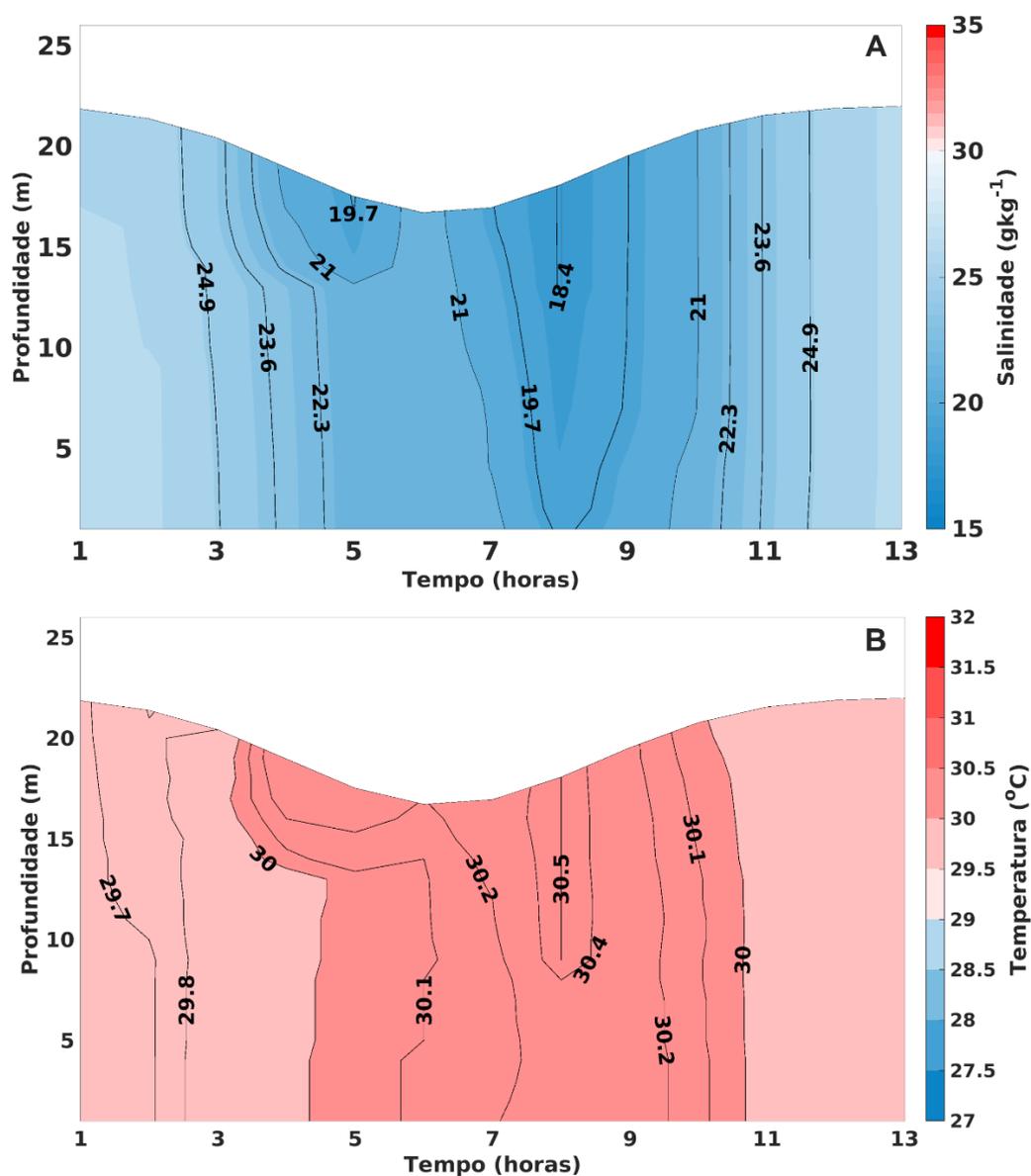
**Figura 25.** Variação vertical e temporal da velocidade total (A), velocidade longitudinal (B) e velocidade transversal (C) para o fundeio PC-02 durante a maré sizígia no período de chuva.



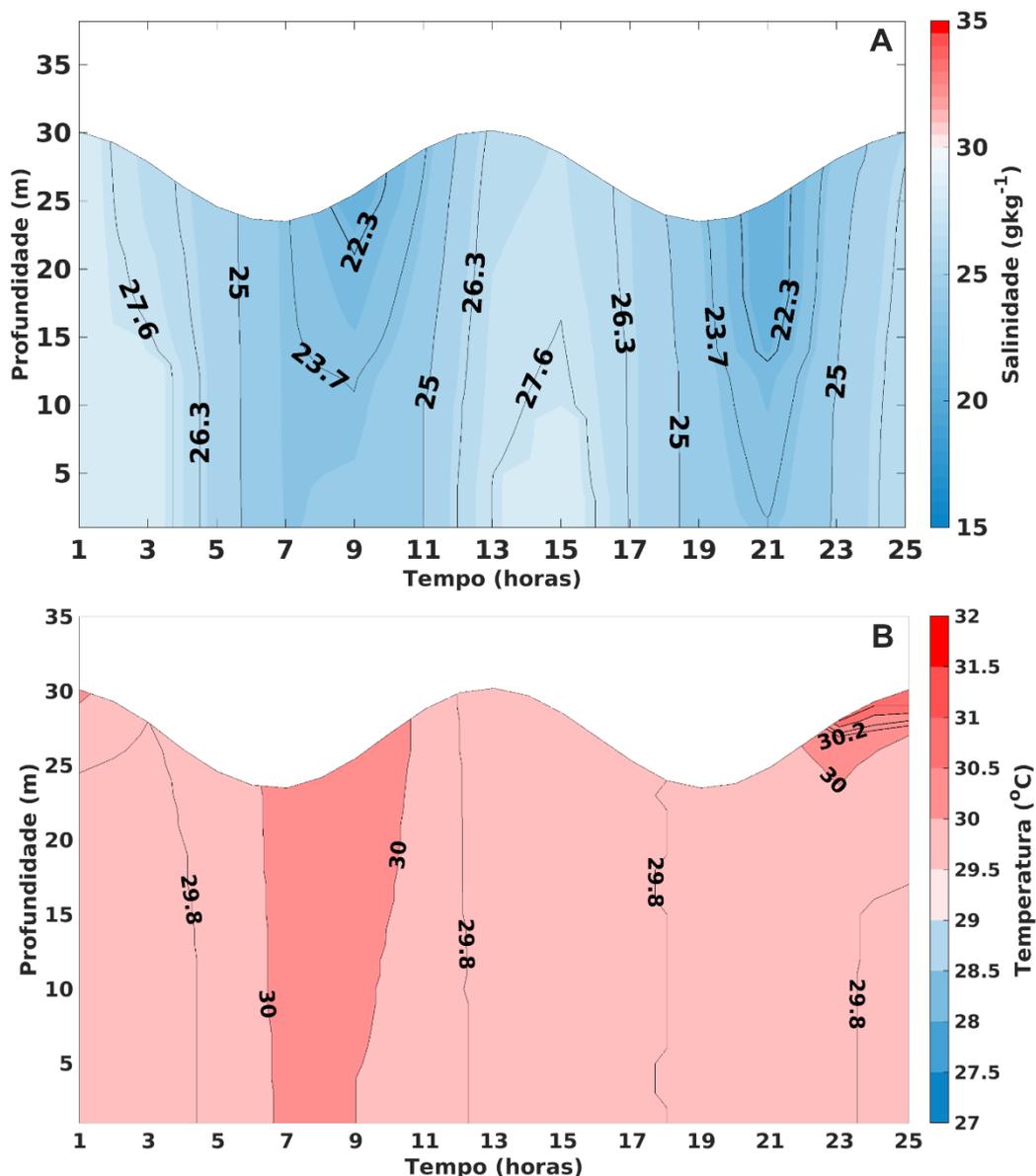
**Figura 26.** Perfis médios da componente longitudinal da velocidade para PC-01 (A) e PC-02 (B) durante a maré sizígia no período seco. O  $\langle u(Z) \rangle$  (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade e  $u_a$  (linha tracejada) é a velocidade residual.

### 6.5.3 Estrutura termohalina estuarina

No fundeio EST-01, a salinidade apresentou um gradiente de  $6,5 \text{ g kg}^{-1}$  ao longo das 13 horas, a mínima observada de  $18,4 \text{ g kg}^{-1}$  ocorreu 2 horas após o início da maré enchente (hora 8) e a máxima de  $24,9 \text{ g kg}^{-1}$  na vazante (Figura 27A). As isotermas, por sua vez, apresentaram um núcleo de valores máximos (30 a  $30,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) no intervalo das horas 4 a 11 (Figura 27B). A salinidade apresentou valores ligeiramente maiores no EST-02, com uma amplitude de  $5,3 \text{ g kg}^{-1}$  ao longo dos dois ciclos de maré (Figura 28A) com valores máximos de  $27,6 \text{ g kg}^{-1}$  durante a maré vazante. A temperatura apresentou valores mínimos e máximos de  $29,8$  a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , demonstrando que a massa de água se encontra homogênea (Figura 28B).



