



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE OCEANOGRAFIA**

**RAFAEL MARIANI RODRIGUES**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CAMPO TERMOHALINO E SUAS  
FORÇANTES NO EIXO CENTRAL DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS**

Salvador

2016

**RAFAEL MARIANI RODRIGUES**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CAMPO TERMOHALINO E SUAS FORÇANTES  
NO EIXO CENTRAL DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS**

Monografia apresentada ao curso de graduação em Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Camargo Lessa

Salvador

2016

# TERMO DE APROVAÇÃO

RAFAEL MARIANI RODRIGUES

## ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CAMPO TERMOHALINO E SUAS FORÇANTES NO EIXO CENTRAL DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Oceanografia, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

-----  
Guilherme Camargo Lessa – Orientador - Ph.D em Ciências Marinhas - Universidade de Sidney, Austrália.  
Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil.

-----  
Clemente Augusto Souza Tanajura Ph.D. em Meteorologia - Departamento de Meteorologia da Universidade de Maryland, EUA. Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil.

-----  
Edson Pereira Marques Filho Dr. em Meteorologia – Departamento de Meteorologia da Universidade de São Paulo (USP), Brasil. Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil.

Salvador, 27 de Outubro de 2016

## AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente e profundamente a minha mãe, a meu pai e aos meus irmãos por terem apoiado o meu sonho desafiador em me tornar um oceanógrafo. Eles foram essenciais para a minha formação e sempre acreditaram no meu potencial. Eu serei eternamente grato por isso. Agradeço especialmente ao meu irmão mais velho por ter me apresentado ao oceano e suas maravilhas. Foi paixão a primeira vista. Sou muito grato e agradeço de coração a toda a minha família, pois todos fizeram e fazem uma enorme diferença na minha vida. Gostaria de agradecer e homenagear a minha querida vó, que seria uma das pessoas mais felizes do mundo a me ver realizando essa conquista.

Agradeço a todos os meus irmãos que a vida me concedeu. Meus amigos (irmãos) foram e são essenciais para mim. Eles fizeram uma diferença enorme na minha vida e sempre me inspiraram a me tornar uma pessoa melhor. Essa conquista é nossa, irmãos!

Gostaria de agradecer especialmente e carinhosamente a minha namorada por ser tão maravilhosa tão motivadora e tão única para mim. No meio de tantos tormentos, ela sempre foi a minha calmaria.

Agradeço muito (muito mesmo) a meu orientador, pois ele me deu uma grande oportunidade e sempre acreditou no meu potencial. Sou eternamente grato por tudo que eu aprendi, por todas as críticas e por todas as oportunidades que foram dadas a mim. Ele fez uma diferença enorme na minha vida, na minha personalidade e na minha conduta profissional.

Agradeço a todos os colegas do curso, a todos os professores e a todos do grupo da GOAT que me apoiaram e que, de formas diferentes, me ajudaram a chegar até aqui.

Contudo, é só um novo começo...

## RESUMO

Estudos pretéritos mostraram que existe um gradiente de temperatura e salinidade na Baía de Todos os Santos (BTS), a segunda maior baía do Brasil. Entretanto, as séries de dados observacionais utilizadas foram curtas, muitas vezes não simultâneas e assim incapazes de caracterizar apropriadamente as variações no tempo e no espaço do campo termohalino. Utilizando um conjunto de dados oceanográficos e meteorológicos coletados entre os anos de 2012 e 2015, o presente trabalho tem como objetivo principal investigar a variabilidade espaço-temporal da estrutura termohalina do eixo principal da BTS e sua correlação com os aspectos meteorológicos e fluviais. Os dados foram obtidos a partir de sensores de temperatura e condutividade instalados em três estações ao longo de um percurso de 48 km, os quais possibilitaram analisar a variabilidade destes campos, e seus gradientes longitudinais e verticais, em escalas semi-diurna, diurna, intra e inter-anual. Foram obtidas séries temporais de temperatura do ar, radiação solar, insolação, vento e precipitação, vazões fluviais diárias do rio Paraguaçu. Os resultados mostraram que a BTS vivenciou um dos anos hidrológicos mais secos dos últimos trinta anos no início do monitoramento, quando ocorreu uma situação de hipersalinidade que evoluiu ao final do verão para uma rolha de sal, quando a BTS se tornou temporariamente um estuário negativo. Neste mesmo ano ocorreram as maiores temperaturas da água (31,1 °C) e salinidades (39,2 psu) registradas e as maiores diferenças térmicas entre as estações. Também, foi notado maior frequência de ocorrência de ressurgência costeira que resultou em decaimentos da temperatura de até 2,3 °C na entrada da baía. Já os anos de 2014 e 2015 foram marcados por uma maior nebulosidade, menor insolação, redução da temperatura do ar, menor incidência de ventos de NE, e maior aporte de água pluvial e fluvial. Com isso, a baía apresentou uma tendência de aumento dos gradientes de salinidade e de diminuição dos gradientes de temperatura. A análise harmônica mostrou que ciclos astronômicos explicam entre 76 % a 88 % das variâncias nos valores de temperatura e entre 25 % e 73% da variância da salinidade. Existiram fortes correlações de temperatura e de salinidade entre as estações hidrológicas, porém moduladas pela sazonalidade climática.

Palavras-Chaves: Hipersalinidade. Rolha de Sal (densidade). Dados observacionais. Estuário Tropical. Sazonalidade.

## ABSTRACT

Existing investigations of the thermohaline field in Todos os Santos Bay (BTS) relied on short and non-synchronous data sets that prevented a detailed investigation of space/time variations of temperature and salinity. Based on a new set of hourly temperature and conductivity time series obtained between 2012 and 2015, this study aims to investigate the spatial and temporal variabilities of the thermohaline field and their correlation with meteorological and astronomical forces, as well as with the fluvial discharge. Three monitoring stations were set up along a 48 km transect of the bay. Air temperature, solar radiation, wind speed and direction and fluvial discharge were also analysed. The results show that the BTS underwent one of the most arid conditions in the historic record in 2012-2013, when a hypersaline scenario in the summer of 2013 evolved to a salt-plug structure by the end of the season, turning the bay into an inverse estuary. Highest temperatures (31,1 °C) and salinities (39,2 psu) were then recorded, as well as the highest spatial temperature and the smallest salinity gradients. A higher frequency of upwelling events was verified, which caused the lowest temperatures at the bay entrance. The following years were marked by relatively higher rainfall and cloud cover, which reduced the mean salinity and decreased solar radiation rates, thus triggering lower water temperatures. Less frequent NE winds also reduced the number and intensity of upwelling events, bringing about an increase in water temperature at the bay entrance. Higher spatial salinity gradients were set in simultaneously with a reduction in temperature gradients. Astronomical cycles, including tides, explained between 76 and 88% of the temperature variance in the bay, but only 25% to 73% of the salinity variance. Higher spatial correlations, seasonally modulated, in the temperature and salinity fields were identified.

Keywords: Hypersaline. Salt Plug. Observational data. Tropical Estuary. Seasonalit

# Sumário

ÍNDICE DE FIGURAS.....	2
ÍNDICE DE TABELAS.....	6
<b>1 Introdução</b> .....	7
<b>2 Objetivos</b> .....	9
<b>3 Área de Estudo</b> .....	9
<b>4 Materiais e Métodos</b> .....	11
4.1 Aquisição e Processamento dos dados .....	11
4.1.1 Temperatura e Salinidade .....	12
4.1.2 Dados Meteorológicos .....	15
4.1.3 Descarga Fluvial .....	16
4.1.4 Maregrafia.....	16
<b>5 Resultados</b> .....	16
5.1 Caracterização Meteorológica e Fluvial.....	16
5.1.1 Precipitação.....	16
5.1.2 Descarga Fluvial .....	20
5.1.3 Insolação e Radiação.....	23
5.1.4 Temperatura do Ar.....	26
5.1.5 Vento.....	28
5.2 Temperatura e Salinidade da água .....	31
5.2.1 Análise Harmônica.....	40
<b>6 Discussões</b> .....	44
<b>7 Conclusões</b> .....	55
<b>8 Referências bibliográficas</b> .....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Baía de Todos os Santos e suas principais regiões. Nesta figura estão expostas as estações hidrológicas TS (círculos pretos), as estações meteorológicas (amarelo) e a barragem de Pedra do Cavalo (vermelho). Extraído e modificada de Lessa et al. (2009).....	11
Figura 2 - Exemplo de um processamento da série mensal da temperatura em TS3. Dados do sensor Hobo (preto), conferência pelo CTD (vermelho) e dados calibrados (verde). .....	13
Figura 3 – Total de dados (%) da temperatura da água para cada mês e cada estação: TS1 (azul), TS2-fun (marrom), TS2-sup (vermelho) e TS3 (verde).....	14
Figura 4 – Total de dados (%) de salinidade da água para cada mês e cada estação: TS1 (azul), TS2-fun (marrom), TS2-sup (vermelho) e TS3 (verde).....	14
Figura 5 - (a) Normais climatológicas de precipitação acumulada mensal em Salvador (SSA); (b) Normais climatológicas (1986-2015) mensais de precipitação na estação de Salvador (SSA) e Cruz das Almas (CRZ). .....	18
Figura 6 - Precipitação acumulada mensal em SSA (a) e CRZ (b) para os anos de estudo deste trabalho. Os círculos pretos correspondem às médias climatológicas (1986-2015). A linha vertical preta tracejada marca o início de cada ano hidrológico. ....	19
Figura 7 - Precipitação acumulada anual em SSA (preto) e CRZ (amarelo) para os anos hidrológicos de 2013, 2014 e 2015. As linhas representam as normais climatológicas anuais (1986-2015). ....	19
Figura 8 - Anomalias de precipitação mensal com base na climatologia de 1986-2015 (Salvador e Cruz das Almas). As linhas grossas em vermelho e preto representam as mesmas séries de anomalias de precipitação filtradas com ponto de corte de dez anos em SSA e CRZ, respectivamente. ....	20
Figura 9 - Normais climatológicas mensais da vazão da barragem de Pedra do Cavalo correspondentes ao período de 1986-2015. ....	21
Figura 10: Vazão defluente da barragem de Pedra do Cavalo: média diária (a) e média mensal (b). A linha cinza (b) representa as normais climatológicas (1986-2015). A linha vertical preta tracejada divide cada ano hidrológico de estudo.....	22
Figura 11 – Vazão média diária para os anos hidrológicos de 2013, 2014 e 2015. A linha preta representa a vazão média diária para o período de 1986-2015. ....	23
Figura 12 - Volume total descarregado por ano hidrológico (relativo à BTS) pela barragem de Pedra do Cavalo. ....	23

Figura 13 - Médias mensais climatológicas (1986-2015) de horas de insolação em SSA e em CRZ.....	24
Figura 14 - Insolação total mensal em SSA e em CRZ (a) e anual (b) em SSA. A linha preta (b) corresponde à média climatológica (1986-2015) do total anual de insolação em SSA. ....	25
Figura 15 – Radiação solar total mensal em SSA.....	26
Figura 16 - Normais climatológicas mensais da temperatura média do ar em SSA (1986-2015) e CRZ (1986-2004). ....	27
Figura 17 – Temperatura do ar média correspondente para cada hora do dia no verão e no inverno dos três anos hidrológicos em SSA.....	28
Figura 18 - Dados diários da temperatura mínima, média e máxima do ar em SSA.....	28
Figura 19 - Distribuição de frequências de direção e magnitude dos registros horários de ventos em AERO. ....	29
Figura 20 – Stickplot da série temporal do vento filtrado em 53 horas (período subinercial) para cada ano de estudo em AERO. ....	29
Figura 21 – Velocidade do vento longitudinal à costa na estação AERO. A linha cinza fina representa a velocidade instantânea na estação e a linha verde grossa representa a velocidade filtrada em 53 horas (período subinercial). Valores positivos indicam ventos vindos de nordeste.....	30
Figura 22 – Histograma da direção do vento (AERO) no período de primavera e verão para cada ano hidrológico.....	30
Figura 23 – Série temporal da temperatura da água (a) e da salinidade (b) ao longo dos três anos hidrológicos.....	33
Figura 24 – Médias mensais da temperatura da água (a) e médias anuais para cada ano de estudo (b).....	34
Figura 25 - Médias mensais (a) e anuais (b) de salinidade para todas as estações hidrológicas. ....	35
Figura 26 - Série temporal da diferença de temperatura e salinidade entre TS3 e TS1 (DIF 1) e entre TS3 e TS2 (sup) (DIF 2).....	36
Figura 27 - Série temporal da diferença vertical de temperatura (a) e de salinidade (b) em TS2. ....	37
Figura 28 – Série temporal da variação da temperatura da água em frequência mareal. Estas variações são resultantes da aplicação de filtro em bandas utilizando períodos de corte de 11 e 12,4 horas. Valores positivos indicam aumento da temperatura e valores negativos se referem a redução.....	37
Figura 29 – Série temporal da variação da salinidade da água em frequência mareal. Estas variações são resultantes da aplicação de filtro em bandas utilizando períodos de corte de 11 e 12,4 horas. Valores positivos indicam aumento de salinidade e valores negativos se referem a diminuição. ....	38

Figura 30 – Série temporal da variação da temperatura da água em frequência diurna. Estas variações são resultantes da aplicação do filtro em bandas utilizando períodos de corte de 23 e 25 horas. Valores positivos indicam aumento da temperatura e valores negativos se referem a redução. ....	39
Figura 31 - Série temporal da variação da salinidade da água em frequência diurna. Estas variações são resultantes da aplicação do filtro em bandas utilizando períodos de corte de 23 e 25 horas. Valores positivos indicam aumento de salinidade e valores negativos se referem a diminuição.....	39
Figura 32 – Médias horárias da temperatura da água para cada estação hidrológica e para cada ano de monitoramento. A estação TS2(fun) não foi incluída para o ano de 2013, pois a mesma apresentou uma grande quantidade de lacunas. ....	40
Figura 33- Amplitude de variação de temperatura e de salinidade correspondente a cada periodicidade harmônica.....	41
Figura 34 – Somatório das constituintes harmônicas obtidas para a temperatura e salinidade para cada estação hidrológica.....	42
Figura 35 – Variância (%) da temperatura e da salinidade explicadas pelos movimentos harmônicos astronômicos (Terra, Lua e Sol).....	42
Figura 36 – Reconstituição harmônica de temperatura e salinidade da água para as quatro estações hidrológicas.....	43
Figura 37 – Temperatura (a) e salinidade (b)da água reconstituídas harmonicamente e observada na estação TS2 (sup).....	44
Figura 38 – Variação do total anual de precipitação em Salvador e Cruz das Almas (Lessa et al., 2016) ....	45
Figura 39 – Série temporal do vento longitudinal à costa (AERO), da temperatura da água (filtrada em 73 horas) e da salinidade (filtrada em 73 horas) nas estações TS1 e TS2 para o ano hidrológico de 2014. ....	47
Figura 40- Perfis de temperatura, salinidade e densidade longitudinais à BTS, em fevereiro e abril de 2013. O polígono branco representa a topografia de fundo, delimitada pelas profundidades máximas registradas em cada perfilagem. Distância zero se refere à entrada da BTS (TS1) e o aumento da mesma é em direção a TS3. As setas indicam a estrutura da circulação residual (não-mareal) resultante: circulação estuarina em fevereiro e circulação estuarina inversa em abril. Extraído de Lessa et al (2016).....	49
Figura 41 – Diagrama T-S referentes as estações hidrológicas para cada ano. A linha vermelha representa a divisão entre Água Tropical (AT) e Água Costeira (AC).....	50
Figura 42 – Variações semi-diurnas de temperatura e salinidade (isoladas com filtro em banda com períodos de corte de 11 e 12,4 horas) e do nível d'água.....	51

Figura 43 – Temperatura da água em TS2 (sup) (a) e temperatura do ar em SSA (b) ao longo do dia no ano hidrológico de 2015. ....	52
Figura 44 - Índice de correlação (R) mensal de temperatura entre as estações de superfície (TS2 e TS3), estações de fundo (TS1 e TS2) (a) e entre estações de superfície e fundo (TS2) (b). ....	53
Figura 45 - Índice de correlação (R) mensal de salinidade entre as estações de superfície (TS2 e TS3), estações de fundo (TS1 e TS2) e superfície e fundo (TS2). ....	54

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de monitoramento realizado pelos sensores Hobo para cada estação hidrológica.....	12
Tabela 2 - Número de perfilagens com CTD.....	15
Tabela 3- Exemplo de um ano hidrológico da BTS.....	13
Tabela 4- Média, desvio padrão, número de amostragens e a taxa de aproveitamento de dados de temperatura e de salinidade considerando todos os 3 anos hidrológicos.....	31
Tabela 5- Número de amostras, média e desvio padrão de temperatura e de salinidade para os três anos hidrológicos de estudo.....	32
Tabela 6 - Constituintes harmônicas identificadas pela a análise harmônica.....	41

# 1 INTRODUÇÃO

A Baía de Todos os Santos (BTS) é um sistema estuarino tropical com área de aproximadamente 1.233 km<sup>2</sup>, sendo a segunda maior baía do Brasil (Lessa *et al.*, 2009). Como qualquer sistema estuarino, a BTS está sujeita a variações consideráveis, no tempo e no espaço, do campo de temperatura e salinidade decorrente de flutuações no balanço de água e calor (Cirano e Lessa, 2007).

Em estuários, a circulação da água é influenciada por gradientes de pressão barotrópico e baroclínico. Segundo Miranda (2002), a componente barotrópica da circulação é forçada pela variação do nível d'água associado principalmente às marés, agitando ciclicamente a coluna d'água, promovendo mistura e facilitando a formação de uma massa d'água estuarina. A componente baroclínica da circulação advém do gradiente horizontal de densidade, o qual gera um fluxo gravitacional caracterizado pelo lento movimento da água estuário acima pelo fundo e estuário abaixo pela superfície (Stacey *et al.*, 2001). Enquanto a circulação de maré esta associada à dispersão de substâncias, a circulação gravitacional causa transporte advectivo (Falkenberg, 2009). A circulação gravitacional, junto a velocidades residuais de maré, influencia fortemente na distribuição de materiais em suspensão ou em solução no corpo estuarino, bem como as trocas com a plataforma adjacente, determinando se o estuário funciona como retentor ou exportador de materiais para a zona costeira (Dyer, 1997).

O campo termohalino, principal determinante da densidade da água e do gradiente de pressão baroclínico, responde diretamente aos balanços de água e calor, e é utilizado como referência para a classificação de estuários. Estes podem ser distinguidos de acordo com o balanço hídrico entre estuários positivos e negativos. Os estuários positivos são aqueles onde a adição de água doce é superior à perda por evaporação, acarretando na diluição do sal e no estabelecimento de um gradiente de densidade longitudinal que gera uma circulação estuarina clássica (Vale-Levinson, 2010). Em contrapartida, estuários negativos ocorrem quando a perda de água doce por evaporação excede o ganho por precipitação e descarga fluvial, tornando-se hipersalinos e assim caracterizados por um gradiente longitudinal de densidade com sinal oposto aos estuários positivos. Em situações excepcionais, estuários negativos podem gerar uma massa d'água com densidade superior aos seus extremos interno e externo. Neste caso, a formação de uma "rolha de sal", ou de densidade, gera duas células de circulação gravitacional com sentidos opostos, podendo acarretar na piora da qualidade da água na região interna do estuário (Vale-Levinson, 2010; Cabrera *et al.*, 2014).

As flutuações da temperatura e salinidade da água ocorrem em diferentes escalas de frequência, desde mareal, *i.e.*, oscilações que ocorrem dentro de um ciclo de maré, a diária, mensal, intra e inter-anual (Van Aken, 2008; Habib *et al.*, 2008; Yoon *et al.*, 2015;). O balanço hídrico varia sazonalmente, influenciado pela variabilidade da radiação solar, da precipitação e da descarga fluvial (Miranda, 2002; Barry, 2013), e até mesmo o regime de ventos pode ser fator atuante na variabilidade do campo termohalino estuarino ao

causar a ressurgência costeira, cujas águas mais salinas e mais frias são advectadas para dentro do estuário (Garrison, 2010). Variações de temperatura e salinidade afetam os processos metabólicos dos organismos autótrofos e heterótrofos, podendo agir como um fator limitante à reprodução, crescimento e distribuição de organismos (Plavan *et al.*, 2010; Magris *et al.*, 2011), assim como a estrutura e função do estuário como ecossistema costeiro (Castello *et al.*, 2015). A temperatura da água influencia na velocidade de reações químicas, solubilidade e disponibilidade de gases do corpo d'água (Frazão, 2003). A salinidade é importante para a floculação e deposição do sedimento em suspensão (Ramos, 2013; Karbassi *et al.*, 2014), além de influenciar o coeficiente de partição e biodisponibilidade de metais pesados (Kulmar *et al.*, 2015; Chu *et al.*, 2015).

Santana (2015) investigou a circulação na BTS e mostrou, através de experimentos com modelagem numérica, que os fluxos de água e calor são importantes agentes na regulação do campo de densidade da baía, e que a circulação baroclínica reduz o tempo de descarga na BTS em mais de 190 dias. Estudos pretéritos (Xavier, 2002; Lima *et al.*, 2002; Genz, 2006; Cirano e Lessa, 2007; Lessa *et al.*, 2009) mostraram que existe um gradiente de temperatura e salinidade, e, conseqüentemente, de densidade ao longo do eixo principal da BTS. Entretanto, as séries de dados observacionais utilizadas foram curtas (comprimento máximo de 2-3 semanas), muitas vezes não simultâneas e assim incapazes de caracterizar apropriadamente as variações espaço-temporais do campo termohalino. Segundo Cirano e Lessa (2007), o monitoramento mais importante na BTS foi feito pelo Projeto Bahia Azul, entre 1998 a 2001, que dentre outras atividades, estabeleceu perfis verticais de temperatura e de salinidade ao longo de três dias em sizígia e quadratura em vários pontos da BTS, abrangendo as estações de inverno e de verão.

Em maio de 2012 teve início um amplo programa de monitoramento oceanográfico da BTS financiado pela FAPESB, que se estendeu até dezembro de 2015. Entre diversos resultados, o monitoramento gerou longas séries temporais de temperatura e de salinidade em regiões distintas da baía, as quais permitem iniciar uma investigação detalhada da variabilidade espaço-temporal do campo termohalino.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral investigar e quantificar a variabilidade espaço-temporal do campo termohalino no eixo principal da BTS e determinar as forçantes que controlam esta variabilidade, a partir de dados observacionais. Como objetivos específicos, são listados:

- i) Determinar as variações do campo T e S em frequência mareal, diária e intra e inter-anual e quantificar as amplitudes destas variações;
- ii) Identificar a sazonalidade do campo T e S ao longo do ano hidrológico;
- iii) Identificar a correlação das oscilações do campo termohalino na coluna d'água e ao longo do eixo principal da BTS;
- iv) Investigar a variabilidade do balanço de água, da temperatura do ar, da radiação, da insolação, do vento e sua correlação com a variabilidade do campo termohalino.

## 3 ÁREA DE ESTUDO

A BTS localiza-se nas bordas da terceira maior cidade brasileira, Salvador (Figura 1), e tem dezesseis municípios em seu entorno, formando um contingente populacional superior a três milhões de habitantes (IBGE, 2014). A BTS possui dez terminais portuários de grande porte, inúmeras indústrias químicas, estaleiros e uma base naval da Marinha do Brasil (Hatje *et al.*, 2009). A BTS também apresenta uma diversidade de ambientes sedimentares, como recifes de corais, deltas fluviais, planícies intermareais arenosas e lamosas, e uma grande quantidade de estuários secundários (Santana *et al.*, 2015; Barros *et al.*, 2015).

O clima na entrada da BTS é caracterizado como tropical úmido, tendo as médias anuais de temperatura, de precipitação acumulada e de evaporação de 25,2 °C, 2100 mm e 1002 mm, respectivamente (INMET, 1992). O regime de vento é modulado pela sazonalidade climática: na primavera e no verão os ventos são preferencialmente de leste e nordeste, enquanto que no outono e no inverno os ventos são preferencialmente de sul e sudeste (Santana *et al.*, 2015). Segundo Cirano e Lessa (2007), a maré na BTS é classificada como semi-diurna com número de forma menor ou igual a 0,6. A onda de maré é amplificada e distorcida ao entrar na baía, gerando longos períodos de maré enchente e curtos períodos de maré de vazante (Lessa *et al.*, 2009).

Santos (2014), através de análise de TSM (temperatura da superfície do mar) por sensoriamento remoto, identificou ocorrências de eventos de ressurgência costeira em frente à BTS relacionados com ventos de

nordeste. Segundo o autor, este evento ocorre com maior frequência entre os meses de dezembro e março com persistência de 72 a 120 horas, resultando em anomalias negativas de TSM de até  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A BTS recebe a descarga de uma área de drenagem correspondente a  $61.110\text{ km}^2$  (Lima e Lessa, 2002), sendo que 92,1% estão associadas ao rio Paraguaçu. O restante é distribuído entre as bacias do rio Jaguaripe (3,6% da área total), do rio Subaé (1,1% da área total) e dos pequenos cursos d'água periféricos (Lessa *et al.*, 2009). O rio Paraguaçu é o principal afluente da Baía de Todos os Santos (Genz, 2006), sendo regulado pela barragem de Pedra do Cavalo que opera desde 1986 (Lessa *et al.*, 2009). A descarga média diária da represa no período de 1987 a 2003 foi de  $62,4\text{ m}^3/\text{s}$ , existindo, no entanto, grandes flutuações (Lessa *et al.*, 2009). O verão na BTS é marcado por uma baixa vazão meteórica e das bacias marginais, mas uma alta descarga do rio Paraguaçu. Já o outono e inverno, período úmido no litoral, são caracterizados pela redução das descargas do rio Paraguaçu e por uma maior descarga difusa associada às bacias marginais e à descarga atmosférica.

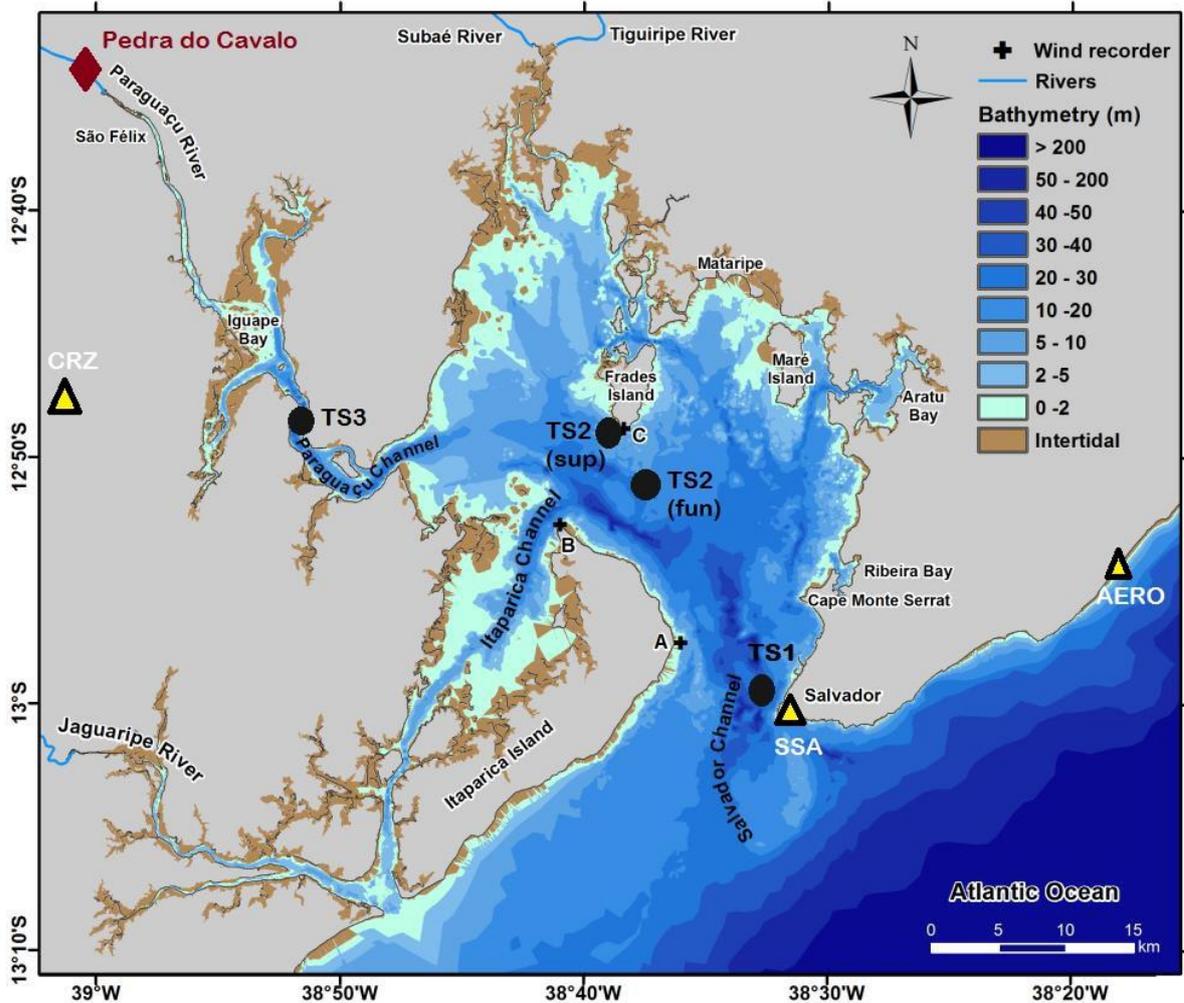


Figura 1- Baía de Todos os Santos e suas principais regiões. Nesta figura estão expostas as estações hidrológicas TS (círculos pretos), as estações meteorológicas (amarelo) e a barragem de Pedra do Cavalo (vermelho). Extraído e modificada de Lessa et al. (2009)

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

O presente estudo utilizou três estações hidrológicas de monitoramento dos campos de temperatura e de salinidade. Dados de precipitação, temperatura do ar, insolação, radiação solar e vento foram provenientes de três estações meteorológicas de superfície. Os dados de descarga fluvial se referem a registros médios diários e estimativas de vazões médias mensais e anuais.

#### 4.1.1 *Temperatura e Salinidade*

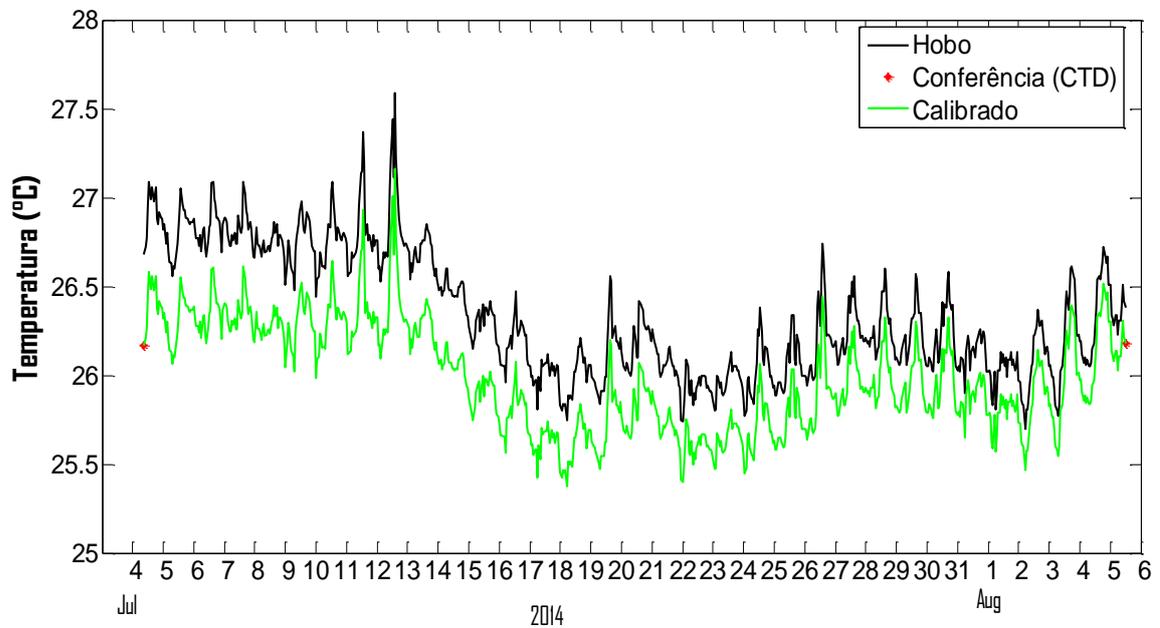
Sensores de temperatura e de condutividade HOBO U24 foram instalados em três estações (TS1, TS2 e TS3) de modo a monitorar o campo termohalino em três regiões da baía (Figura 1). Sensores de superfície (~4m de profundidade) foram fundeados nas três estações, mas devido a problemas técnicos e logísticos, que resultaram em grande perda de dados, o sensor TS1 de superfície não será considerado neste trabalho. O fundeio de sensores próximo ao fundo ocorreu nas estações TS1 (~30 m) e TS2 (~27 m). Desta forma, tanto gradientes horizontais como verticais (para uma estação) de temperatura e salinidade podem ser calculados. Vale ressaltar que existe uma diferença de cerca de 4 km entre TS2-sup e TS2-fun. As estações de monitoramento hidrológico registraram valores instantâneos (apenas uma leitura discreta) de temperatura e de condutividade em intervalos de 1 hora (Tabela 1). O posicionamento dos sensores levou em consideração a cobertura do eixo principal da baía, o qual se alinha com a saída do rio Paraguaçu e apresenta as maiores profundidades (Figura 1). A resolução dos sensores utilizados é de 2 uS/cm para a condutividade e 0,01°C para a temperatura.