**Figura 27.** Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio EST-01 durante a maré sizígia no período de chuva.



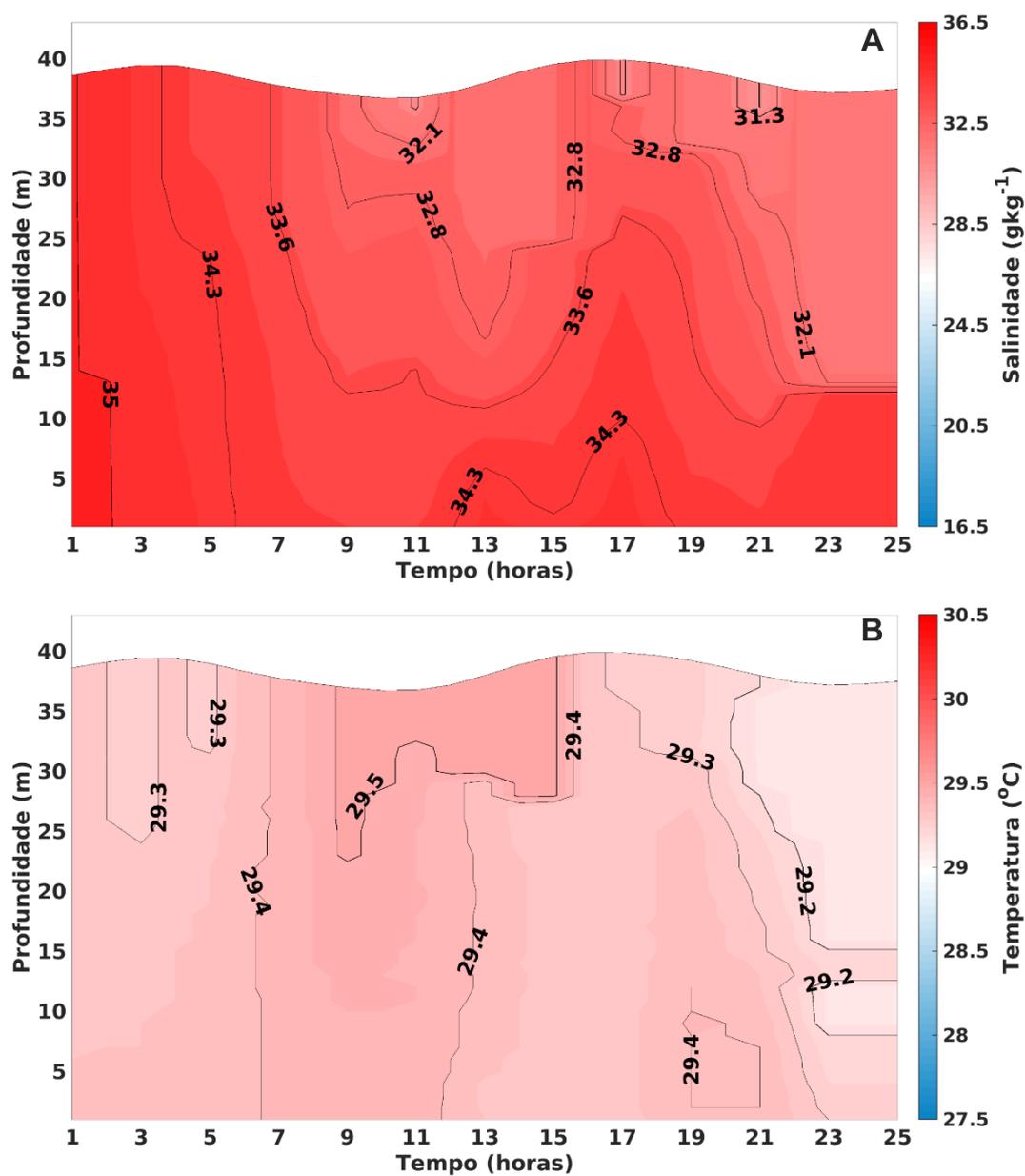
**Figura 28.** Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio EST-02 durante a maré sizígia no período de chuva.

#### 6.5.4 Estrutura Termohalina da Plataforma Continental

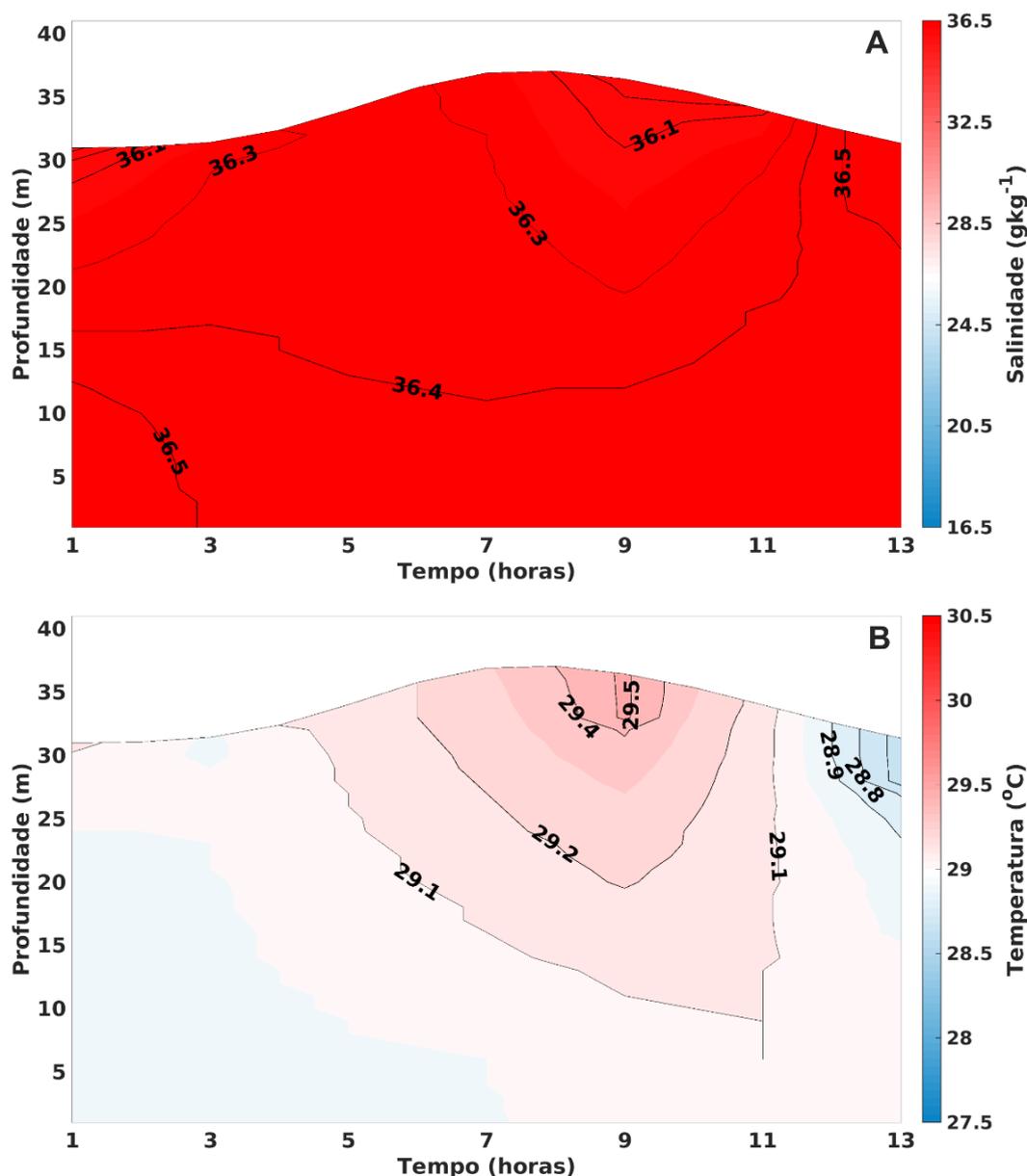
No fundeio PC-01, as isohalinas apresentaram valores mínimos e máximos de 31,3 a 35  $\text{g kg}^{-1}$ , resultando em um pequeno gradiente de 3,7  $\text{g kg}^{-1}$  ao longo dos dois ciclos de maré correspondentes às 25 h (Fig. 29A). As isotermas, por sua vez, não apresentaram valores de variação ao longo dos dois ciclos de maré, onde foi observada mínima amplitude de 0,3  $^{\circ}\text{C}$  (Figura 29B).

A salinidade no PC-02 não apresentou variação, observando máximas isotermas durante a maré enchente (36,3  $\text{g kg}^{-1}$ ) durante a hora 9 (Figura 30A). As isotermas

apresentaram valores máximos durante a enchente (29,5 °C) com amplitude de 0,7 °C ao longo do ciclo de maré (Figura 30B).



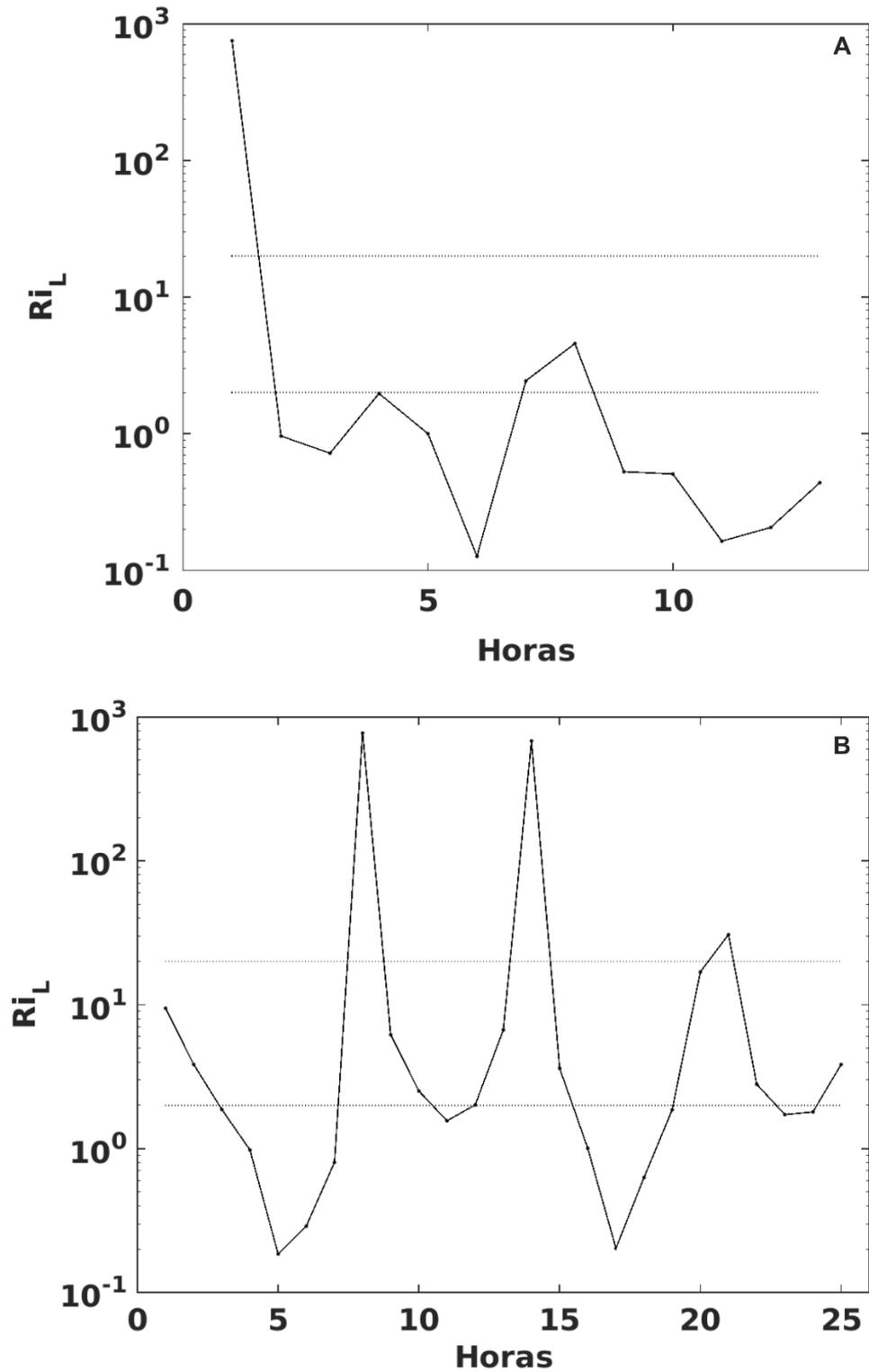
**Figura 29.** Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio PC-01 durante a maré sizígia no período de chuva.



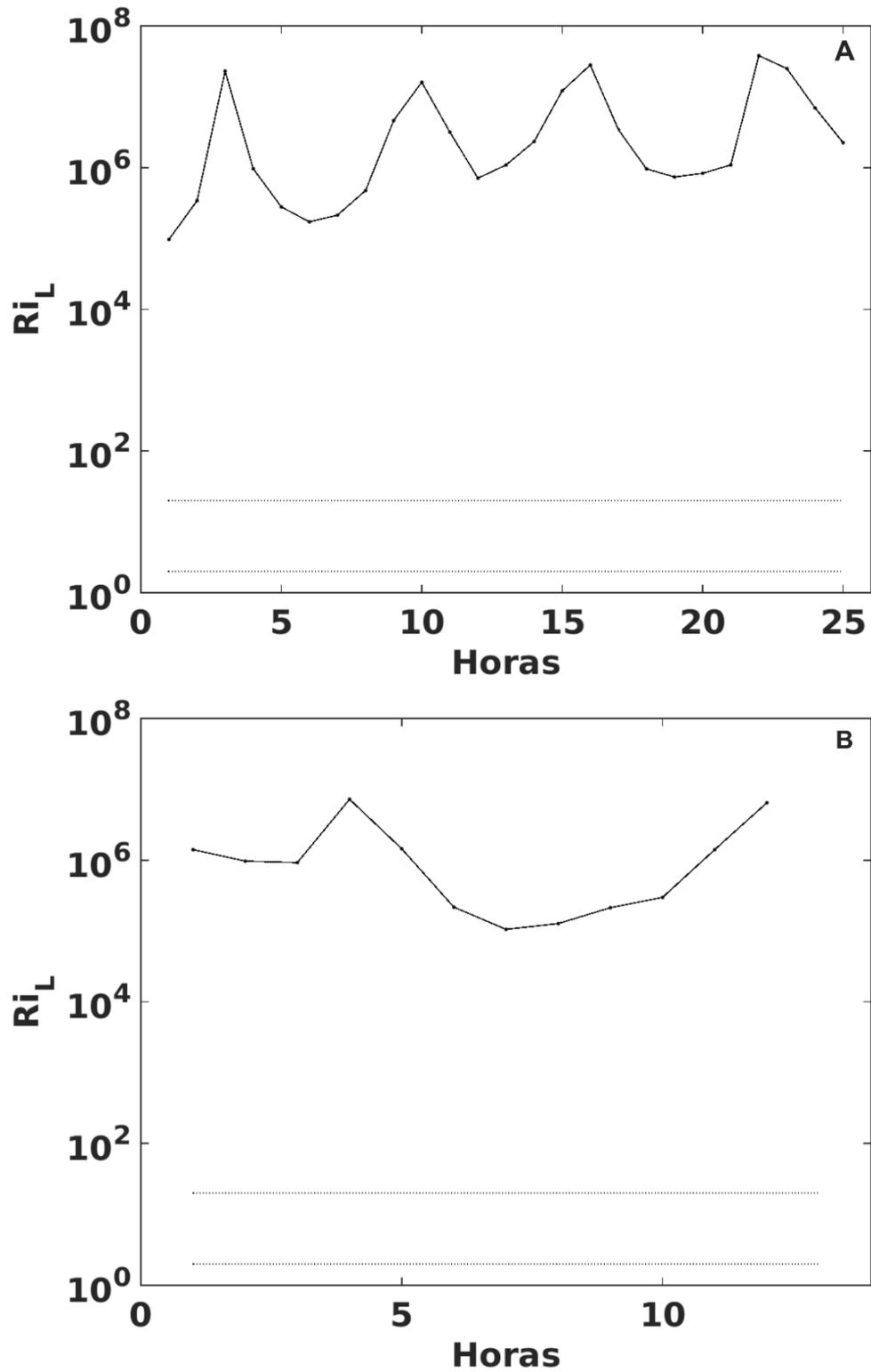
**Figura 30.** Variação vertical e temporal da salinidade (A) e temperatura (B) para o fundeio PC-01 durante a maré sizígia no período de chuva.

#### 6.6. Estabilidade da coluna da água na estação de chuva

As variações temporais do número de Richardson por Camada ( $Ri_L$ ) para a estação chuvosa são apresentadas nas figuras 31 e 32. Nos fundeios estuarinos (EST01 e 02) foram observadas oscilações que resultaram em momentos de alta estabilidade vertical, em especial no EST-02 (Fig. 31B) durante os dois ciclos de maré com  $Ri_L > 10^2$  (hora 8 e 14). Os fundeios da PC-01 e PC-02 (Fig. 32A-B), apresentaram alta estabilidade vertical ( $Ri_L < 20$ ), tendo períodos durante os dois ciclos de maré no PC-01  $Ri_L > 10^6$ .



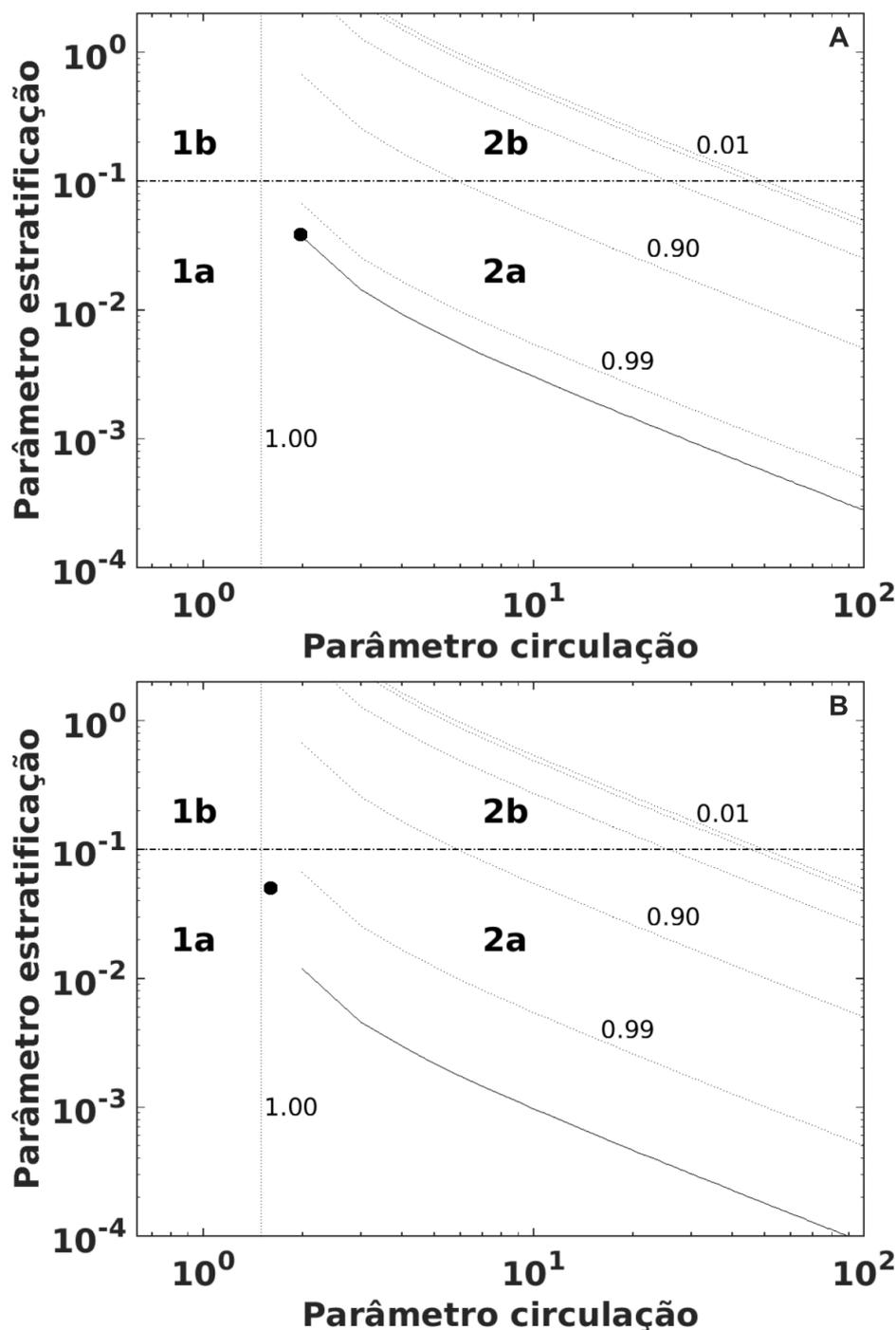
**Figura 31.** Variação temporal do número de Richardson por camada para os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) referentes ao período de chuva.



**Figura 32.** Variação temporal do número de Richardson por camada para os fundeios PC-01 (A) e PC-02 (B) referentes ao período de chuva.