**Tabela 1 - Tempo de monitoramento realizado pelos sensores Hobo para cada estação hidrológica.**

	<b>TS1</b>	<b>TS2 (FUN)</b>	<b>TS2 (SUP)</b>	<b>TS3</b>
<b>Início da aquisição</b>	<b>27/05/2012 às 7:00</b>	<b>26/05/2012 às 12:00</b>	<b>26/05/2012 às 7:00</b>	<b>24/08/2012 às 14:00</b>
<b>Término da aquisição</b>	<b>19/11/2015 às 10:00</b>	<b>02/12/2015 às 7:00</b>	<b>27/03/2015 às 10:00</b>	<b>19/08/2015 às 12:00</b>
<b>Profundidade (m)</b>	<b>30</b>	<b>27</b>	<b>4</b>	<b>4</b>

Mensalmente os sensores foram resgatados, via mergulho autônomo, para a extração dos dados e substituídos por outros idênticos. Perfis verticais de temperatura e salinidade foram realizados com um CTD (Conductivity, Temperature and Depth) SeaBird 19E no momento da troca dos sensores e também nas campanhas mensais de coletas de MPS (material particulado em suspensão). Os dados do CTD serviram de referência para a calibração dos sensores fundeados.

Os dados de temperatura e de condutividade obtidos pelo sensor HOBO foram submetidos a uma análise de consistência para identificação e eliminação de dados espúrios em decorrência de mau funcionamento do sensor e/ou incrustação biológica e sujeira. Com o pacote de rotinas no MatLab *SEAWATER* (Copyright © CSIRO, Phil Morgan 1994), foram calculados os valores de salinidade. Em seguida, os dados foram ajustados com referência aos valores registrados pelo CTD, corrigindo problemas de deslocamento (*offset*) e deriva (*drift*) dos dados (Figura 2). Foram realizados ao total 233 perfilagens pelo CTD durante os três anos de monitoramento (Tabela 2).



**Figura 2 - Exemplo de um processamento da série mensal da temperatura em TS3. Dados do sensor Hobo (preto), conferência pelo CTD (vermelho) e dados calibrados (verde).**

**Tabela 2 – Número de perfilagens com CTD.**

	Nº Amostragens T e S (CTD)
<b>TS1</b>	65
<b>TS2 (fun)</b>	64
<b>TS2 (sup)</b>	64
<b>TS3</b>	40
<b>TOTAL</b>	233

A taxa de aproveitamento mensal dos dados de temperatura e de salinidade ao longo do período estudado está exposta na Figura 3 e na Figura 4. Observa-se que TS1 e TS2 (fun) foram as estações com as maiores e menores taxas de aproveitamento de dados, respectivamente.

TEMPERATURA

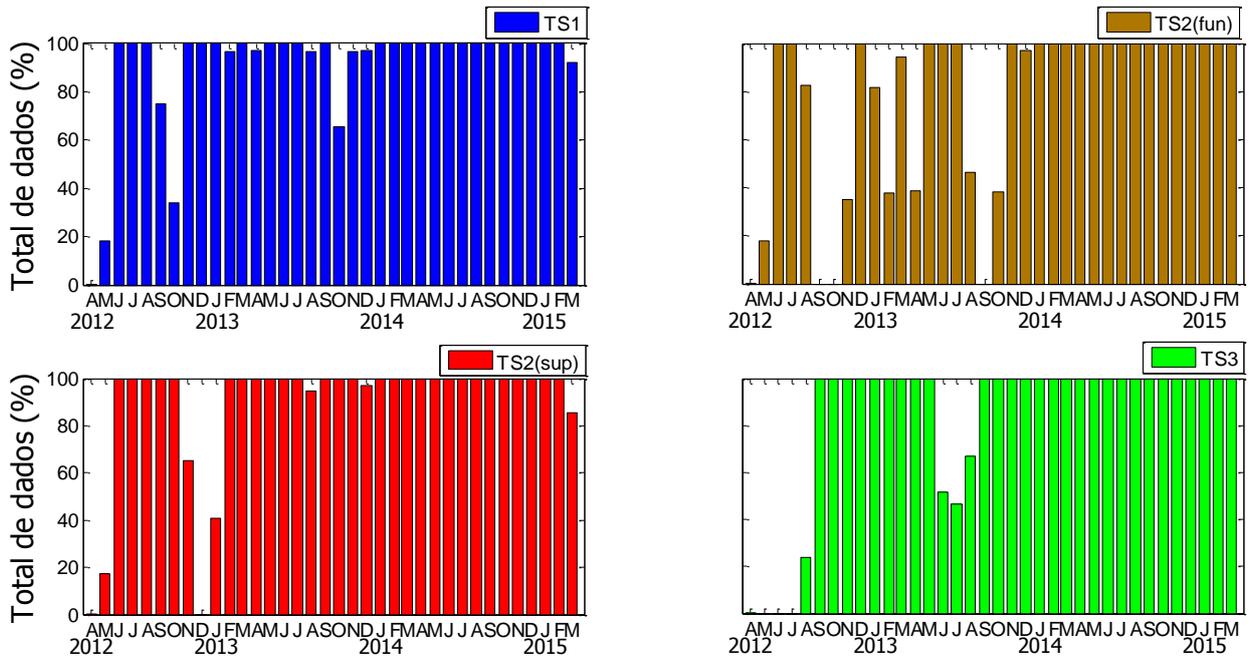


Figura 3 – Total de dados (%) da temperatura da água para cada mês e cada estação: TS1 (azul), TS2-fun (marrom), TS2-sup (vermelho) e TS3 (verde).

SALINIDADE

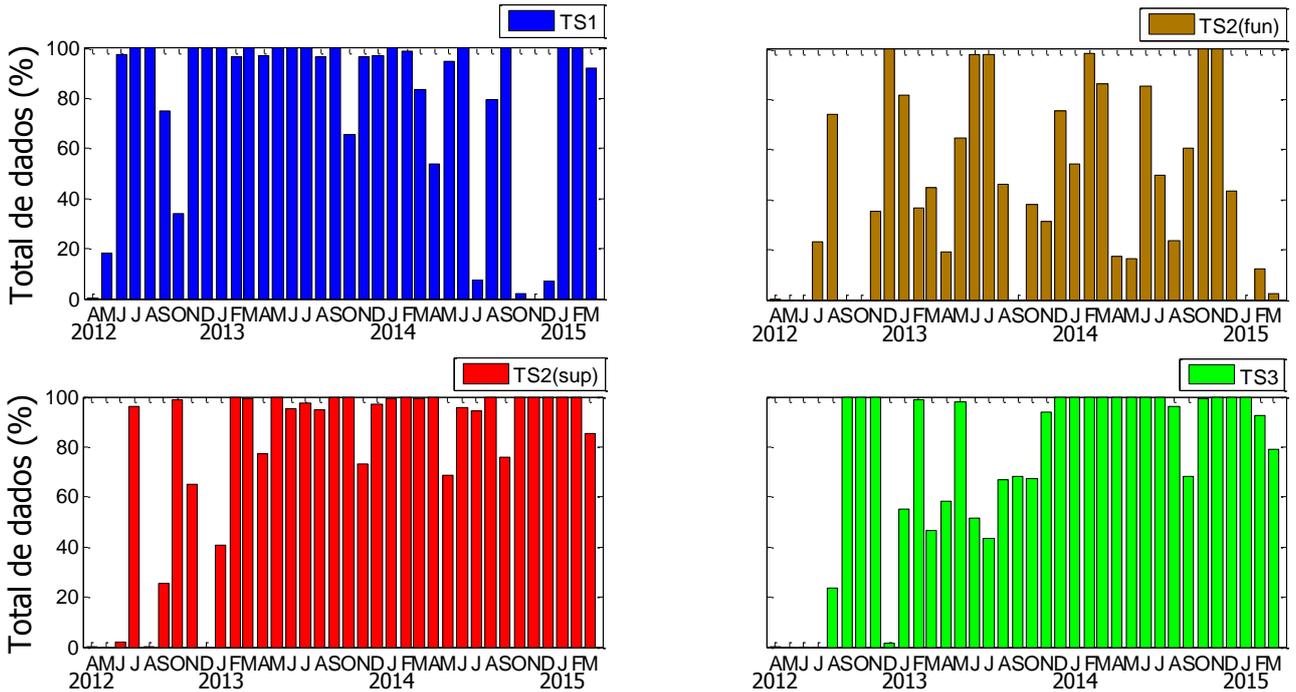


Figura 4 – Total de dados (%) de salinidade da água para cada mês e cada estação: TS1 (azul), TS2-fun (marrom), TS2-sup (vermelho) e TS3 (verde).

Foi adotado o conceito de ano hidrológico neste trabalho, que na região da BTS inicia no mês de abril com o início da estação chuvosa e finda no mês de março do ano seguinte com o término da estação seca (Tabela 3).

**Tabela 3 – Exemplo de um ano hidrológico da BTS.**

<b>2012</b>	<b>Ano Hidrológico 2013</b>										<b>2013</b>
Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar

Os dados de temperatura e de salinidade foram filtrados em bandas para análise das variações em frequência mareal (11 – 12,4 horas) e diurna (23 – 25 horas), eliminando, assim, as oscilações com períodos superiores e inferiores às das frequências desejadas. Também, foi aplicado o filtro de passa-baixa com período de corte de 73 horas, com o objetivo de remover as oscilações de alta frequência. Foram feitas análises harmônicas da série de temperatura e de salinidade para todas as estações hidrológicas através do pacote de rotina T\_TIDE. Os cálculos das médias mensais de temperatura e de salinidade foram feitos considerando os meses com pelo menos 50% do total de dados mensal. As correlações entre as estações hidrológicas foram obtidas pelo coeficiente de correlação de Pearson (R) através das seguintes relações: i) superfície (TS3) x superfície (TS2-sup); ii) fundo (TS1) x fundo (TS2-fun); e iii) superfície (TS2-sup) x fundo (TS2-fun).

#### **4.1.2 Dados Meteorológicos**

Séries de dados meteorológicos de longa duração foram obtidas junto ao INMET para as estações de Salvador (A401, código OMM: 86678) e Cruz das Almas (A406, Código OMM: 86657), e junto ao METAR para o Aeroporto de Salvador (código ICAO: SBSV; código OMM: 83248). Essas três estações, que estão localizadas na Figura 1, serão dotadas das seguintes abreviaturas: SSA, CRZ e AERO. As três estações fornecem totais diários de precipitação e horas de insolação (relativo à situação com o sol descoberto), além de médias diárias de temperatura do ar (mínima, média compensada e máxima), de vento (direção e magnitude) e taxa de radiação solar.

A partir dos totais diários e mensais da precipitação, totais anuais (hidrológicos) foram calculados, além de médias climatológicas mensais e anuais correspondentes aos períodos 1963-2015, 1961-1990 (SSA) e 1986-2015 (SSA e CRZ). Médias climatológicas mensais da temperatura média do ar e da insolação foram calculadas para o período de 1986-2015 (SSA e CRZ). Foi aplicado na série temporal de vento o filtro de

passa-baixa com período de corte de 53 horas a fim de retirar o efeito da brisa. Além disso, foram extraídas as componentes meridional e zonal do vento.

#### **4.1.3 Descarga Fluvial**

Dados de vazão média diária da barragem de Pedra do Cavalo foram disponibilizados pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) para o grupo de pesquisa GOAT-UFBA (Grupo de Oceanografia Tropical). Assim, foi possível calcular as médias mensais e anuais correspondentes ao período deste trabalho além das médias climatológicas diárias e mensais correspondentes para o período de operação da barragem de Pedra do Cavalo (1986 a 2016). Também, para cada ano deste período, foi determinado o volume total (V) descarregado pela represa a partir da integração das vazões médias diárias (Q), relativo ano hidrológico referente à BTS, de acordo com a equação:

$$V = \sum_{i=1}^{365} Q_i (m^3 s^{-1}) \cdot 86400 (s)$$

#### **4.1.4 Maregrafia**

Foram utilizados dados de oscilação do nível d'água do Porto de Salvador, em intervalos de 5 minutos, disponibilizados pelo IBGE. Além disso, sensores de pressão associados à correntômetros fundeados no leito da baía forneceram dados complementares de variação do nível d'água entre janeiro e setembro de 2015 (TS1) e entre setembro de 2012 e maio de 2013 (TS3).

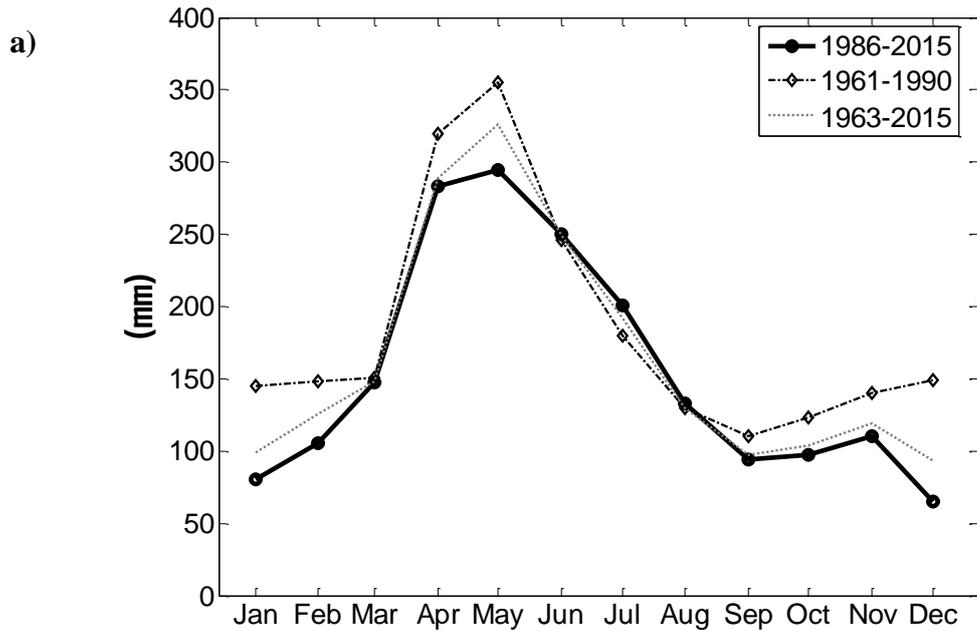
## **5 RESULTADOS**

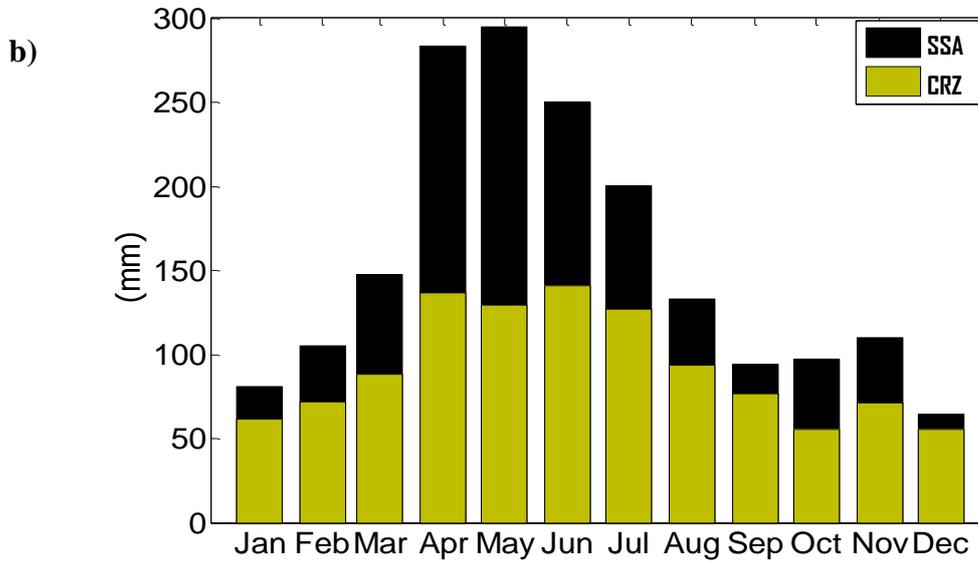
### **5.1 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA E FLUVIAL**

#### **5.1.1 Precipitação**

Os totais anuais para as climatologias de 1963-2015, 1961-1990 e 1986-2015 foram de 1972 mm, 2100 mm e 1861 mm, respectivamente. A climatologia do total mensal de precipitação em Salvador para os dois períodos climatológicos (1961-1990 e 1986-2015) estão apresentadas na Figura 5.a, que também apresenta as médias mensais para toda a série temporal. Observa-se que os meses de abril e maio são os mais chuvosos

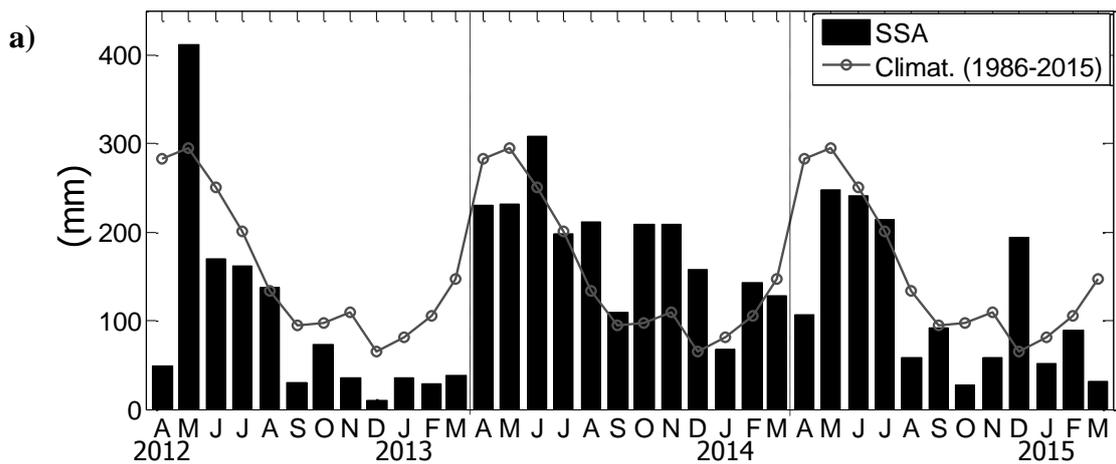
em todas as climatologias, enquanto que os meses de setembro, dezembro e janeiro são os mais secos. É nítida a diminuição dos totais mensais de precipitação na climatologia de 1986-2015 entre outubro e fevereiro, além dos meses de abril e maio. A Figura 5.b mostra a climatologia mensal (1986-2015) de precipitação para Salvador e Cruz das Almas, evidenciando uma diminuição das taxas de precipitação ao longo do eixo principal da BTS, em direção ao rio Paraguaçu. Para as duas estações o intervalo entre abril e julho corresponde ao período mais chuvoso, atingindo o máximo de 295 mm em maio (Salvador) e 140 mm em junho (Cruz das Almas).



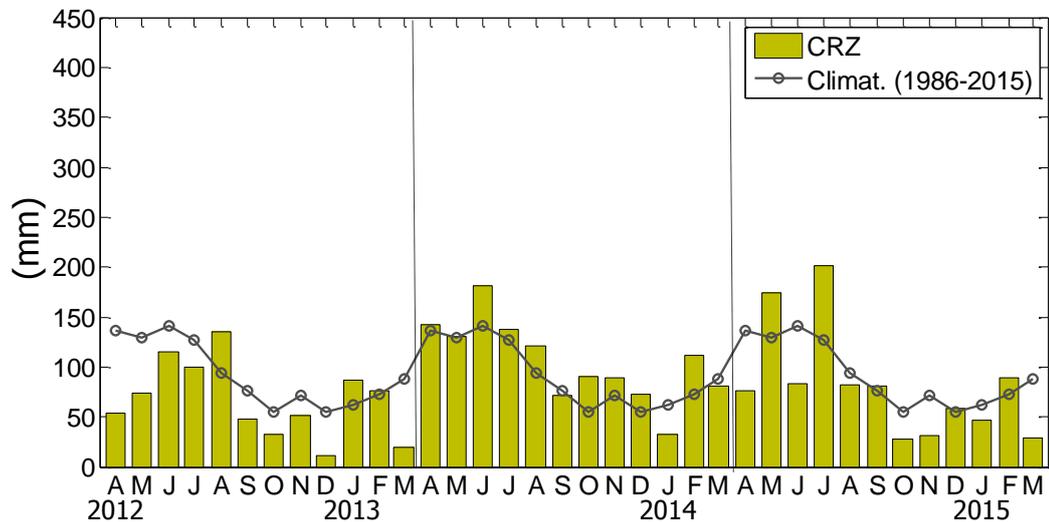


**Figura 5 - (a) Normais climatológicas de precipitação acumulada mensal em Salvador (SSA); (b) Normais climatológicas (1986-2015) mensais de precipitação na estação de Salvador (SSA) e Cruz das Almas (CRZ).**

O total mensal acumulado em ambas as estações para os três anos hidrológicos de estudo (Figura 6) foram quase sempre inferiores às normais climatológicas, valendo destacar a aridez da primavera e do verão do ano hidrológico de 2013, quando foi registrado o mês mais seco (dezembro) nas duas estações durante os três anos hidrológicos de estudo. Entretanto, em SSA e CRZ, os totais mensais do ano hidrológico de 2014 foram continuamente mais úmidos quando comparados ao dos demais anos.

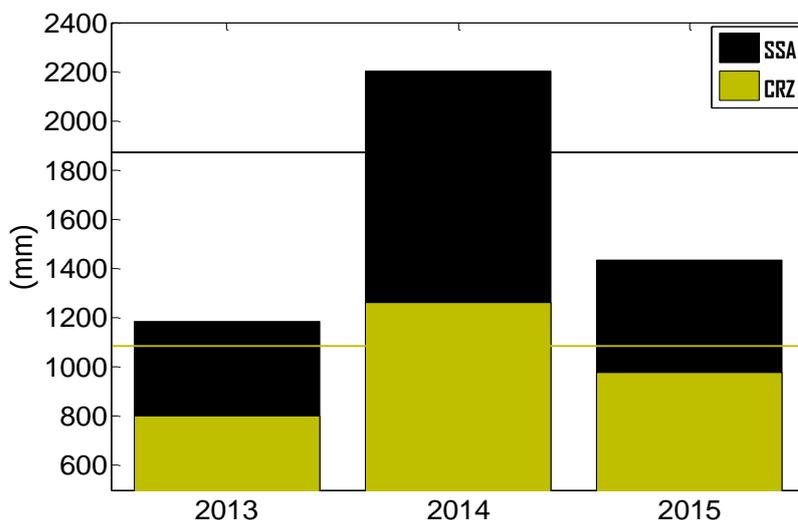


b)



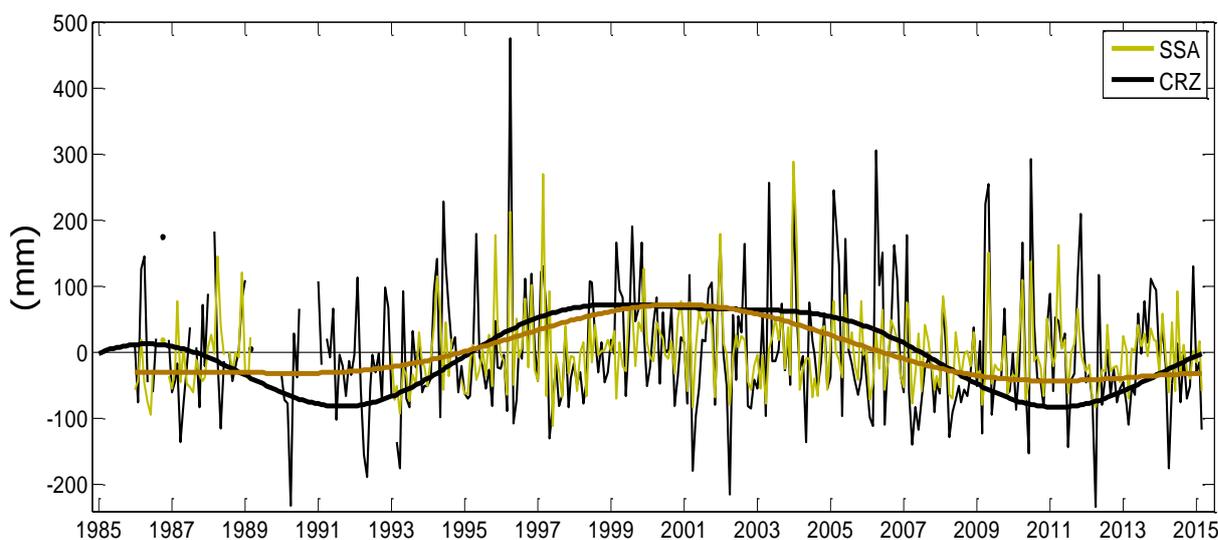
**Figura 6 - Precipitação acumulada mensal em SSA (a) e CRZ (b) para os anos de estudo deste trabalho. Os círculos pretos correspondem às médias climatológicas (1986-2015). A linha vertical preta separa cada ano hidrológico de estudo.**

Os totais anuais de precipitação correspondentes aos anos hidrológicos em estudo estão expostos na Figura 7 e mostram o ano de 2013 como o mais seco, com total de 1184 mm em Salvador e 801 mm em Cruz das Almas, ficando bem abaixo das médias climatológicas. Em ambas as estações ocorreu um aumento relativo de precipitação nos anos de 2014 e 2015, sendo o ano de 2014 o mais úmido com 2204 mm (SSA) e 1261 mm (CRZ), ficando acima da média climatológica nas duas estações.



**Figura 7 - Precipitação acumulada anual em SSA (preto) e CRZ (amarelo) para os anos hidrológicos de 2013, 2014 e 2015. As linhas representam as normais climatológicas anuais (1986-2015).**

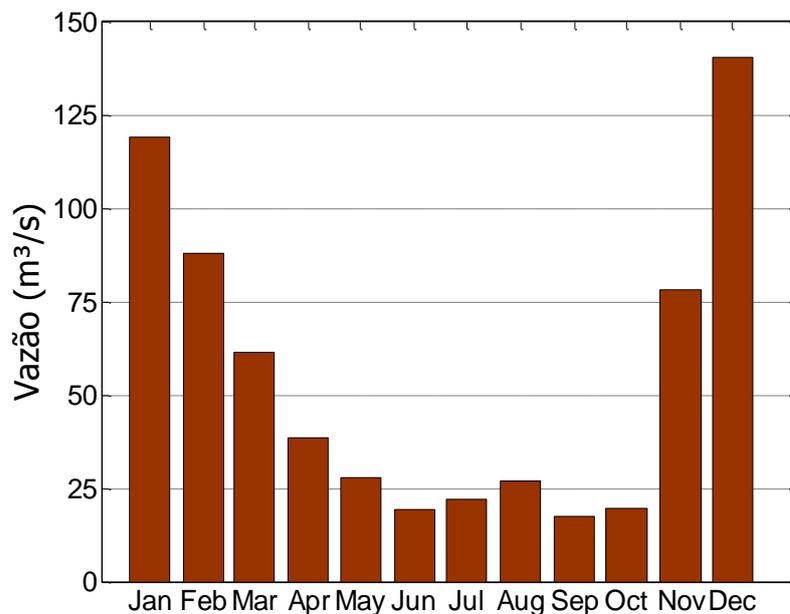
A Figura 8 apresenta as anomalias de precipitação mensal com base na climatologia de 1986-2015 para SSA e CRZ. Observa-se que o período entre 2012 e início de 2013 foi consideravelmente seco, com anomalias de -231,8 mm (SSA) e -80,1 mm (CRZ), tendo ocorrido uma transição para uma situação relativamente mais úmida nos anos seguintes (anomalias positivas). As anomalias de precipitação filtradas em dez anos mostram as variações interdecenais, além de um claro ciclo com período em torno de vinte anos de extensão, e evidencia a tendência de anomalias negativas de precipitação nos últimos dez anos. Entretanto, nos anos de 2014 e 2015 existiu a tendência de diminuição das anomalias negativas, que foi mais notado em SSA.



**Figura 8 - Anomalias de precipitação mensal com base na climatologia de 1986-2015 (Salvador e Cruz das Almas). As linhas grossas em vermelho e preto representam as mesmas séries de anomalias de precipitação filtradas com ponto de corte de dez anos em SSA e CRZ, respectivamente.**

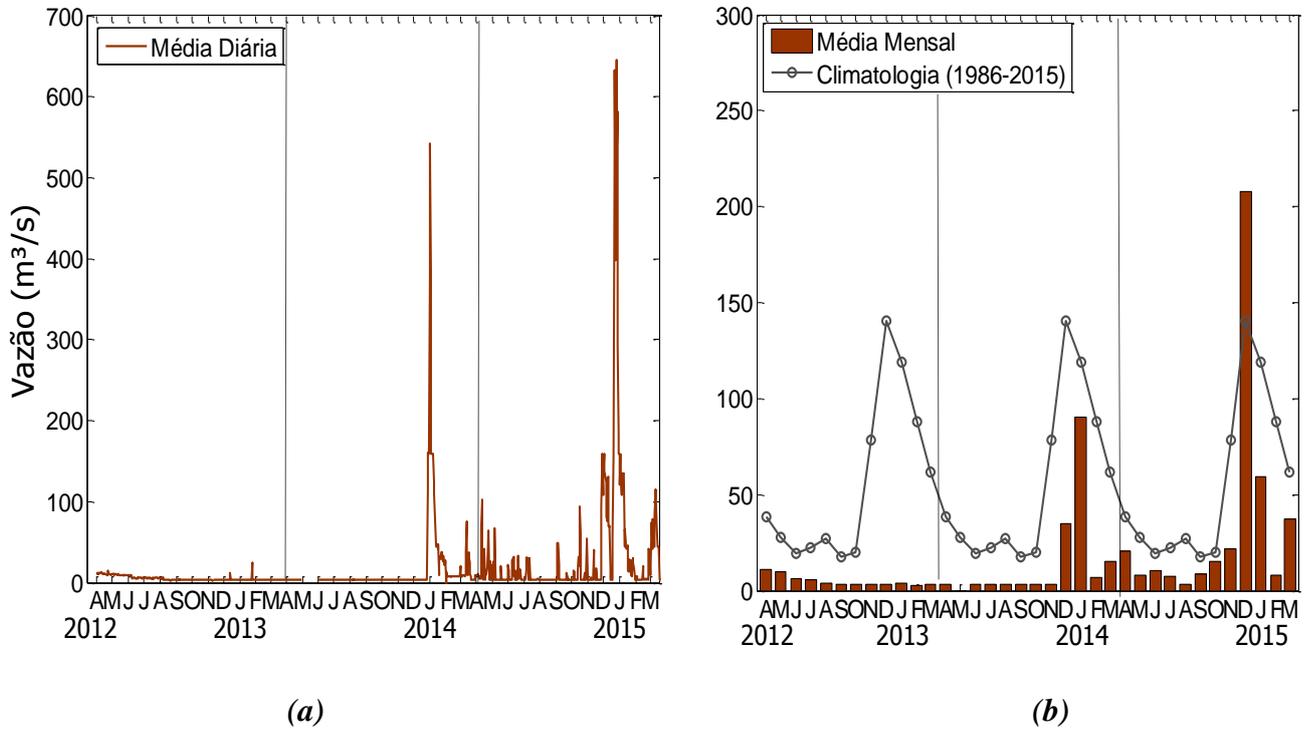
### 5.1.2 Descarga Fluvial

Médias mensais climatológicas foram calculadas a partir da série das vazões médias diárias entre 1986 e 2015. Nota-se que os maiores picos de vazão de Pedra do Cavalo ocorrem no verão, destacando os meses de dezembro e janeiro, quando a descarga média diária é de 140 m<sup>3</sup>/s e 118 m<sup>3</sup>/s, respectivamente (Figura 9). O inverno e a primavera são as estações mais secas, com vazões médias diárias inferiores a 26 m<sup>3</sup>/s entre junho e setembro.



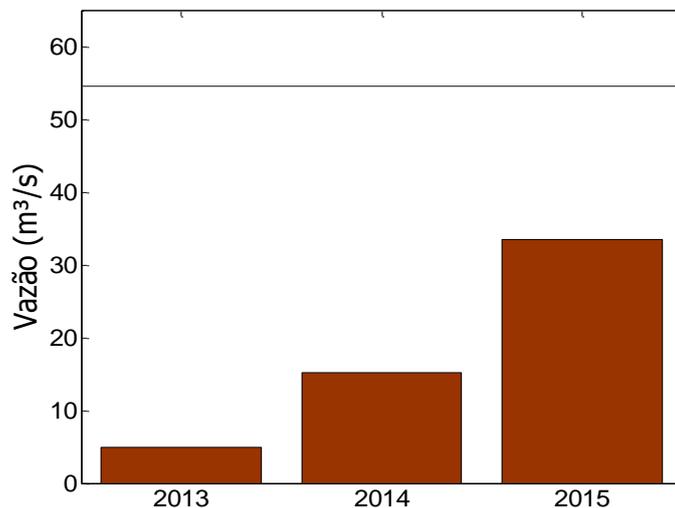
**Figura 9 - Normais climatológicas mensais da vazão da barragem de Pedra do Cavalo correspondentes ao período de 1986-2015.**

A Figura 10 mostra as médias diárias e mensais de vazão de Pedra do Cavalo para os anos hidrológicos de 2013 a 2015. Observa-se que nos anos de 2013 e 2014 as vazões médias diárias foram quase nulas, sendo majoritariamente inferiores a 20 m<sup>3</sup>/s, e as vazões médias mensais ficaram continuamente muito abaixo da média climatológica. O aumento das vazões ocorreu a partir de dezembro de 2013, quando ocorreu a primeira descarga de vulto após mais de dois anos de seca. A maior vazão média mensal ocorreu em dezembro de 2014, alcançando 208 m<sup>3</sup>/s, quando durante sete dias registraram-se médias diárias superiores a 400 m<sup>3</sup>/s, atingindo um máximo de 608 m<sup>3</sup>/s (Figura 10.a).