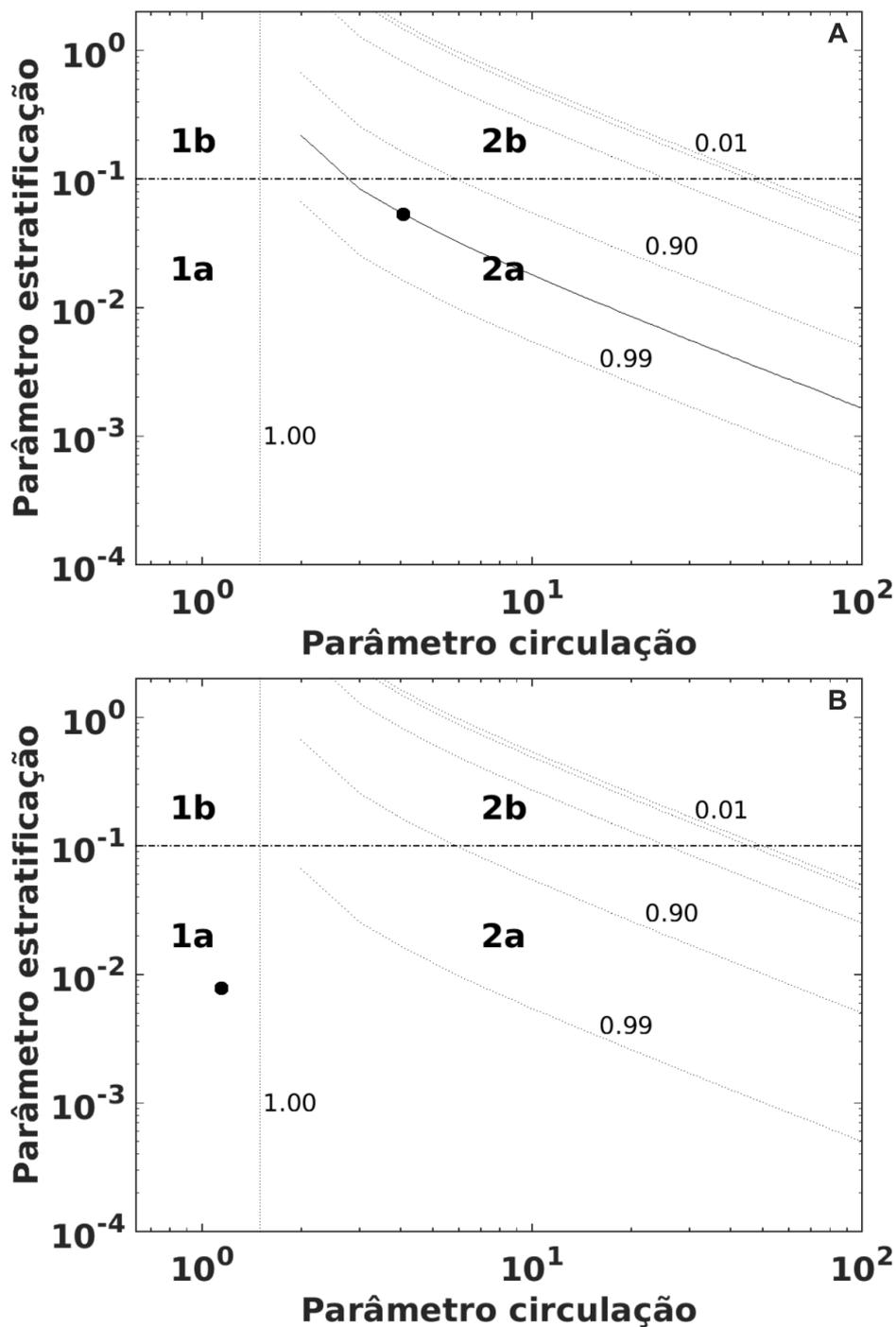
### 6.7. Classificação de estuário na estação de chuva

Durante o período de chuva, as regiões dos fundeios EST-01 e EST-02 mantiveram-se classificados como do tipo a 2a (parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical), assim como na estação seca, neste caso, a circulação gravitacional é praticamente inexistente e o transporte de substâncias estuário acima é basicamente realizado pela difusão turbulenta (Figura 33A-B).



**Figura 33.** Diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966), com isolinhas do parâmetro  $v$  para os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) durante período de chuva.

Entretanto, a região do fundeio PC-01 (Fig. 34A) durante o período de chuva foi classificada como do tipo 2a (parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical), diferentemente da classificação do período seco. Por outro lado, a região do fundeio PC-02 (Fig. 34B) foi classificada como do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado), mantendo-se a classificação durante a estação de seca.



**Figura 34.** Diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966), com isolinhas do parâmetro  $v$  para os fundeios PC-01 (A) e PC-02 (B) durante período de chuva.

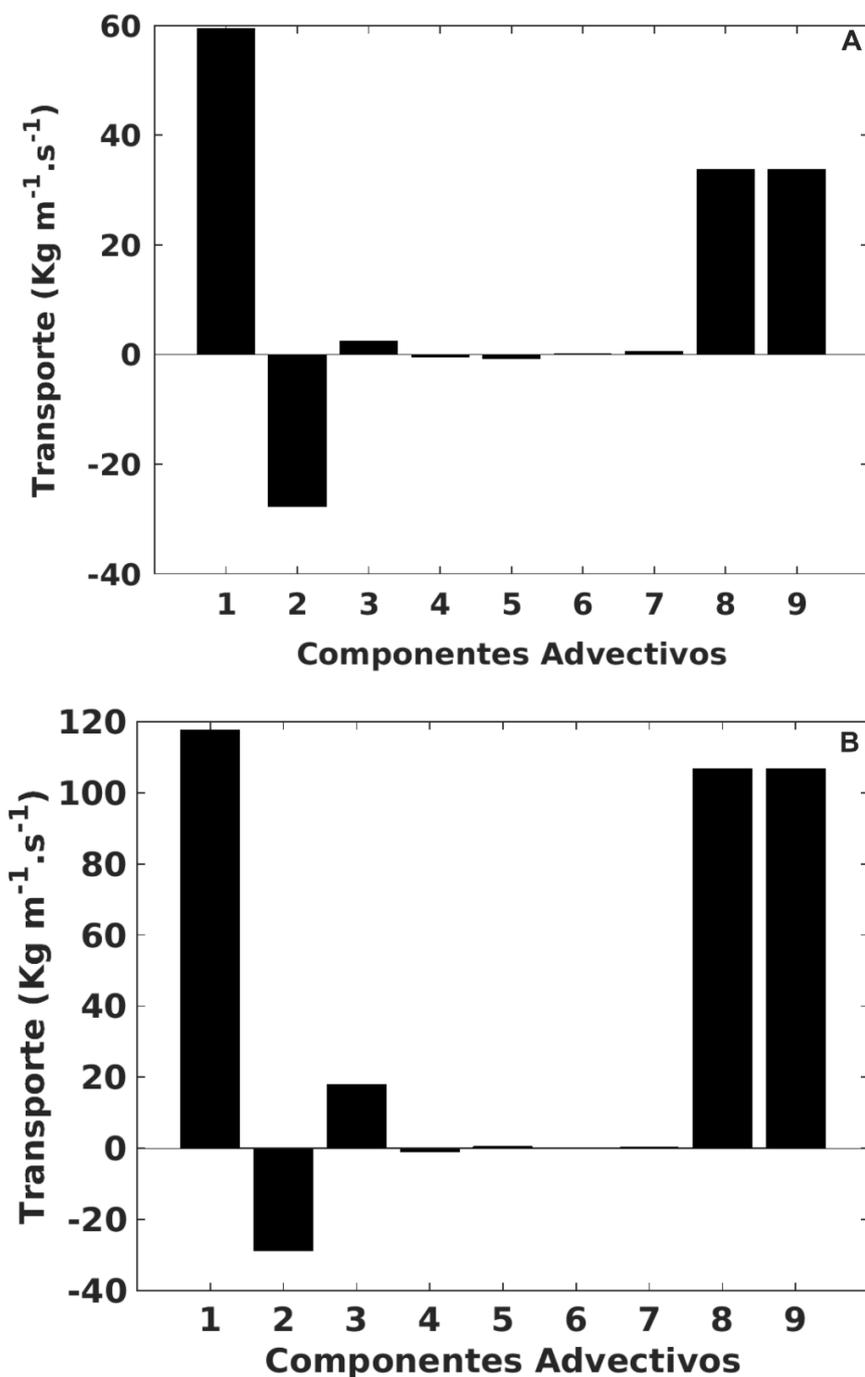
## 6.8. Transporte de sal na estação de chuva

As principais parcelas responsáveis pelo transporte advectivo de sal em EST-01 foram a descarga fluvial, a deriva de Stokes e a corrente de maré (Fig. 35A). As parcelas que contribuíram com o transporte de sal estuário abaixo (vazante) foram a descarga fluvial ( $59,46 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) e a corrente de maré ( $2,45 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ), enquanto a deriva de Stokes ( $-27,65 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) contribuiu com o transporte de sal estuário acima (enchente). O transporte total calculado através da somatória das parcelas advectivas e dispersivas foi de  $33,65 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

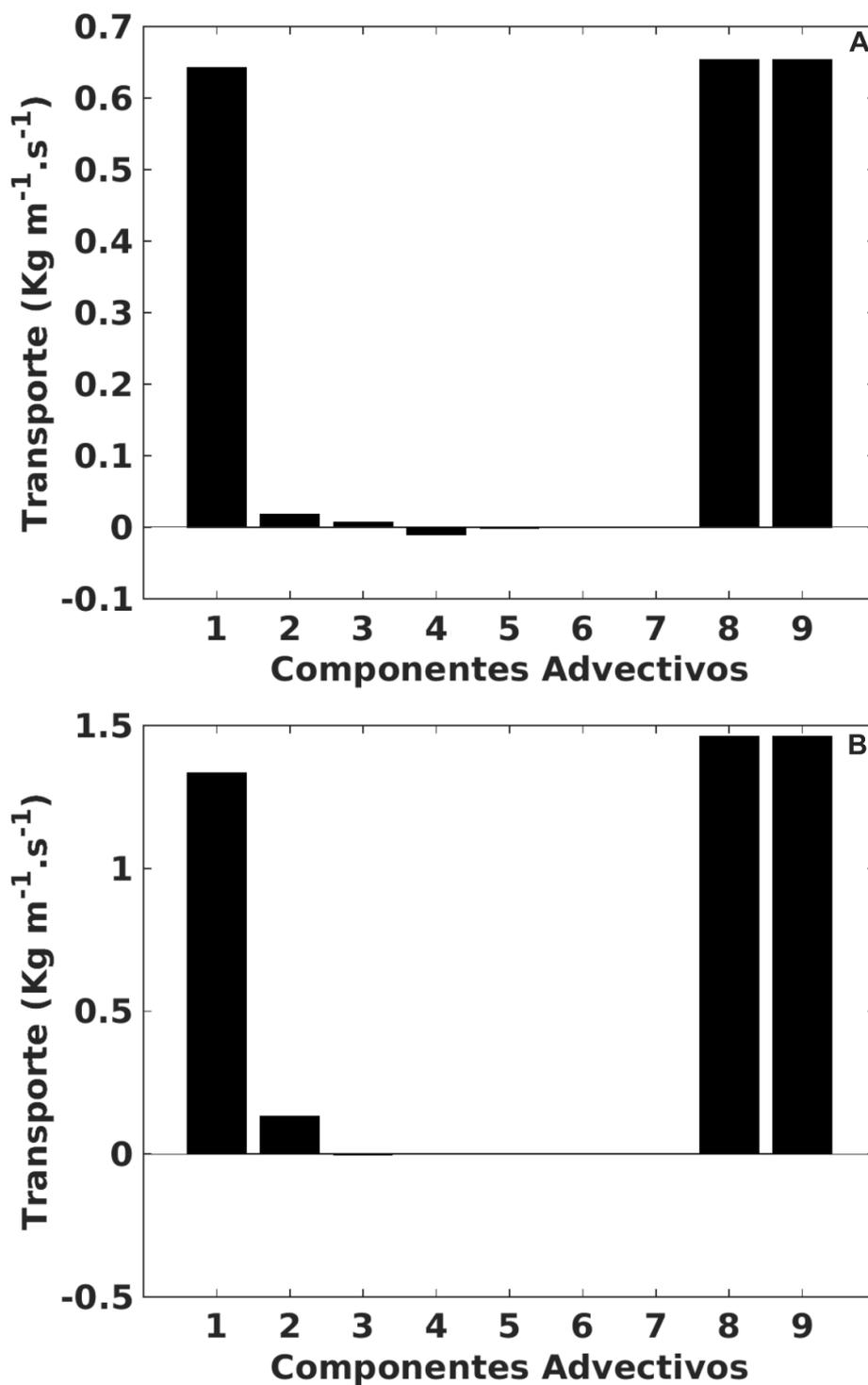
Em EST-02 (Fig. 35B) durante a estação de chuva, o valor do transporte total calculado a partir da somatória das seguintes parcelas foi de  $106,58 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ , onde as principais responsáveis pelo transporte advectivo de sal foram a descarga fluvial ( $117,50 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) e a corrente de maré ( $17,87 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) contribuindo com o transporte de sal estuário abaixo e a deriva de Stokes ( $-28,63 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ), estuário acima.