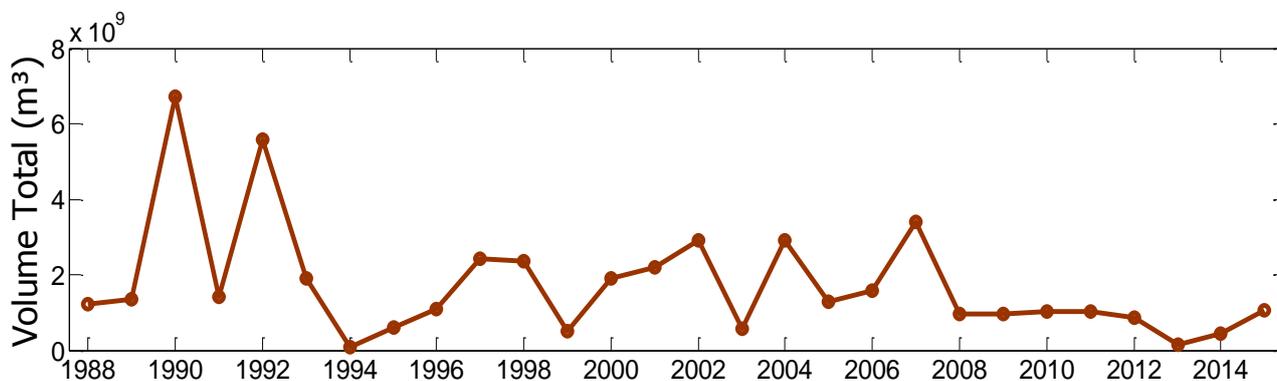


**Figura 10: Vazão defluente da barragem de Pedra do Cavalo: média diária (a) e média mensal (b). A linha cinza (b) representa as normais climatológicas (1986-2015). A linha vertical preta separa cada ano hidrológico de estudo.**

As vazões médias diárias dos anos hidrológicos investigados foram de 4,9 m³/s (2013), 15,3 m³/s (2014) e 33,5 m³/s (2015), todos inferiores à vazão média defluente da barragem de Pedra do Cavalo entre 1986 e 2015, que foi de 55,1 m³/s. Contudo, existiu uma tendência de aumento das vazões médias ao longo dos três anos (Figura 11). A Figura 12 mostra a variação do volume anual afluente à BTS e ilustra de uma forma mais clara quão seco foi o ano de 2013, o segundo ano com o menor volume anual ( $1,54 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) de todo o registro histórico pós barragem. O ano de 1994 foi o mais seco, com apenas  $7,97 \times 10^7 \text{ m}^3$ . Após 2013 observa-se a tendência de aumento relativo do volume de descarga.



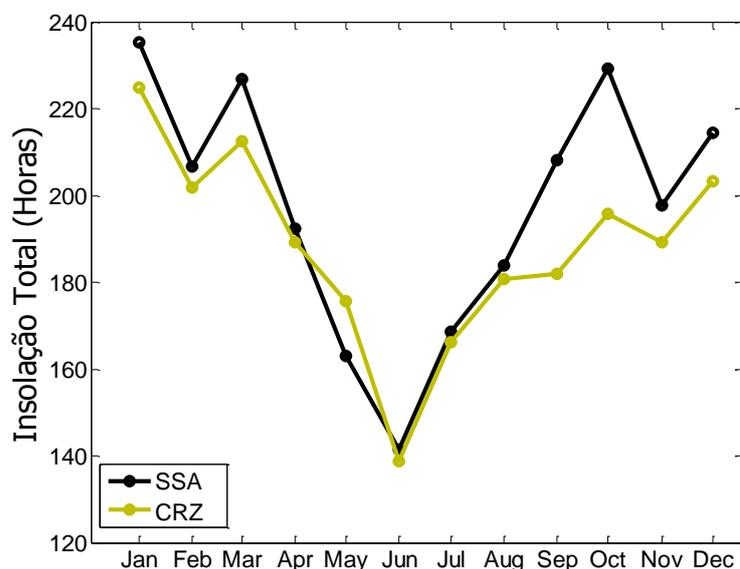
**Figura 11 – Vazão média diária para os anos hidrológicos de 2013, 2014 e 2015. A linha preta representa a vazão média diária para o período de 1986-2015.**



**Figura 12 - Volume total descarregado por ano hidrológico (relativo à BTS) pela barragem de Pedra do Cavalo.**

### 5.1.3 Insolação e Radiação

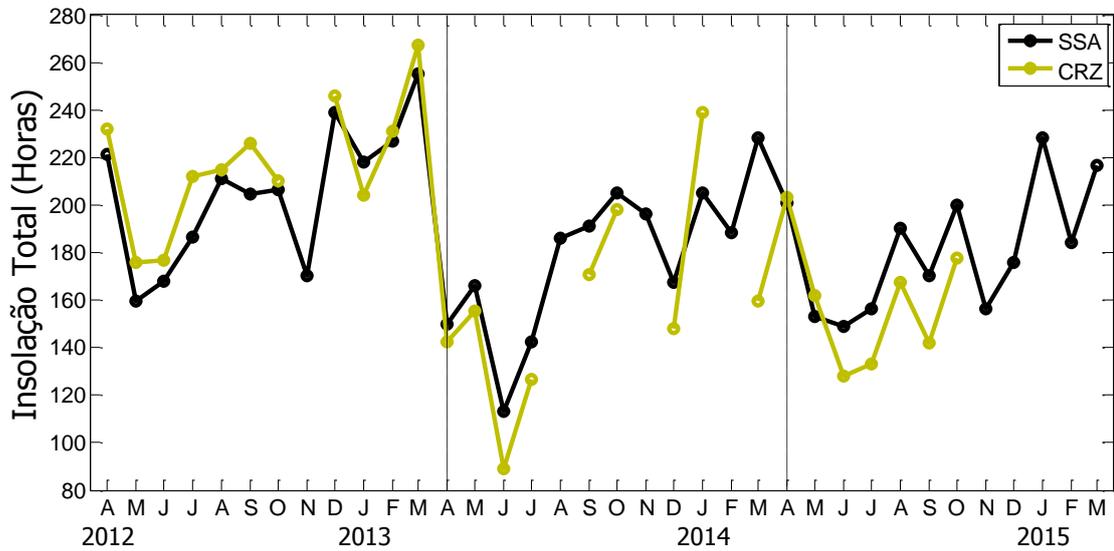
Os resultados das médias mensais climatológicas de insolação estão expostos na Figura 13. O verão e a primavera são as estações que apresentam as maiores horas de insolação, ocorrendo o máximo tipicamente em janeiro tanto para SSA (235 horas) quanto CRZ (224 horas). O outono e o inverno correspondem ao período de menores horas de insolação, tendo o mínimo em junho (~140 horas) em ambas as estações.



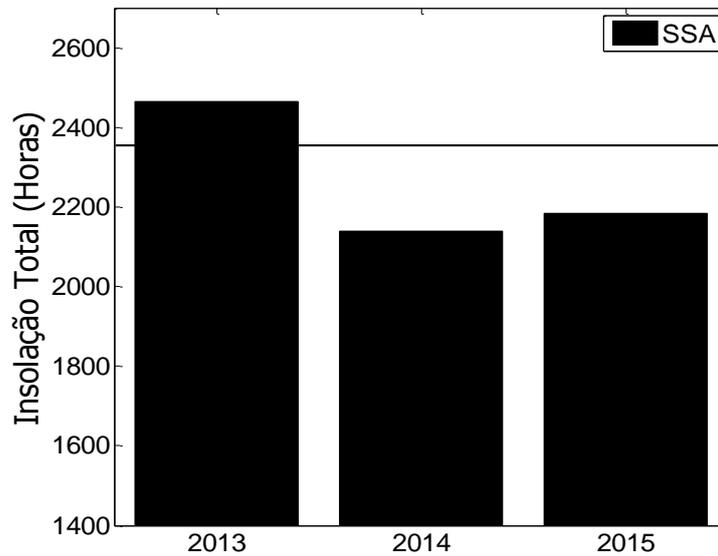
**Figura 13 - Médias mensais climatológicas (1986-2015) de horas de insolação em SSA e em CRZ.**

O total de horas de insolação mensal para os anos hidrológicos de 2013 a 2015 estão expostos na Figura 14.a. A sazonalidade da insolação é observada em todos os anos, porém é mais evidente em 2013. Picos de insolação ocorrem no verão, e valores mínimos no inverno. No verão de 2013 foram registradas os maiores totais mensais, com o mês de março somando 254 horas em SSA e 267 horas em CRZ, acima das médias climatológicas.

Os totais anuais de insolação (Figura 14.b) mostram que o ano de 2013 registrou o maior número de horas de exposição solar, totalizando 2466 horas de insolação, superior a média climatológica de 2367 horas, referente ao período entre 1986 e 2015. O ano de 2014 foi o que apresentou o menor número de horas, totalizando 2139 horas de insolação. Assim, o ano de 2013 teve cerca de 280 horas a mais de exposição solar do que os demais anos. A série temporal de insolação em CRZ está muito fragmentada, e por isso seu total anual não foi contabilizado.



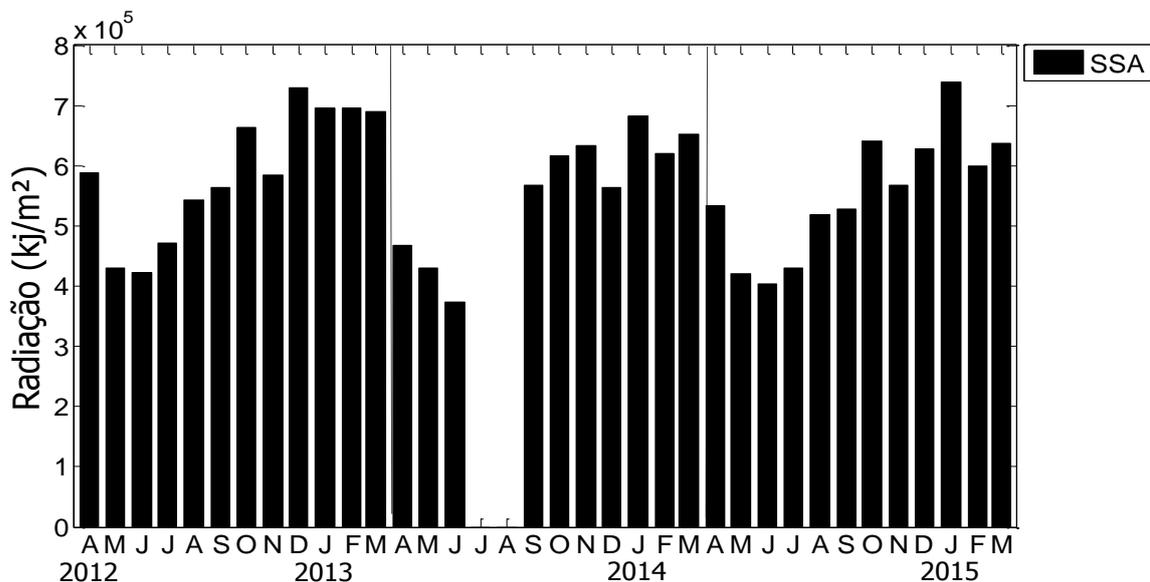
(a)



(b)

**Figura 14 - Insolação total mensal em SSA e em CRZ (a) e anual (b) em SSA. A linha preta (b) corresponde à média climatológica (1986-2015) do total anual de insolação em SSA.**

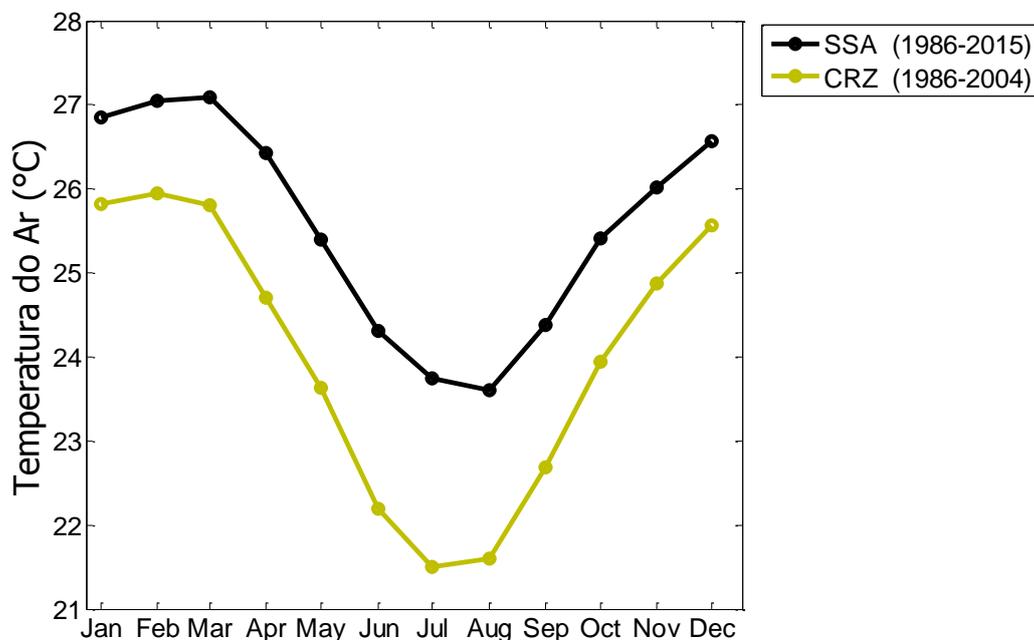
A taxa de radiação solar mensal, em SSA, seguiu o comportamento sazonal da insolação, como esperado. O verão de 2013 foi marcado por uma continuidade de elevadas taxas de radiação (Figura 15), que foram superiores em relação aos outros anos. Existiram lacunas em julho e agosto de 2013 e por isso não foram calculados os totais anuais.



*Figura 15 – Radiação solar total mensal em SSA.*

#### 5.1.4 Temperatura do Ar

As normais climatológicas mensais da temperatura média do ar calculadas são mostradas na Figura 16 para as duas estações. As maiores temperaturas médias do ar ocorrem em SSA, porém ambas as estações apresentam o mesmo comportamento sazonal: as maiores temperaturas ocorrem em fevereiro e março e as menores temperaturas nos meses de julho e agosto.



**Figura 16 - Normais climatológicas mensais da temperatura média do ar em SSA (1986-2015) e CRZ (1986-2004).**

As médias das temperaturas instantâneas do ar (Figura 17) para os períodos de verão e de inverno dos três anos hidrológicos de estudo mostram temperaturas máximas ocorrendo por volta das 13:00 horas, com amplitude média diária no verão (~ 6°C) quase duas vezes maior que a amplitude diária no inverno (~3,4 °C). Observa-se que as maiores e menores temperaturas médias do ar ocorreram no verão e inverno de 2013. Existiram muitas lacunas no inverno de 2014 e por isso este não foi contabilizado. Os registros horários da temperatura do ar (SSA) mostraram que as amplitudes máximas diárias de temperatura foram de 7 °C (Figura 18). Existiu uma clara sazonalidade, com maior amplitude em 2013. Analisando os dados diários nesta figura, é evidente que o verão de 2013 apresentou as maiores temperaturas de toda a série, atingindo um máximo de 34,4 °C em março, além de temperaturas médias neste período acima das médias climatológicas. Também, nesse mesmo ano ocorreu o valor mínimo registrado (17,5°C) em agosto. Analisando a sazonalidade da temperatura do ar, percebe-se que existe uma assimetria entre os períodos de aquecimento e resfriamento. Em média, o período de aquecimento dura sete meses, de setembro a março, e o período de resfriamento dura somente quatro ou cinco meses, ocorrendo de abril a agosto. Os dados de temperatura média do ar em CRZ para o período de 2012 a 2015 não foram disponibilizados.