Para a região do PC-01, as principais parcelas foram a descarga fluvial, a deriva de Stokes e circulação gravitacional (Fig. 36A). A descarga fluvial ( $0,64 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) e deriva de Stokes ( $0,017 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) contribuíram com o transporte estuário abaixo, enquanto a circulação gravitacional ( $-0,010 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) suportou o transporte estuário acima, além disso, o transporte total calculado através da somatória das parcelas advectivas e dispersivas foi de  $0,65 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ , indicando o transporte de sal estuário abaixo.

Em PC-02 durante o mesmo período, o transporte total calculado através da somatória das parcelas advectivas e dispersivas foi de  $1,46 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ , e as principais parcelas responsáveis pelo transporte advectivo de sal durante a estação de seca foram a descarga fluvial e a deriva de Stokes. A descarga fluvial ( $1,33 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) e a deriva de Stokes ( $0,13 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) contribuíram com o transporte estuário abaixo (Fig. 36B).



**Figura 35.** Componente do transporte advectivo de sal, associado às seguintes forçantes: Descarga fluvial (1); Deriva de Stokes (2); Correntes de maré (3); Circulação gravitacional (4); Difusão turbulenta (5); Dispersão da maré (6); e Circulação residual (7). A soma dessas parcelas está indicada em (8) e o transporte total de sal integrado diretamente ao longo do ciclo de maré em (9). Os fundeios EST-01 (A) e EST-02 (B) referentes ao período de chuva.



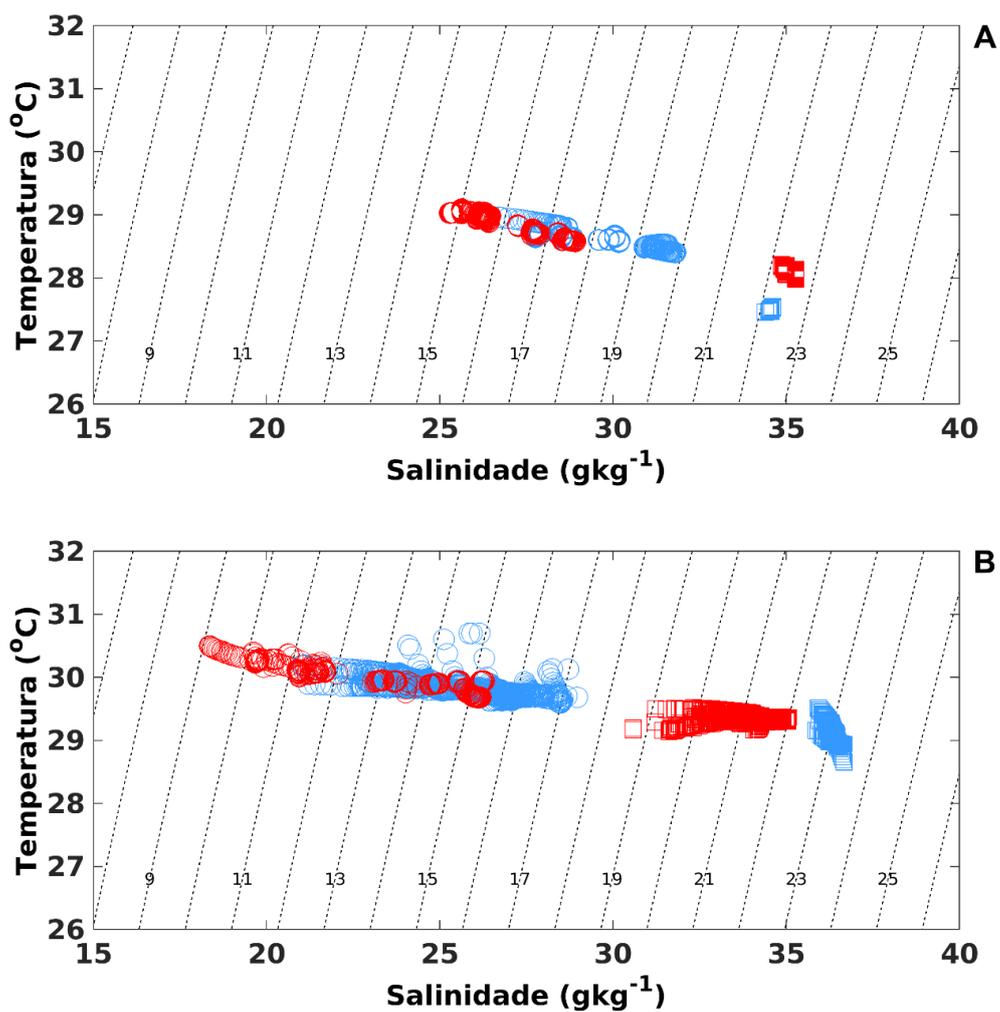
**Figura 36.** Componente do transporte advectivo de sal, associado às seguintes forçantes: Descarga fluvial (1); Deriva de Stokes (2); Correntes de maré (3); Circulação gravitacional (4); Difusão turbulenta (5); Dispersão da maré (6); e Circulação residual (7). A soma dessas parcelas está indicada em (8) e o transporte total de sal integrado diretamente ao longo do ciclo de maré em (9). Os fundeios PC-01 (A) e PCT-02 (B) referentes ao período de chuva.

### 6.9. Massas d'água

A partir das observações obtidas e usando como base os índices termohalinos estabelecidos por Dias, Castro e Lacerda (2013). Observamos que na estação seca para EST-01, os índices termohalinos variaram entre  $29,2 \leq T \leq 28,5$  °C,  $24 \leq S \leq 28$  gkg<sup>-1</sup> e a densidade (representada pelo símbolo  $\sigma_t$ ) entre 14 e 18 kgm<sup>-3</sup>; enquanto para EST-02 observou  $28,2 \leq T \leq 29,2$  °C,  $26,5 \leq S \leq 32,0$  gkg<sup>-1</sup> e a densidade entre 16 e 20 kgm<sup>-3</sup>. Assim para os fundeios da plataforma continental, onde em PC01 os índices termohalinos variaram entre  $27,8 \leq T \leq 28,2$  °C,  $34,7 \leq S \leq 35,5$  gkg<sup>-1</sup> entre os limites isopicnais de  $22 \leq \sigma_t \leq 23$  kgm<sup>-3</sup> e PC02 com  $27,5 \leq T \leq 27,1$  °C,  $34 \leq S \leq 38,8$  gkg<sup>-1</sup> entre as isopicnais de  $22 \leq \sigma_t \leq 23$  kgm<sup>-3</sup> (Figura 37A).

Por sua vez, nas observações na estação chuvosa, os índices TS variaram entre  $18 \leq T \leq 26$  °C e  $29,5 \leq S \leq 30,8$  gkg<sup>-1</sup>, entre os limites isopicnais de  $9 \leq \sigma_t \leq 16$  kgm<sup>-3</sup> no EST-01;  $29,4 \leq T \leq 30,9$  °C e  $20,2 \leq S \leq 29$  gkg<sup>-1</sup>, entre os limites isopicnais de  $11 \leq \sigma_t \leq 18$  kgm<sup>-3</sup> no EST-02. Assim para os fundeios da plataforma continental, onde em PC01 os índices termohalinos variaram entre  $29 \leq T \leq 29,6$  °C,  $30 \leq S \leq 35$  gkg<sup>-1</sup> entre os limites isopicnais de  $18 \leq \sigma_t \leq 23$  kgm<sup>-3</sup> e PC02 com  $29,5 \leq T \leq 28,5$  °C,  $36,5 \leq S \leq 35,1$  gkg<sup>-1</sup> entre as isopicnais de  $22 \leq \sigma_t \leq 24$  kgm<sup>-3</sup> (Figura 37B).

O diagrama TS espalhado teve uma pequena inclinação das isopicnais ( $\sigma_t$ ), resultante da variação da temperatura e salinidade.



**Figura 37.** Diagrama TS espalhado referente aos quatro fundeios no período seco (A) e período chuvoso (B), para o EST-01 (o vermelha); EST-02 (o azul); PC-01 (□ vermelho) e PC-02 (□ azul).

## 7. DISCUSSÕES

As velocidades longitudinais durante o período de balanço hídrico negativo (seca), apresentaram um escoamento bidirecional ao longo de todos os fundeios estuarinos, mostrando uma grande contribuição da maré na circulação do CESM. Os resultados mostraram uma diferença de até 60% entre as máximas das regiões EST-02 > PC-01 (2,0 a 0,8 m s<sup>-1</sup>) e 20% para PC-02 > PC-01 (1,0 a 0,8 m s<sup>-1</sup>) durante a maré vazante; estes valores para a maré enchente resultaram em uma redução das intensidades em 55,5% entre EST02 > PC-01 (-1,8 a -0,8 m s<sup>-1</sup>) e 50% para PC-01 > PC-02 (-0,8 a -0,4 m s<sup>-1</sup>). Para o período de balanço hídrico positivo (chuva), os perfis de velocidade para EST02 > PC01 (1,8 a 1 m s<sup>-1</sup>) apresentaram 44% de redução nas intensidades e 60% entre os perfis PC-01 > PC-02 (0,4 a 1,0 m s<sup>-1</sup>); estes valores para a maré enchente mostraram uma redução de 66% das intensidades entre EST-02 > PC-01 (0,4 a 1,0 m s<sup>-1</sup>), enquanto os perfis de PC-01 e PC-02 apresentaram simétricos (-0,6 m s<sup>-1</sup>).