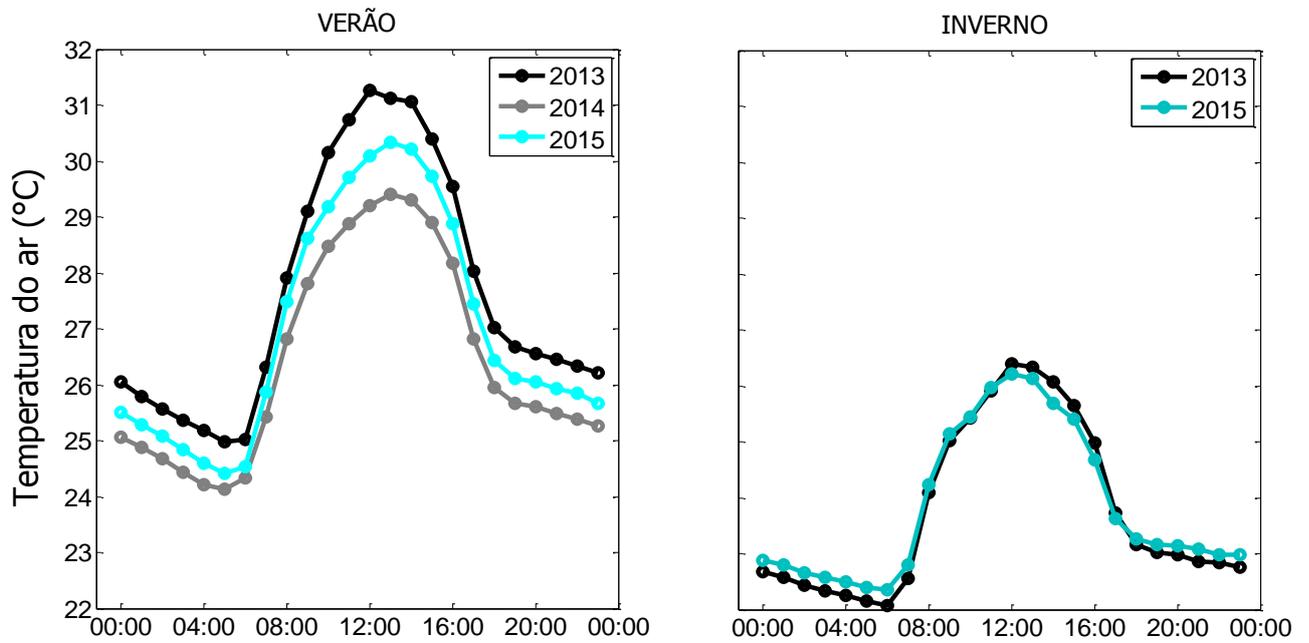


Figura 17 – Temperatura do ar média correspondente para cada hora do dia no verão e no inverno dos três anos hidrológicos em SSA.

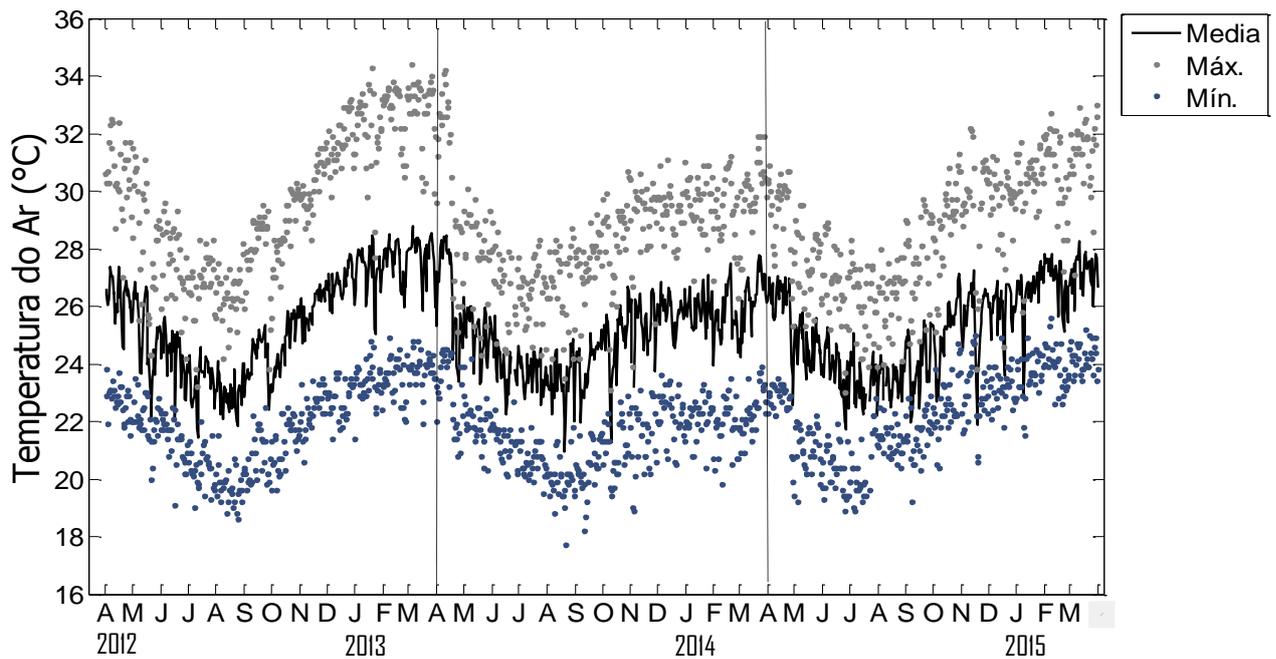
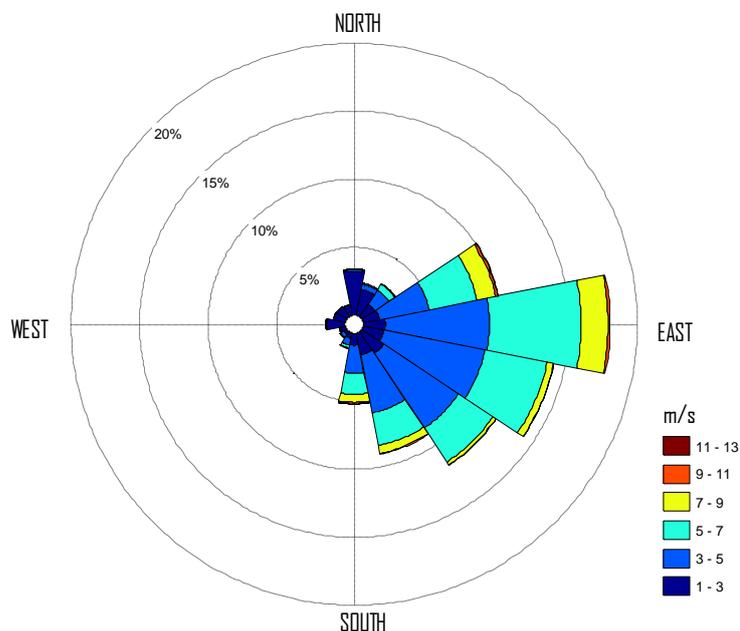


Figura 18 - Dados diários da temperatura mínima, média e máxima do ar em SSA.

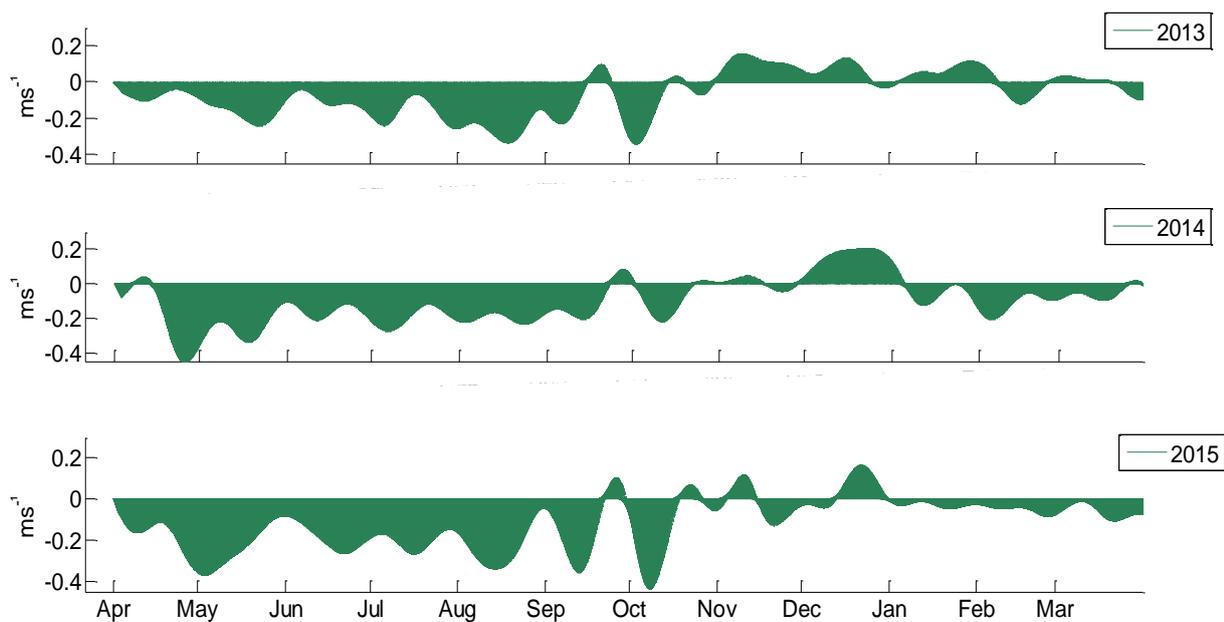
### 5.1.5 Vento

A distribuição de frequência da direção e magnitude do vento em AERO ao longo dos três anos de estudo mostra que a direção dominante foi de leste (Figura 19), seguido por ESE, SE e NE. Ventos de SSE e

S também foram registrados, porém com frequência inferior a 10%. A velocidade média para todo o período foi de 4,2 m/s, As maiores velocidades do vento (> 10 m/s) estiveram associadas à direção E. Notam-se maiores ocorrências de ventos de leste e nordeste no verão e ventos de sudeste no outono e no inverno (Figura 20).

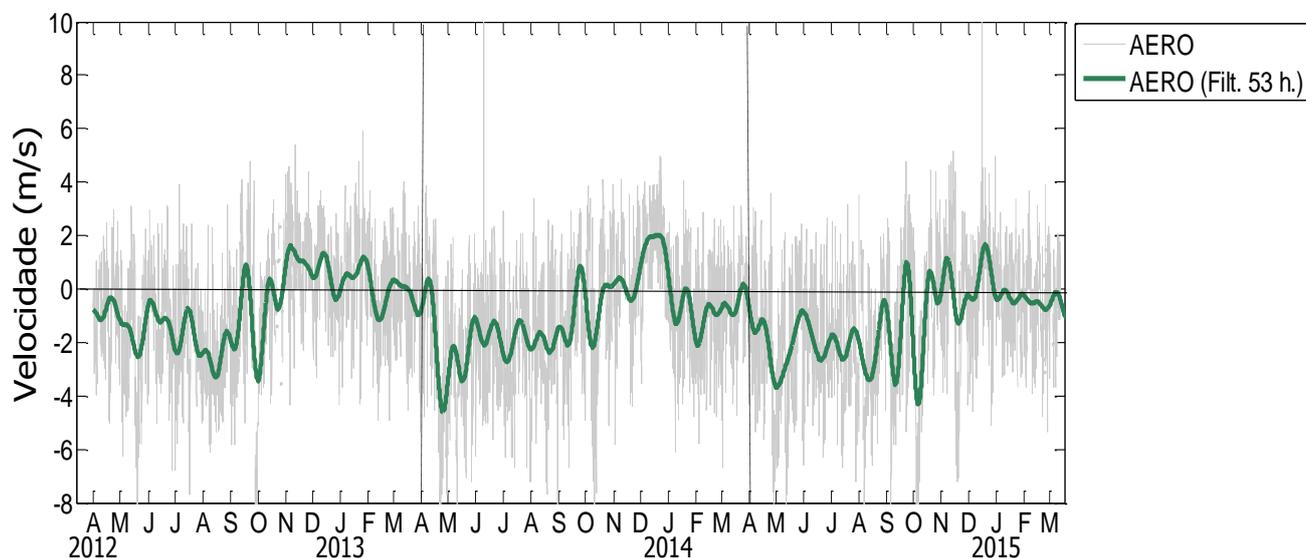


**Figura 19 - Distribuição de frequências de direção e magnitude dos registros horários de ventos em AERO.**

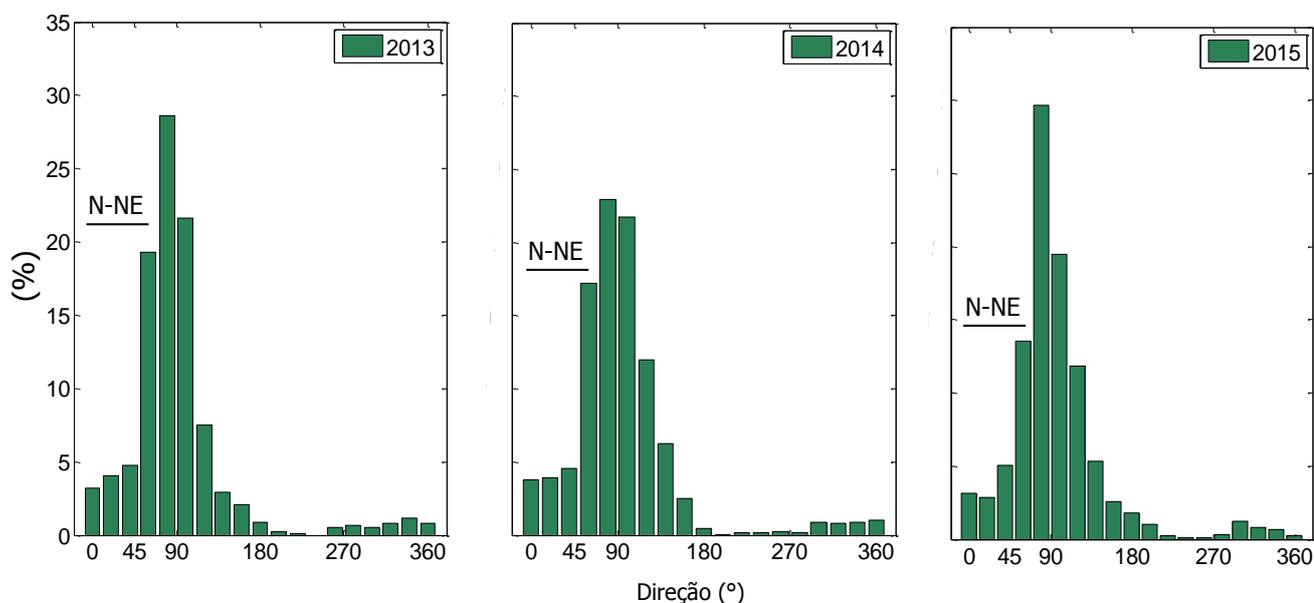


**Figura 20 – Stickplot da série temporal do vento filtrado em 53 horas (período subinercial) para cada ano de estudo em AERO.**

A Figura 21 mostra a série temporal da velocidade do vento longitudinal à costa para os três anos de estudo. Nota-se que as velocidades positivas do vento (provenientes de nordeste), foram mais frequentes no verão de 2013, como mostra o histograma das direções na Figura 22.



**Figura 21 – Velocidade do vento longitudinal à costa na estação AERO. A linha cinza fina representa a velocidade instantânea na estação e a linha verde grossa representa a velocidade filtrada em 53 horas (período subinercial). Valores positivos indicam ventos vindos de nordeste.**



**Figura 22 – Histograma da direção do vento (AERO) no período de primavera e verão para cada ano hidrológico.**

## 5.2 TEMPERATURA E SALINIDADE DA ÁGUA

A quantidade total de dados amostrados de temperatura e salinidade da água para cada estação hidrológica abrangendo todo o período de estudo deste trabalho são apresentados na Tabela 4. Nesta tabela encontram-se também os valores médios, desvios padrões e a taxa de aproveitamento dos dados. Nota-se que as taxas de aproveitamento dos dados de temperatura foram sempre superiores às taxas dos dados de salinidade. O total de dados (100%) correspondentes aos três anos de monitoramento seria de 26280 (24 x 365 x 3). A Tabela 5 mostra os valores médios, desvios padrões e a quantidade total de dados amostrados para cada ano hidrológico. Observa-se que o ano hidrológico de 2013 foi o que teve menos quantidade de dados amostrados para ambos os parâmetros.