A intensificação das velocidades da componente longitudinal encontradas em EST-02, em comparação aos fundeios localizados na plataforma continental (PC-01 e PC-02), assim como em EST-01, provavelmente estão relacionadas ao afunilamento do CESM, uma vez que, de acordo com (Miranda, Castro e Kjerve, 2002; Carmo, 2022), um afunilamento do canal do estuário resulta em um aumento das correntes do ambiente (Teorema de Bernoulli), o que certamente explica esta intensificação. Estes resultados corroboram com os dados apresentados por Lima (2019) em estudo realizado na mesma região do CESM e com o estudo realizado por Segundo (2015) no estuário do rio Caeté (Pará), evidenciando que a onda de maré quando entra no interior da baía, a sua altura é amplificada devido ao afunilamento, alterando as circulações no seu interior através dos processos dinâmicos de maré. Por outro lado, as reduções das velocidades observadas na plataforma continental, podem estar relacionadas à largura da mesma, já que as PCs localizadas em baixas latitudes, apresentam-se geralmente mais largas (Santos, 2018a) e tais dados corroboram com os apresentados por Dias (2011) na Plataforma Continental do Ceará, onde evidenciou que há ocorrência de maiores velocidades na região mais próxima à costa e as intensidades diminuem em direção ao largo.

Os perfis médios temporais de velocidade, na circulação estuarina, apresentaram movimentos unidirecionais predominantes de vazante (estuário abaixo), ou seja, as correntes de vazante predominam sobre as de enchente e ao considerarmos a velocidade residual, obtivemos valores de 0,15 e 0,17 m s<sup>-1</sup>, estes movimentos são característicos de

estuários bem misturados e os valores residuais sugerem que há um balanço de água nulo no período seco. Já os fundeios da plataforma continental apresentaram movimentos predominantes de enchente (estuário acima). Em contrapartida, durante o balanço hídrico positivo, em ambas as interfaces, apresentaram movimentos predominantes de vazante (estuário abaixo), este comportamento foi observado também por Santos (2018a) em fundeios realizados ao longo do CEASJ com velocidades em maré vazante 12% mais energéticas que as de enchente para esta região.

Ao avaliar as variáveis de estado no presente estudo, podemos observar que a temperatura foi quase constante durante todo o período analisado, com valores variando de 27,5 a 30,7 °C. O aquecimento observado especialmente durante a estação chuvosa (abril/maio) em comparação a seca (setembro/outubro), pode estar associado ao aumento dos fluxos fluviais no sistema estuarino, uma vez que águas continentais são devidamente mais quentes do que as marinhas. Dessa forma, pode considerar que os perfis de temperatura praticamente não apresentaram grandes variações estando em conformidade com os dados apresentados para o CESM descritas por Lima (2019) e por Cafermane (2021) em um estuário em Moçambique, verificando temperaturas uniformes e com temperaturas mais elevadas durante a estação chuvosa.

Em relação ao gradiente de salinidade, obteve-se perfis bem misturados ao longo de todo o estudo, havendo diferenças entre os fundeios estuarinos e da PC nas duas estações de estudo. Durante o período seco, foram observados elevados valores de salinidade nos fundeios PC-01 e 02, cuja variação foi de 34 a 35 g.kg<sup>-1</sup> em contrapartida ao EST-01 e 02 com valores de 25,8 a 31,8 g.kg<sup>-1</sup>. Entretanto, durante a campanha posterior, o período chuvoso apresentou salinidade característica de águas estuarinas, com valores variando de 18,4 a 27,6 g.kg<sup>-1</sup> para EST-01 e 02, enquanto variou de 31,3 a 36,5 g.kg<sup>-1</sup> para os fundeios da plataforma. A partir desses dados, nota-se maior influência dos fluxos fluviais nos fundeios localizados no CESM em comparação ao período seco, porém esta influência não é observada de forma direta nos fundeios da PC, embora tenha apresentado uma redução nos valores de salinidade em PC-01 durante a chuva.

Ao compararmos estes resultados com os dados do CESM apresentados por Lima (2019), nota-se diferenças e dados que não corroboram entre si nos fundeios estuarinos, tendo em vista que foram encontrados valores de salinidade > 35 g.kg<sup>-1</sup> durante a chuva, do qual o autor sugeriu e atribuiu ser um atraso do volume hídrico ocorrido em fevereiro de 2017, pois este mês apresentou elevada precipitação (350 mm) mas a maior influência dos fluxos fluviais foi observada somente em junho (final da chuva). É importante

considerar que o período de amostragem realizado por Lima (2019) correspondente a chuva foi em fevereiro, diferente deste estudo que ocorreu em abril, tal fato sugere que a amostragem feita em fevereiro não considera a estação chuvosa em sua totalidade, assumindo que a descarga fluvial está iniciando sob a bacia de drenagem e ainda não chegou nos pontos amostrais em determinado período. Ressalta-se também que o volume precipitado nos dois períodos foi diferente, uma vez que abril de 2021 apresentou precipitação 23% acima (480 mm) da amostrada por Lima (2019) e mencionada acima.

A partir do espalhamento dos pares  $TS$  deste estudo, no período seco, constatou-se a presença de uma massa de Água Estuarina (AE) no fundeio EST-01, estando restrita entre as isopicnais de  $14 < \sigma_t < 19 \text{ kg m}^{-3}$  e a presença de AC (Água Costeira) entre os limites isopicnais de  $20 < \sigma_t < 23 \text{ kg m}^{-3}$  para os demais fundeios. Durante o período chuvoso, observou um aumento dos volumes fluviais no CESM, com a presença de AE para EST 01 a 02; AF (Água de Frente), oriunda do processo da descarga fluvial e os processos de mistura com AC ( $30 < S < 33 \text{ g kg}^{-1}$ ) e AC para os fundeios da PC, provenientes da mistura entre AF e águas marinhas ( $S > 33,1 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Fig. 38).

Ao observar o avanço de águas marinhas continente adentro, apresentado durante a estação seca, pode-se considerar que a minimização dos fluxos pluviométricos sobre a bacia de drenagem durante este período, favorece este cenário, uma vez que a redução do volume de água doce no estuário, permite a ocorrência de intrusão salina estuário acima, alinhando a presença da AC ( $\sigma_t > 20$ ) no EST-02, fundeio situado na desembocadura dos rios Salgado (município de Alcântara) e Anil (São Luís) (Figura 1). Estes dados corroboram com outros estudos realizados no CESM, onde mostraram a presença de água estuarina no período seco (Maia, 2018; Silva Junior, 2017). E assume-se que as PCs apresentam águas mais quentes e salinas, devido a pequena razão de aspecto (razão entre os comprimentos verticais e horizontais) e maior atuação da radiação solar, associadas a presença de grandes descargas fluviais na Plataforma Continental Interna (PCI) (Santos, 2018a).

Associado a estes resultados, foram observadas mudanças no transporte advectivo de sal e um não balanceamento das parcelas, mostrando que o CESM é sensível quanto a descarga fluvial e maré ao longo do estudo. Em todos os fundeios, as parcelas principais foram a descarga fluvial e deriva de Stokes, com comportamento oposto entre elas, onde a descarga fluvial resultou transporte estuário abaixo enquanto a deriva de Stokes com sentido acima, na maioria dos fundeios.

Para o período seco, o EST-01 apresentou um transporte de sal estuário abaixo, associado à descarga fluvial (1), correspondendo a 76% de todo o transporte de sal, sendo uma região exportadora de sal, ou seja, esta parcela advectou o sal para fora do CESM. Do mesmo modo, EST-02 correspondendo 95% do transporte de sal estuário abaixo, comportando-se também como um importante exportador de sal. Em contrapartida, o PC-01 apresentou um transporte de sal estuário acima, associado à descarga fluvial com 33% e atuando como um importador de sal, assim como PC-02 contribuindo com 56% da descarga fluvial e deriva de Stokes.

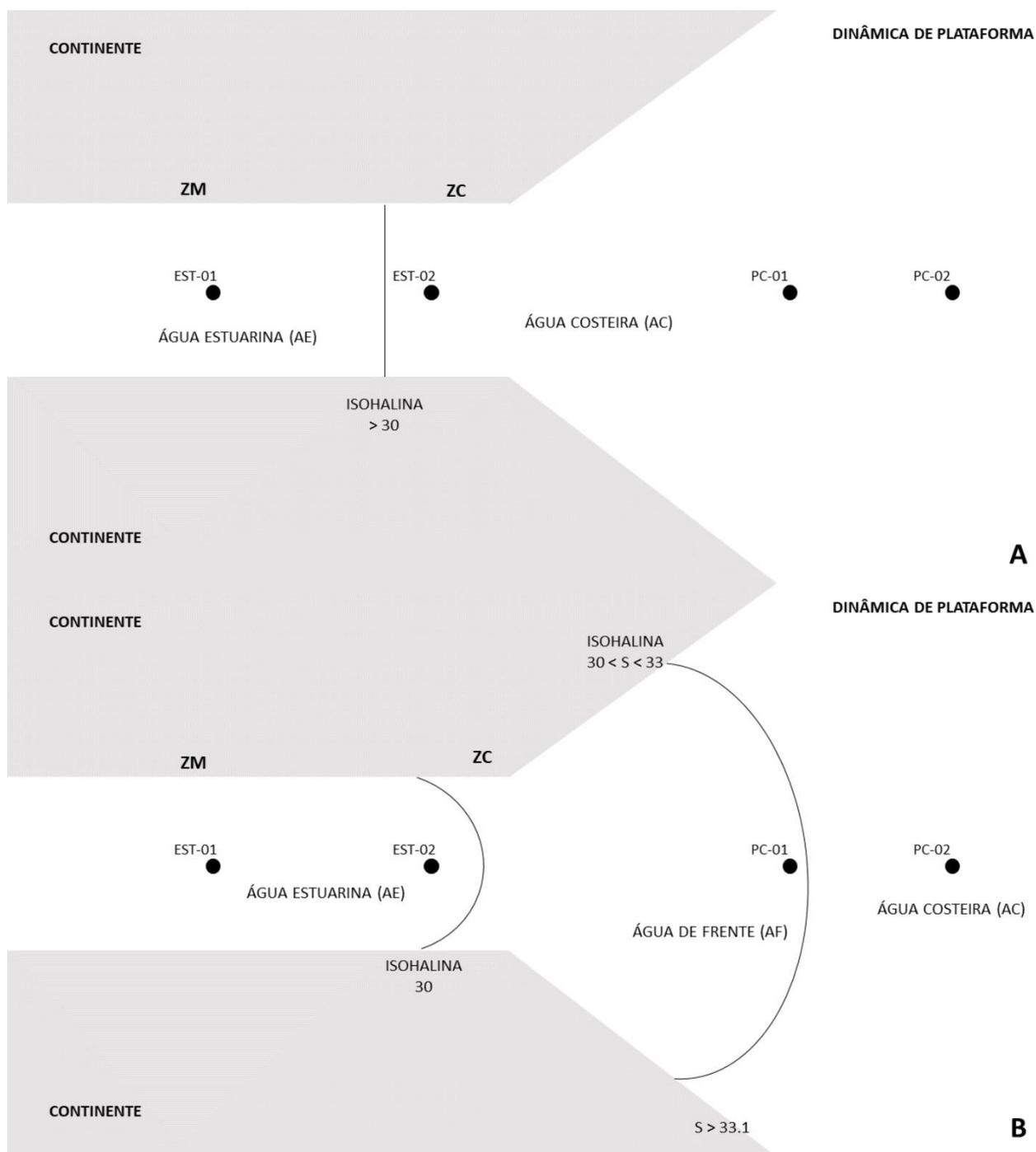
Para o período chuvoso, em ambos os fundeios, foi observado o transporte de sal estuário abaixo, ou seja, as regiões se comportaram como exportadoras de sal, sendo a descarga fluvial a principal parcela que advectou sal para fora do CESM e aos fundeios da plataforma continental. Estes por sua vez, tiveram a contribuição das parcelas de descarga fluvial e deriva de Stokes de forma equivalente ao transporte estuário abaixo.

Tais resultados corroboram com os apresentados por Lima (2019) e outros estudos (Cavalcante, Miranda e Medeiros, 2017; Miranda, Bergamo e Castro, 2005), principalmente ao verificar as inversões de sentido do transporte de Stokes, que pode estar associada às forças de atrito e a geometria do CESM, pois levando em consideração o cálculo do transporte advectivo de sal em um estuário, este sistema deve ser aproximado para um estuário ideal (com geometria simples e sem atrito) em condições estacionárias.

Os padrões de variação do  $Ri_L$  apresentados durante a estação seca nos fundeios estuarinos (EST 01-02), indicaram que a turbulência foi efetiva para gerar a mistura vertical na maior parte do tempo ( $Ri_L < 2$ ), em contrapartida para os dados obtidos na PC adjacente (PC-01) e (P02) apresentando alta estabilidade vertical em alguns momentos. Este mesmo comportamento de instabilidade vertical foi observado por Lima (2019) em fundeios realizados durante a seca de 2017 no CESM e no CEASJ por Santos (2018a), onde a maior atuação da maré gerou instabilidade vertical. Para a estação chuvosa, onde os dados obtidos em especial para EST-02, PC01-02 indicaram que a mistura foi pequena, tornando o estuário bem estável e não havendo mistura vertical. Tais resultados corroboram com os dados apresentados por Souza (2015) no estuário do rio São Francisco (AL/SE) que observou este mesmo comportamento de estabilidade vertical durante maré de sizígia. No estuário paraense de Caeté, Cavalcante, Feary e Kjerfve (2013) observaram condições de alta instabilidade e estabilidade vertical, estes por sua vez, associados instantes de estofa de maré, aumentando a estratificação vertical da coluna d'água (LIMA, 2019).

A partir do diagrama estratificação-circulação de Hansen e Rattray (1966), o CESM a partir dos fundeios EST01 e 02 foi classificado como um estuário parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical (tipo 2a) em todas as condições de amostragem e com valores de  $Ni = 1$ . Por outro lado, os fundeios (PC 01-02) como do tipo 2a – estuário bem misturado e fracamente estratificado, com o percentual relativo dos processos difusivo e advectivo para o transporte de sal estuário acima de 100% ( $Ni = 1$ ), indicando uma mistura inteiramente gerada pela difusão turbulenta.

Os dados e a classificação apresentados para os fundeios estuarinos corroboram com estudos anteriores em outras regiões (Cavalcante, Feary e Kjerfve, 2013; Dias *et al.*, 2016; Santos, 2018a) e nos dados encontrados por Lima (2019) em um ponto ao longo do CESM durante o período seco, os autores observaram uma mistura quase na totalidade gerada pela difusão turbulenta. As classificações do tipo 2a como parcialmente misturados incluem a grande maioria dos estuários de planície costeira, e como a razão largura/profundidade é grande, a razão de fluxo depende da intensidade da descarga fluvial e da altura da maré (Miranda, Castro; Kjerfve, 2002). A classificação apresentada para os fundeios da plataforma continental, corroboram com os resultados encontrados por Bezerra *et al.* (2011); Pereira *et al.* (2010), dos quais apontaram a difusão turbulenta como responsável para o transporte de sal e outras substâncias nos estuários analisados, esta classificação é típica de estuários forçados majoritariamente pela maré, onde a contribuição fluvial tem um papel secundário ou irrelevante (Lima, 2019; Miranda, Castro; Kjerfve, 2002).



**Figura 38.** Diagrama conceitual dos cenários apresentados para a distribuição longitudinal da salinidade nos fundeios estuarinos e da Plataforma Continental. O período de seca em (A) e a chuva em (B). ZC – Zona Costeira; ZM – zona de mistura; AE – Água Estuarina; AF – Água de Frente.

## 8. CONCLUSÃO

A partir das observações realizadas no Complexo Estuarino de São Marcos (CESM) e na plataforma continental adjacente durante este estudo, que abrangeu os períodos de seca de 2020 e chuva de 2021, constatou-se uma variabilidade temporal na circulação e no campo de massa sobre condição de maré de sizígia, para o ambiente de macromaré.

A circulação ao longo do estudo mostrou que as regiões apresentaram escoamento bidirecional, com um domínio das correntes de vazantes e intensas correntes, em especial nas regiões de fundeios estuarinos, atribuído ao afunilamento e geometria do CESM.

A estrutura termohalina observada no estudo, exibiu comportamento bem misturado verticalmente com pequenas variações ao longo dos fundeios. A temperatura, em geral, manteve constante durante todo o estudo, enquanto a salinidade observada gerou uma maior variação, associada provavelmente à descarga fluvial e a intrusão de águas mais salinas durante a seca. A análise das massas d'água indicam a presença de três massas de água no estudo, a Água Estuarina (AE), Água de Pluma/Frente (AF) e Água Costeira (AC).

Para o transporte advectivo de sal, a descarga fluvial foi a parcela mais significativa, geralmente contrabalaneada com a deriva de Stokes, e caracterizando como importante mecanismo de exportador de sal nos fundeios estuarinos e como importador de sal para os fundeios da Plataforma Continental.

A determinação da estabilidade vertical do escoamento, a partir do número de Richardson se traduziu em um comportamento de instabilidade vertical ( $Ri_L$ ), com momentos de moderada a alta estabilidade na coluna d'água, sendo atribuído possivelmente pelas correntes de maré, caracterizando como principal agente gerador desse comportamento. Aliado a isto, os resultados do diagrama de estratificação-circulação caracterizaram de forma distinta as regiões como do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado) e 2a (parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical).

O presente estudo evidencia que a possível diminuição das chuvas, principalmente durante o período seco amostrado, é observado o avanço de águas marinhas continente adentro, o que pode estar relacionado às mudanças na bacia de drenagem, uma vez que o fundeio estuarino que apresentou salinidades  $>30$  está situado nas desembocaduras de importantes rios ao longo do CESM.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, R.; ALFREDINI, P. Modelação Hidrossedimentológica no Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 5–14, 2010.
- APHA. WEF-Water Environment Federation (2012) Standard methods for the examination of water and wastewater. **Washington, DC: APHA**, [S. l.], 2001.
- BARBOSA, F. Viabilidade da maremotriz em algumas regiões litorâneas do Nordeste do Brasil. [S. l.], p. 71–78, 2015.
- BÉRGAMO, A. **Características da Hidrografia, Circulação e Transporte de Sal: Barra de Cananéia, Sul do Mar de Cananéia e Baía de Trapandé**. 2000. Universidade de São Paulo, São Paulo, [s. l.], 2000.
- BITENCOURT, D. M. Descrição pontual de maré, perfil de correntes e suas inter-relações em um ponto do estuário do Rio Mearim, São Luis, Maranhão. 2016.
- CAFERMANE, A. C. Massas de água e circulação residual no estuário dos Bons Sinais. 2021. Tese de Doutorado. Universidade Eduardo Mondlane.
- CAMPOS, A. Os Desafios da governança global do oceano. *Relações Internacionais*, n. 66, p. 111-126, 2020.
- COLARES, M. C. S.; PINHEIRO, L. S.; MENEZES, M. O. B. Caracterização Sedimentar do Canal do Estuário do Rio Coreaú, Estado Do Ceará, Brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, [S. l.], v. 49, n. 1, p. 5, 2016.
- CUNHA, Hermeneilce Wasti Aires Pereira. **CARACTERIZAÇÃO SÓCIO-AMBIENTAL DO RIO MEARIM NA CIDADE DE ARARI-MA**. 2003. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroecologia, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2003.
- CUNHA, A. P. M., ZERI, M., DEUSDARÁ LEAL, K., COSTA, L., CUARTAS, L. A., MARENGO, J. A., ... & RIBEIRO-NETO, G. (2019). Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11), 642.
- DIAS, F. J. DA S. Circulação e massas de água na plataforma continental leste do Ceará: modelagem numérica e observações. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2011.
- DIAS, F. J. DA S. et al. Physical characteristics and discharges of suspended particulate matter at the continent-ocean interface in an estuary located in a semiarid region in northeastern Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 180, p. 258-274, 2016.
- DIAS, F. J. DA S.; CASTRO, B. M.; LACERDA, L. D. Continental shelf water masses off the Jaguaribe River (4S), northeastern Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 66, p. 123 - 135, 2013.