*Tabela 4 - Média, desvio padrão, número de amostragens e a taxa de aproveitamento de dados de temperatura e de salinidade considerando todos os 3 anos hidrológicos.*

		Média	Desvio Padrão	Nº de Amostragens	Aproveitamento (%)
TS1	Temperatura	26.48	1.01	23850	90.8
	Salinidade	36.87	0.47	20344	77.4
TS2 (fun)	Temperatura	27.16	1.14	20248	77.0
	Salinidade	36.05	1.0374	11813	45.0
TS2 (sup)	Temperatura	27.51	1.33	23332	88.8
	Salinidade	35.99	1.0414	20286	77.2
TS3	Temperatura	28.02	1.48	21791	82.9
	Salinidade	32.30	2.3946	18996	72.3

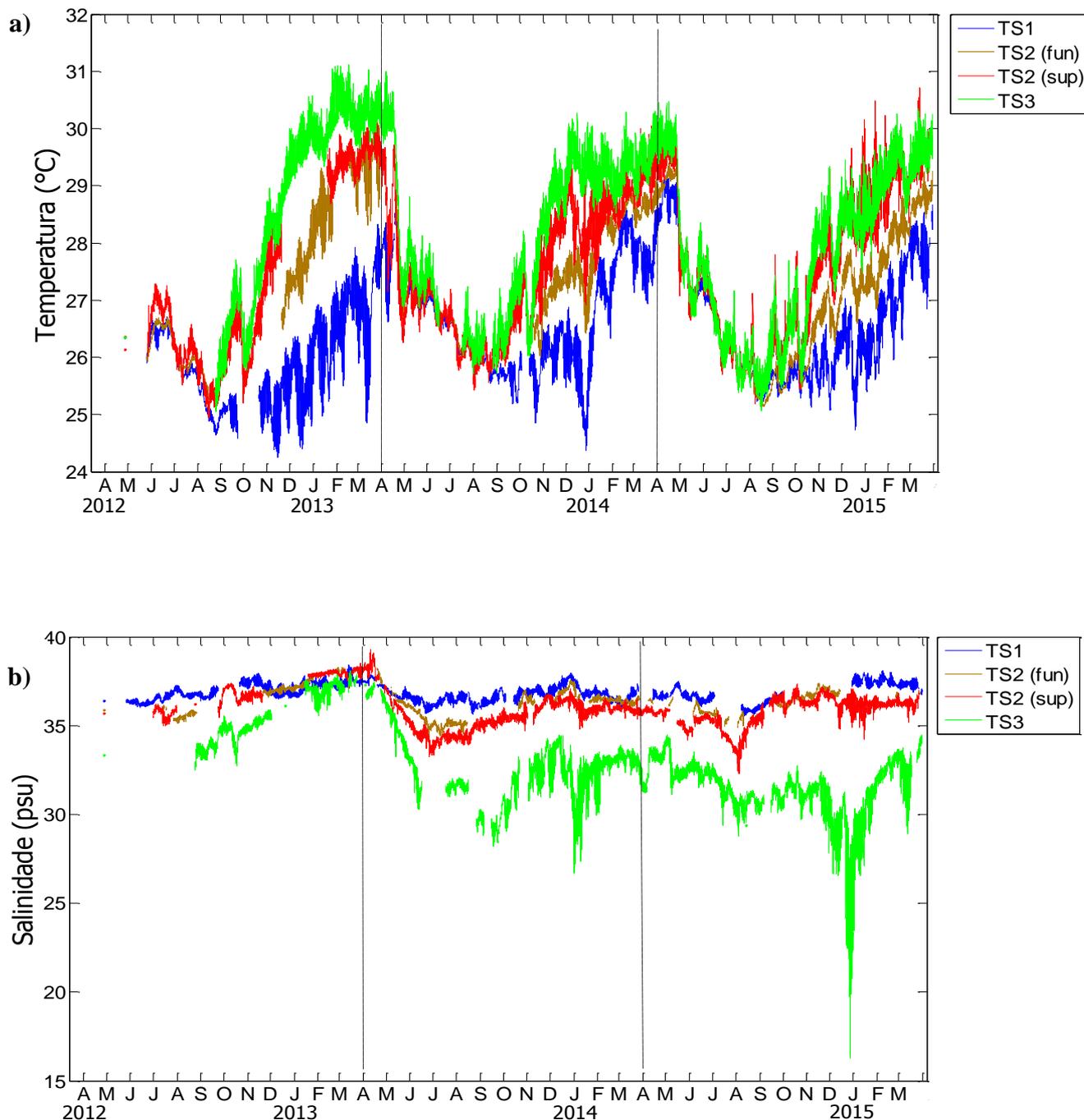
**Tabela 5 - Número de amostras, média e desvio padrão de temperatura e de salinidade para os três anos hidrológicos de estudo.**

	2013					
	Temperatura			Salinidade		
	Nº	Média	Std	Nº	Média	Std
	<b>TS1</b>	6740	25.88	0.79	6722	37.01
<b>TS2 (fun)</b>	4772	27.32	1.42	2908	36.92	0.89
<b>TS2 (sup)</b>	5986	27.27	1.53	3833	37.07	0.9
<b>TS3</b>	5265	28.77	1.58	3796	35.48	1.41
	2014					
	Temperatura			Salinidade		
	Nº	Média	Std	Nº	Média	Std
	<b>TS1</b>	8408	26.65	0.89	8276	36.75
<b>TS2 (fun)</b>	6716	27.40	0.86	5170	36.11	0.76
<b>TS2 (sup)</b>	8700	27.54	1.12	8283	35.66	0.99
<b>TS3</b>	7770	28.21	1.28	6913	32.56	1.84
	2015					
	Temperatura			Salinidade		
	Nº	Média	Std	Nº	Média	Std
	<b>TS1</b>	8702	26.57	1.01	5346	36.89
<b>TS2 (fun)</b>	8760	27.07	1.17	5025	36.30	0.53
<b>TS2 (sup)</b>	8646	27.64	1.34	8170	35.81	0.78
<b>TS3</b>	8756	27.75	1.4	8287	31.36	1.76

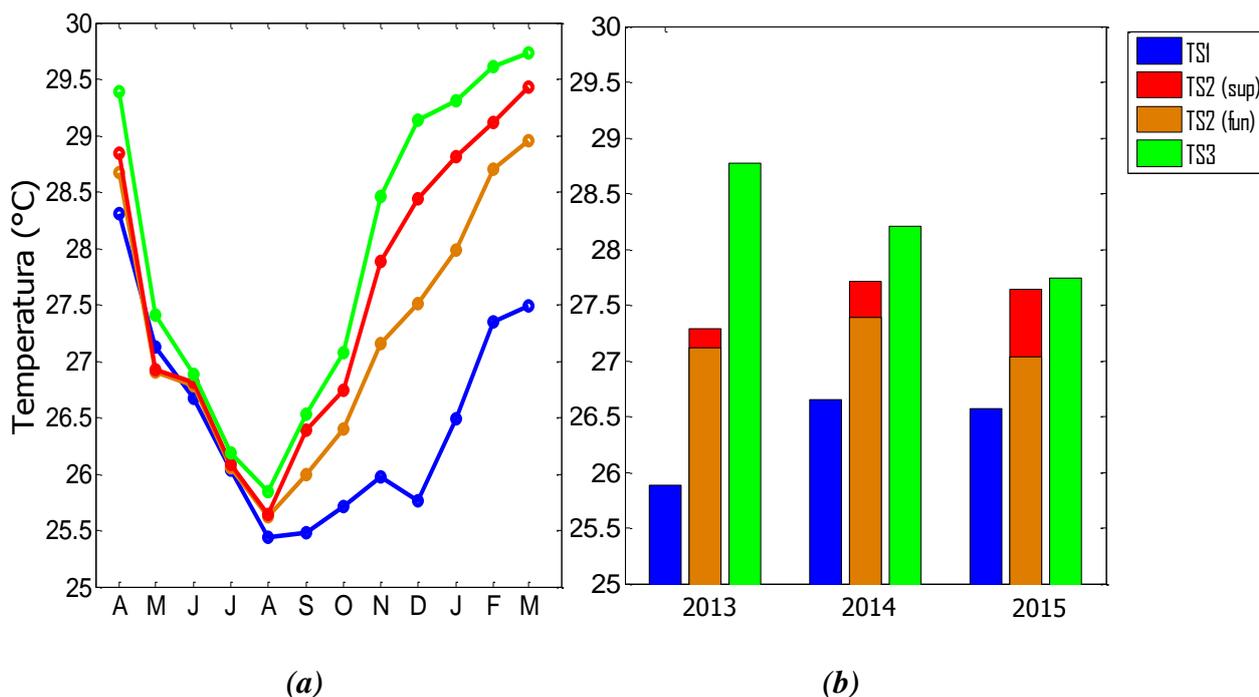
As séries temporais da temperatura e da salinidade da água para as quatro estações de monitoramento são mostradas nas Figura 23. As temperaturas mínimas e máximas registradas foram de 24,2 °C em novembro de 2012 (TS1) e 31,1 °C em fevereiro de 2013 (TS3). Já as salinidades mínimas e máximas foram de 16,3 psu em dezembro de 2014 (TS3), e 39,2 psu em abril de 2013 (TS2-sup), quando se desenvolveu uma situação de hipersalinidade no meio da BTS. Nota-se a tendência de aumento da temperatura de TS1 para TS3 e de diminuição da salinidade de TS1 para TS3, evidenciando a presença de gradientes longitudinais com sentidos opostos na BTS.

Variações sazonais são observadas nas duas grandezas. O comportamento da temperatura da água, para todas as estações, é marcado por uma abrupta diminuição da temperatura no início do outono (abril), chegando a um mínimo no inverno (agosto). Assim, o período entre abril e agosto é caracterizado pela forte redução do gradiente térmico das águas, atingindo uma relativa homogeneidade nos meses de junho e julho. O mês de setembro marca o início de um período de sete meses de aquecimento diferenciado na baía, que gera gradientes tanto horizontais quanto verticais. Valores máximos de temperatura ocorrem em março em

TS2 e TS3, mas apenas em abril em TS1 (Figura 24.a). Esta estação apresentou eventos de quedas de temperatura de até 2,3 °C em intervalos de tempo de menos de 15 dias durante o verão, os quais causaram um resfriamento relativo até março, e assim o máximo da temperatura ocorreu tipicamente em abril. As amplitudes sazonais máximas ocorreram no ano hidrológico de 2013, alcançando 4,0 °C em TS1, 4,9 °C em TS2 (fun), 5,1 °C em TS2 (sup) e 6,0 °C TS3. Ao longo dos três anos de monitoramento existiu uma tendência de diminuição das diferenças espaciais de temperatura entre as estações, com aumento da temperatura nas estações TS1 e TS2 e diminuição em TS3 (Figura 24.b)



**Figura 23 – Série temporal da temperatura da água (a) e da salinidade (b) ao longo dos três anos hidrológicos.**

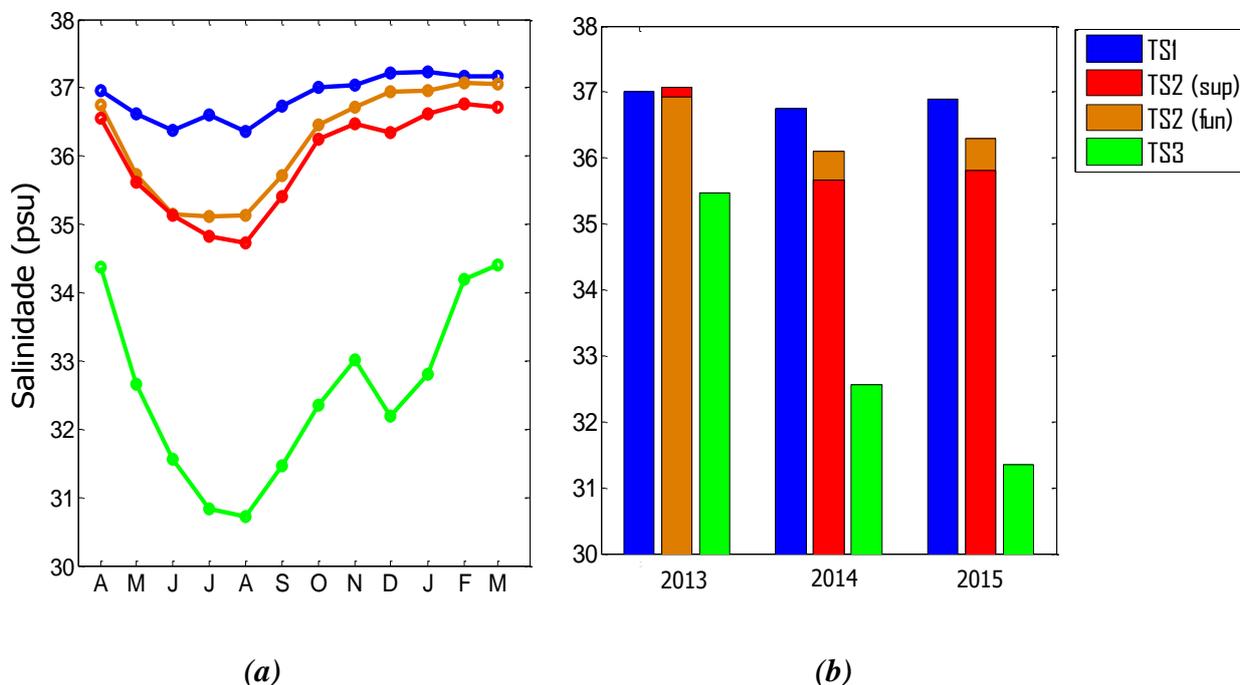


**Figura 24 – Médias mensais da temperatura da água (a) e médias anuais para cada ano de estudo (b).**

O início do ano hidrológico é caracterizado também pela redução da salinidade da água nas quatro estações, acentuando a diferença horizontal e vertical na baía, chegando a valores mínimos de salinidade próximos ao mês de agosto (Figura 23.b). Com a chegada da primavera (setembro), as águas da BTS tendem a se tornar mais salinas, atingindo os máximos de salinidade no final do verão (março). Nota-se que a estação TS3 apresentou valores mínimos de salinidade tanto no final do inverno quanto no início do verão, quando existiu uma redução de até 14,7 psu em menos de 10 dias em dezembro de 2014. Assim, gradientes longitudinais e verticais de salinidade foram maiores no final do inverno comparado ao final verão, porém foram também bem estabelecidos momentaneamente em dezembro. O ciclo sazonal da salinidade é evidenciado de uma forma mais nítida na Figura 25.a. Nota-se que a estação TS1 apresenta salinidade máxima entre dezembro e janeiro, enquanto as demais estações alcançam valores máximos em fevereiro e março. Já os valores mínimos, para todas as estações, ocorrem em agosto, com exceção de TS3. Nota-se que a redução de salinidade no mês de dezembro em TS3 ocorre moderadamente também em TS2 (sup). As amplitudes de variações sazonais máximas foram de 2,5 psu em TS1, 3,1 psu em TS2 (fun), 4,6 psu em TS2 (sup) e 5,9 psu em TS3.

Ao longo dos três anos existiu uma tendência de aumento do gradiente longitudinal de salinidade, como mostra os valores médios anuais na Figura 25.b. Observa-se nesta figura que no ano de 2013 a salinidade

média da estação TS2 (sup) foi maior que a de fundo, o que é creditado ao reduzido número de dados coletados em 2013 (Figura 4).