- DAY JR, John W. et al. **Estuarine ecology**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1989.
- DYER, Keith R. **A physical introduction**. John Wiley & Sons, London, 1973.
- DYER, Keith R. *Estuaries: a physical introduction*. [S. l.], v. 2 edição, 1997.
- EL-ROBRINI, M. H. S. **Maranhão - Erosão**. [S. l.: s. n.].
- FEITOSA, A. C. Evolução morfogenética do litoral norte da ilha do Maranhão. **Rio Claro: IOGCE/UNESP**, [S. l.], 1989.
- FERREIRA, A. M.; MARQUES, J. C.; SEIXAS, S. Integrating marine ecosystem conservation and ecosystems services economic valuation: Implications for coastal zones governance. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 77, p. 114–122, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.01.036>
- FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitation distribution over central and western tropical South America. **Climanálise**, [S. l.], v. 5, n. 6, p. 36–45, 1990.
- FONTES, V. C. Mapeamento dos geohabitats da plataforma continental de Tamandaré-PE. 2018. Dissertação de Mestrado. Brasil.
- FREITAS, P. P. DE. Modelagem hidrodinâmica da circulação sobre a plataforma continental do Ceará-Brasil. 2015.
- FREITAS, P. P. DE. Aspectos hidrodinâmicos do estuário do Rio Cocó, Fortaleza, Ceará, Brasil. 2013.
- GILBERT, E. R.; DE CAMARGO, M. G.; SANDRINI-NETO, L. Rysgran: Grain size analysis, textural classifications and distribution of unconsolidated sediments. **R package version**, [S. l.], v. 2, 2012.
- KJERFVE, B. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. **Estuarine Ecology**, [S. l.], p. 47–78, 1987.
- LIMA, H. P. **Circulação Hidrodinâmica no Complexo Estuarino de São Marcos (MA-BRASIL)**. 2019. - Universidade Federal do Maranhão - UFMA, São Luís, [s. l.], 2019.
- MACIEL, S. A. **ANÁLISE DA RELAÇÃO CHUVA-VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA, BRASIL**. 214 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- MAIA, T. C. Correntes e estrutura termohalina no Complexo Portuário de São Luís (CPSL) ao longo de um ciclo de maré. São Luis. 2018
- MEDEIROS, P. R. P. Características ambientais do Baixo São Francisco (AL/SE): efeitos de barragens no transporte de materiais na interface continenteoceano.

Geochimica Brasiliensis, v. 28, n. 1, p. 65–78, 2014.

MENEZES, W. F. S DE. VAZÃO ECOLÓGICA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA A BACIA DO RIO MEARIM (MA). Trabalho de Conclusão do Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão. 2021

MILLIMAN, J. D. Flux and fate of fluvial sediment and water in coastal seas. **RFC Mantoura**, [S. l.], p. 69–89, 1991.

MIRANDA, L. B. DE; CASTRO FILHO, B. M. DE; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. Edusp ed. São Paulo: [s. n.], 2002. v. 42.

MORAIS, J. O. DE. O Processo de Sedimentação na Baía de São Marcos. Estado do MARANHÃO, BRASIL.pdf. **Arquivos de Ciências do Mar**, Fortaleza, p. 153–164, 1977.

MONTEIRO, N. S. C. (2019). Inventário das massas de água e o sistema carbonato no Oceano Atlântico Sul. 2019

MUEHE, D.; GARCEZ, D. S. A plataforma continental brasileira e sua relação com a zona costeira e a pesca. *Mercator-Revista de Geografia da UFC*, v. 4, n. 8, p. 69-88, 2005.

NICOLODI, J. L.; ZAMBONI, A.; BARROSO, G. F. Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas e Zonas Costeiras no Brasil: Implicações para a Região Hidrográfica Amazônica. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 9–32, 2009.

NUGEO, Núcleo Geoambiental. **Regiões Hidrográficas do Maranhão**. 2009 Disponível em: [https://www.nugeo.uema.br/?page\\_id=233](https://www.nugeo.uema.br/?page_id=233). Acesso em 25 de fev de 2023.

NUGEO, Núcleo Geoambiental. **Bacias Hidrográficas e Climatologia no Maranhão Bacias Hidrográficas e Climatologia no Maranhão**. [S. l.: s. n.]. 2016.

OLIVEIRA, J. A. R. DE. **Estudo Sedimentológico, Hidrodinâmico e Ambiental do Estuário do Rio Itapessoca (Carrapicho e Catuamã), Litoral Norte de Pernambuco – Brasil**. 2018.

PEREIRA, J. E. R.; HARARI, J. Modelo numérico tri-dimensional linear da plataforma continental do Estado do Maranhão. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, [S. l.], v. 43, n. 1, p. 19–34, 1995.

PINHEIRO, J. M. Distribuição Espaço-Temporal da Pluviosidade na Ilha do Maranhão no ano de 2016. **InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, [S. l.], v. 3, n. 8, p. 126, 2017.

PINTO-COELHO, R. M.; HAVENS, K. **Gestão de recursos hídricos em tempos de crise**. [S. l.]: Artmed Editora, 2016.

PONTES, P. H. P.; EL-ROBRINI, M.; KAMPEL, M. Ocorrência Sazonal de Massas D'água Na Plataforma Continental Do Maranhão. 2008.

- PRITCHARD, D. W. **Estuarine Circulation Patterns**. [S. l.: s. n.]. v. 81. 1955.
- RIBAS, T. M. **Implementação de Modelo Numérico para Estudo Hidrodinâmico das Baías de Antonina e de Paranaguá - PR**. 2004. - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, [s. l.], 2004.
- SAGRIMA (Maranhão). Plano de Desenvolvimento da Carcinicultura no Maranhão. Maranhão: Governo do Maranhão, 2019. 144 p.
- SAMARITANO, L. F. M. C.; BERNARDINO, J. C. M.; SIEGLE, E.; TESSLER, M. G.; UEMURA, S. Hydrodynamic modeling over a sand wave field at São Marcos. **Marine and River Dune Dynamics**, [S. l.], n. April, p. 241–247, 2013.
- SANTOS, V. H. M. DOS. **Caracterização das condições oceanográficas em estuários de macromaré: Complexo Estuarino Arraial-São José (MA)**. 2018a. - Universidade Federal do Maranhão, [s. l.], 2018.
- SANTOS, V. S. **Caracterização Hidrodinâmica E Fluxos De Sedimentos Em Suspensão No Complexo Portuário De São Luís ( Ma ) Durante a Atividade De Dragagem**. 2018b. [s. l.], 2018.
- SARAIVA, M. F., M. G., NUNES, A. G.; PICOITO, I. F.; ARTEAGA; J. M. Oceanos e segurança dos espaços marítimos. IDN Brief. 2022
- SCHETTINI, C. A. F. Caracterização física do estuário do rio Itajaí-açu, SC. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, n. 1, p. 123-142, 2002.
- SILVA, A. C; ARAUJO, M.; PINHEIRO, L. DE S. Caracterização hidrográfica da plataforma continental do maranhão a partir de dados oceanográficos medidos, remotos e modelados. Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, p. 281-293, 2007.~
- SILVA JUNIOR, R. M. DA. Dinâmica Hidrológica Em Um Estuário De Macromaré Localizado Na Interface Amazônia-Semiárido: Complexo Estuarino De São Marcos. São Luis, 2017.
- SCUDELARI, A. C.; FIGUEIRÊDO, L. R. R. DE; ROSMAN, P. C. C. Estudo da circulação hidrodinâmica do estuário do Rio Potengi devida a ação do vento. **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica - SEMENGO**, [S. l.], 2008.
- SEGUNDO, G. H. C. Processos oceanográficos na região costeira e estuarina do rio Caeté, Pará, Brasil. Tese de Doutorado - Niterói: [s.n], 138f.: il., 30 cm. 2007
- SIEGLE, Eduardo et al. Hydrodynamics and suspended sediment transport in the Camboriú estuary - Brazil: Pre jetty conditions. **Brazilian Journal of Oceanography**, [S. l.], v. 57, n. 2, p. 123–135, 2009.
- SILVA, A. C. R. DE S. **Hidrodinâmica do Estuário do Rio Buranhém, Porto Seguro – Bahia Ana**. 2016.

- SIMPSON, J. H.; BROWN, J. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. **Estuaries**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 125–132, 1990.
- SPERB, Rafael M. et al. Classificação de massas d' água: um enfoque difuso. [S. l.], p. 8, 1999.
- STRASSER, M. A. Dunas fluviais no rio Solimões-Amazonas: dinâmica e transporte de sedimentos. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2008.
- STRICKLAND, John Douglas Hipwell; PARSONS, Timothy Richard. A practical handbook of seawater analysis. [S. l.], 1972.
- SUGUIO, Kenitiro. **Introdução à sedimentologia**. [S. l.: s. n.]. 1973.
- STRAMMA, L., SCHOTT, F., 1999. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. *Deep. Res.* 46, 279–303. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(98\)00109-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(98)00109-X)
- SVERDRUP, H.U., JOHNSON, M.W., Fleming, R.H., 1942. The oceans, their physics, chemistry and general biology. Modern Asia Editions. 1087p.
- TEAM, R. development Core. **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: **R Foundation for Statistical Computing**. [S. l.]: ISBN 3-900051-07-0. <http://www.R-project.org>, 2009.
- TELLES, F. D. S. (2019). Impacto dos processos de meso-e de submesoescala sobre as trocas de águas entre plataforma continental e oceano aberto na região de ressurgência entre Cabo de São Tomé e Cabo Frio (RJ, 22 S-23 S).
- TENGBERG, A.; ALMROTH, E.; HALL, P. Resuspension and its effects on organic carbon recycling and nutrient exchange in coastal sediments: in situ measurements using new experimental technology. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, [S. l.], v. 285, p. 119–142, 2003.
- THOMSON, Richard E.; EMERY, William J. **Data analysis methods in physical oceanography**. [S. l.]: Newnes, 2014.
- TOMCZAK, Matthias. Some historical , theoretical and applied aspects of. **Journal of Marine Research**, [S. l.], v. 57, p. 275–303. 1999.
- VITAL, H. Coastal Erosion on the Rio Grande do Norte State (Northeastern Brazil): Causes and Factors. **J. Coast. Res.** 2004, 2004–2007, 2006.
- VITAL H, STATTEGGER K, AMARO VE, SCHWARZER K, FRAZAO EP, TABOSA WF, SILVEIRA IM. **A modern high-energy siliciclastic-carbonate platform: continental shelf adjacent to Northern Rio Grande do Norte state, Northeastern Brazil**. SEPM Special Publication, pp 177– 190, 2008.