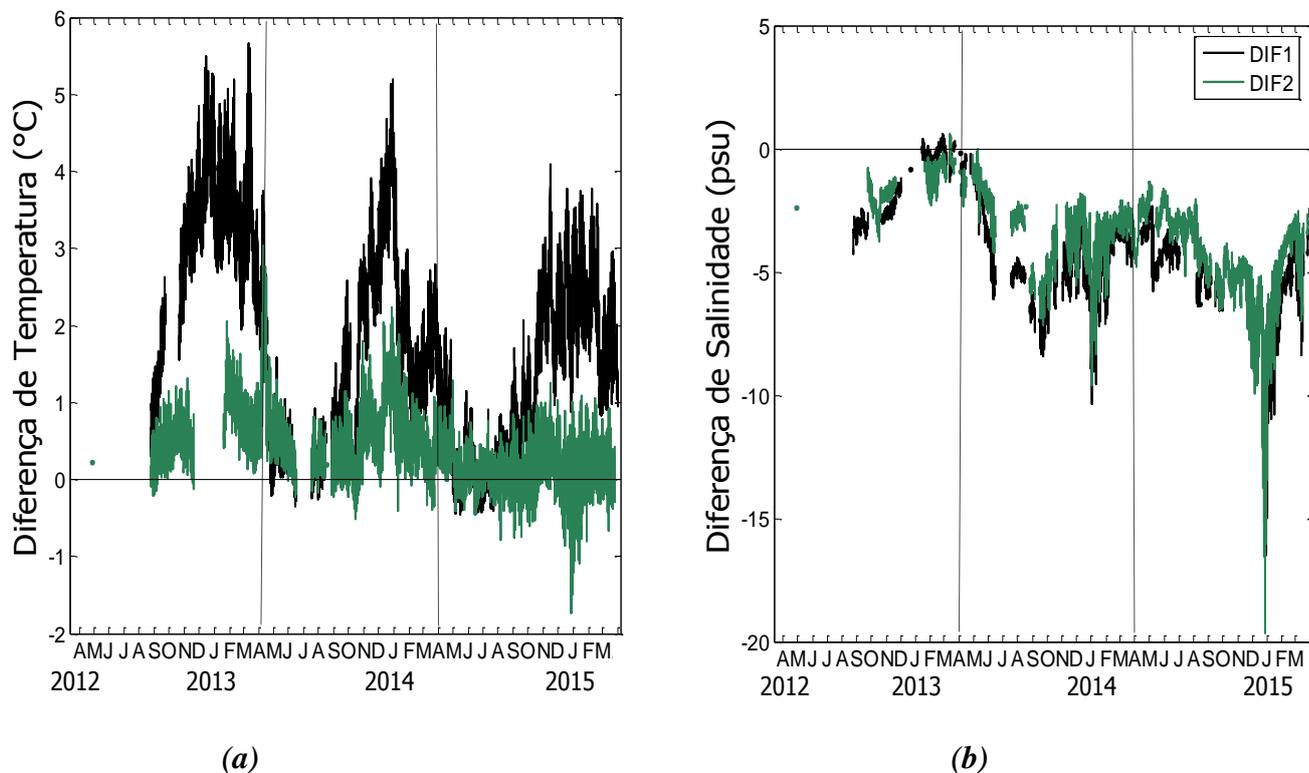


**Figura 25 - Médias mensais (a) e anuais (b) de salinidade para todas as estações hidrológicas.**

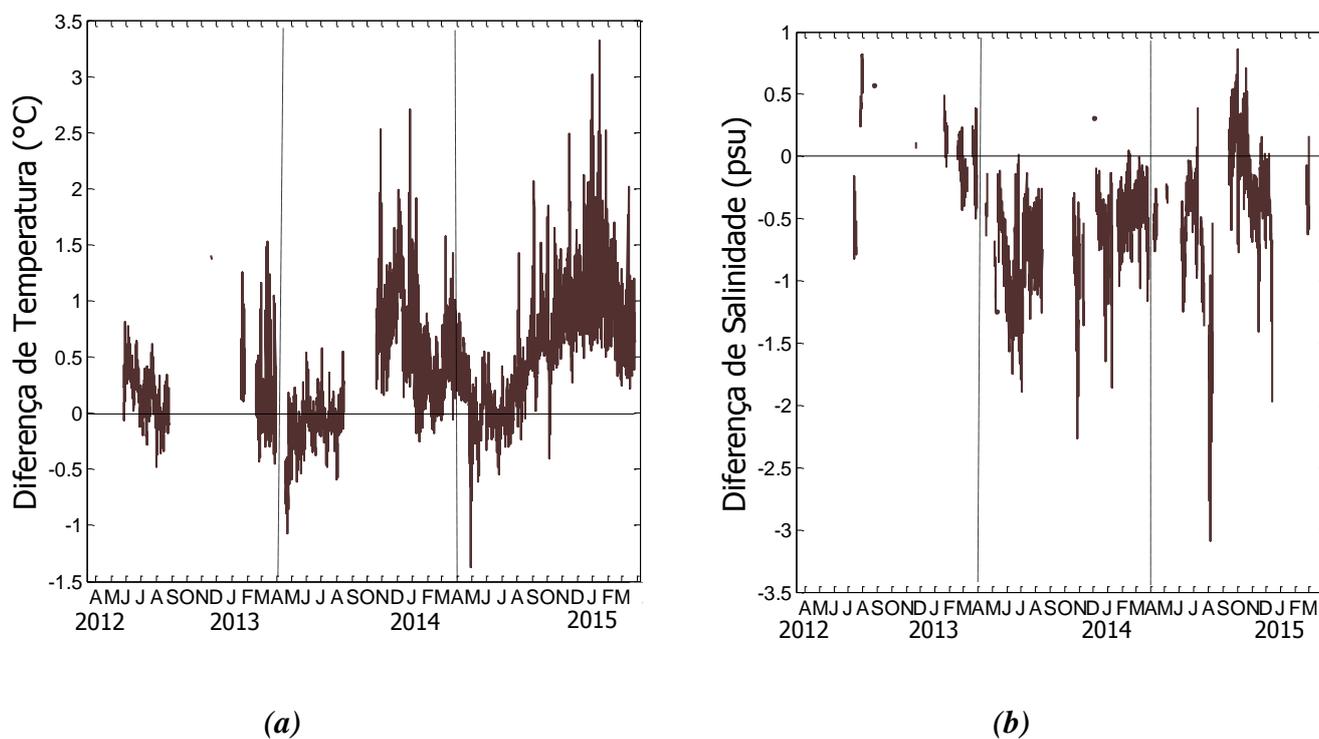
A diferença dos valores de salinidade e temperatura entre as estações está exposta na Figura 26. Nota-se que as maiores diferenças de temperatura (maiores gradientes longitudinais) ocorreram no verão, quando ocorreu uma diferença máxima de 5,6 °C em DIF1 (TS3-TS1) e 3,0 °C em DIF2 (TS3-TS2) em 2013. Diferenças de temperaturas no inverno se tornam negativas, indicando que as temperaturas são menores no interior da BTS. Nota-se uma tendência de diminuição das diferenças de temperatura ao longo dos anos. Analisando a diferença de salinidade (Figura 26.b) percebe-se que as maiores diferenças ocorreram entre o inverno e a primavera, com tendência a uma homogeneização no final do verão. As diferenças máximas foram de 19,6 psu e 16,3 psu em dezembro de 2014 (DIF1 e DIF2). Os valores positivos indicam hipersalinidade no interior da BTS, verificada no verão de 2013. É possível observar o aumento das diferenças de salinidade ao longo dos anos tanto para DIF 1 quanto para DIF 2.

A Figura 27 ilustra a diferença vertical das duas variáveis hidrológicas na estação TS2. As máximas diferenças de temperatura (Figura 27.a) e de salinidade (Figura 27.b) foram de 3,3 °C em janeiro de 2015 e de 3,0 psu em agosto de 2014. Observa-se um aumento da diferença vertical de temperatura em TS2 ao

longo dos anos. Vale destacar que essa diferença vertical se refere a estações que estão a cerca de 4 km de distância.

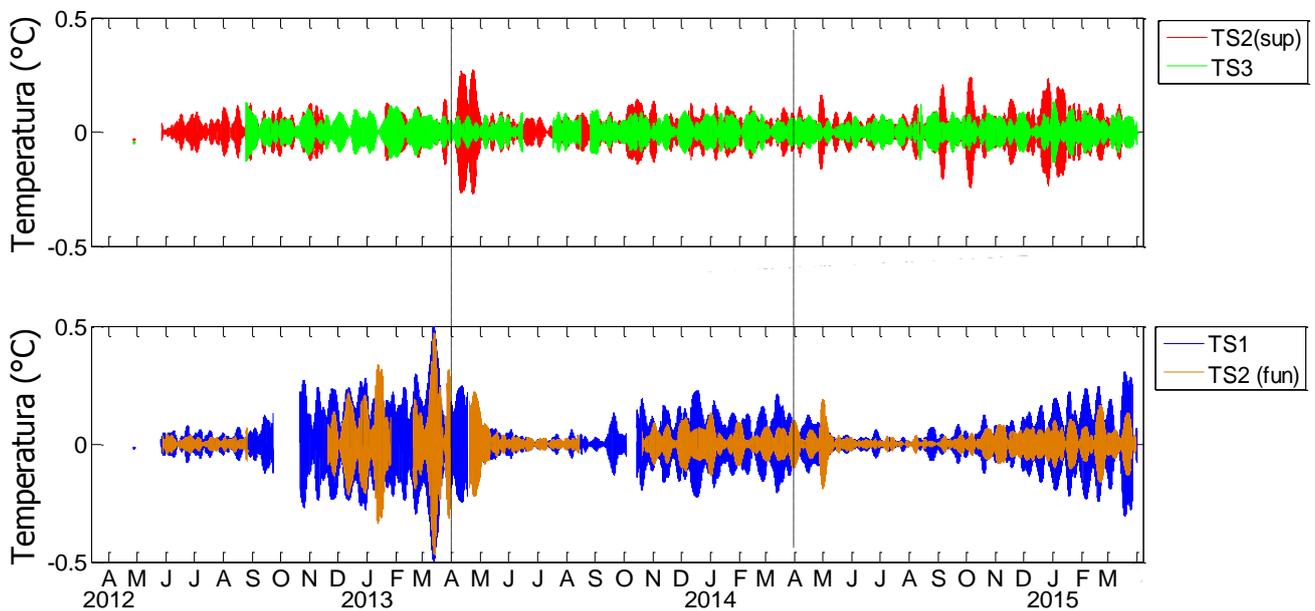


**Figura 26 - Série temporal da diferença de temperatura e salinidade entre TS3 e TS1 (DIF 1) e entre TS3 e TS2 (sup) (DIF 2).**

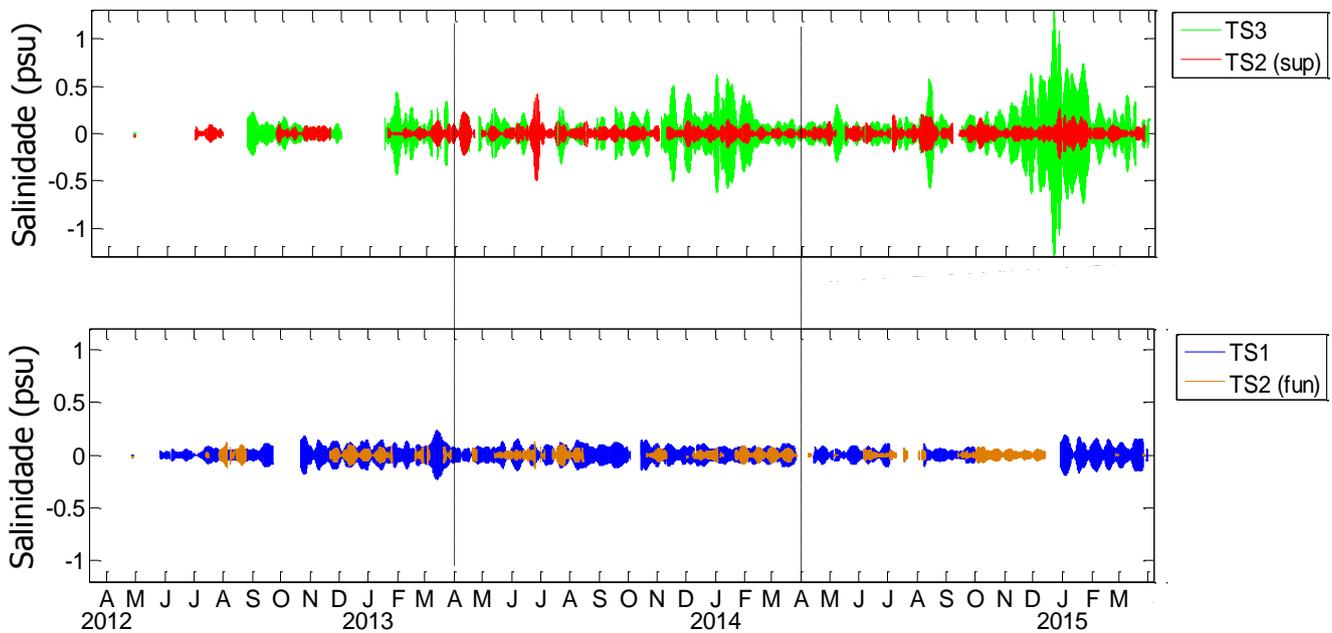


**Figura 27 - Série temporal da diferença vertical de temperatura (a) e de salinidade (b) em TS2.**

A Figura 28 e Figura 29 mostram o resultado da aplicação de um filtro em banda, com períodos de corte em 11 horas e 12,4 horas, nas séries temporais de temperatura e de salinidade. As maiores amplitudes de variações de temperatura foram de 1,1 °C (TS1), 1,0 °C (TS2-fun), 0,5 °C (TS2-sup) e 0,3 °C (TS3). Nota-se que no verão ocorreram as mais elevadas variações de temperatura para todas as estações hidrológicas. As oscilações de salinidade em escala mareal foram maiores na estação de superfície (TS3), onde foram registrados amplitudes de até 2,6 psu, e menores nas demais estações, atingindo amplitudes de 0,4 psu e 0,9 psu (TS1 e TS2-sup) e 0,3 psu (TS2-fun).

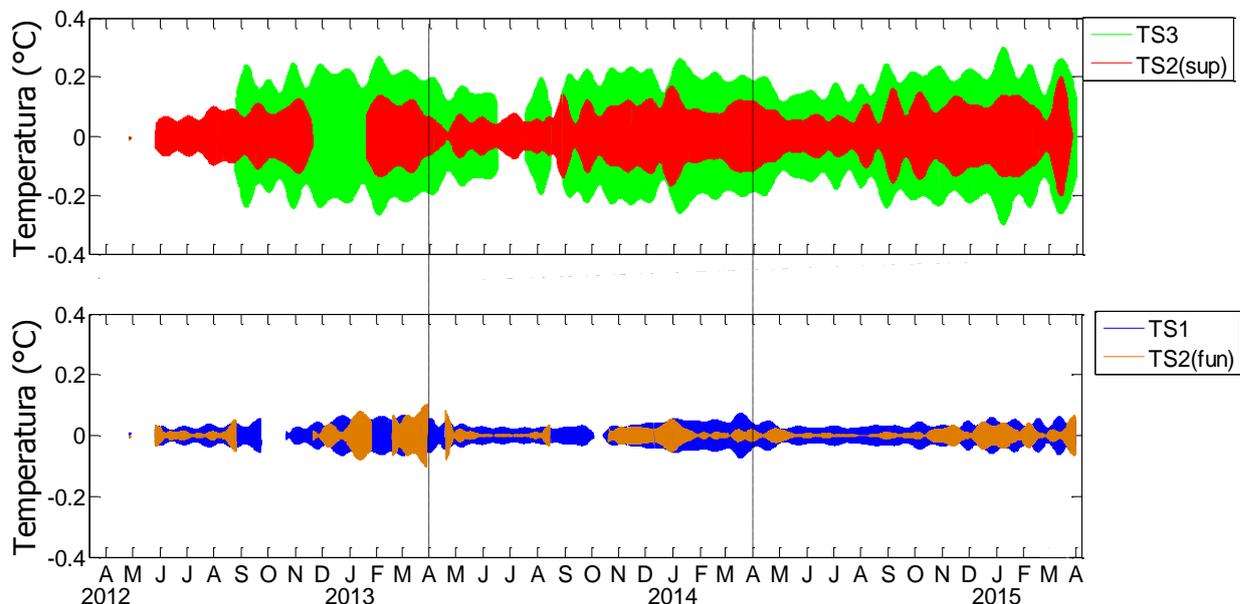


**Figura 28 – Série temporal da variação da temperatura da água em frequência mareal. Estas variações são resultantes da aplicação de filtro em bandas utilizando períodos de corte de 11 e 12,4 horas. Valores positivos indicam aumento da temperatura e valores negativos se referem a redução.**

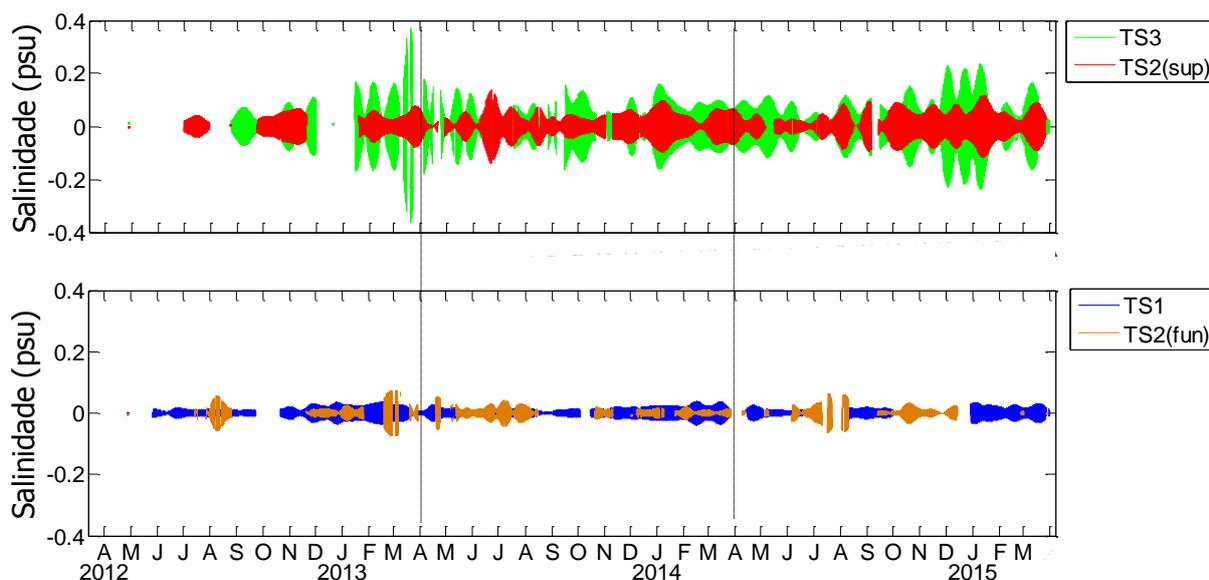


**Figura 29 – Série temporal da variação da salinidade da água em frequência mareal. Estas variações são resultantes da aplicação de filtro em bandas utilizando períodos de corte de 11 e 12,4 horas. Valores positivos indicam aumento de salinidade e valores negativos se referem a diminuição.**

A Figura 30 e Figura 31 mostram o resultado da aplicação de um filtro em banda diurna, com períodos de corte em 23 horas e 25 horas nas séries temporais de temperatura e de salinidade. As maiores amplitudes de variações (0,6 °C) ocorreram na estação nas estações de superfície, destacando a estação TS3, enquanto que as menores amplitudes ocorreram nas estações de fundo, onde foram registradas amplitudes máximas 0,14 psu, em TS2 (fun).



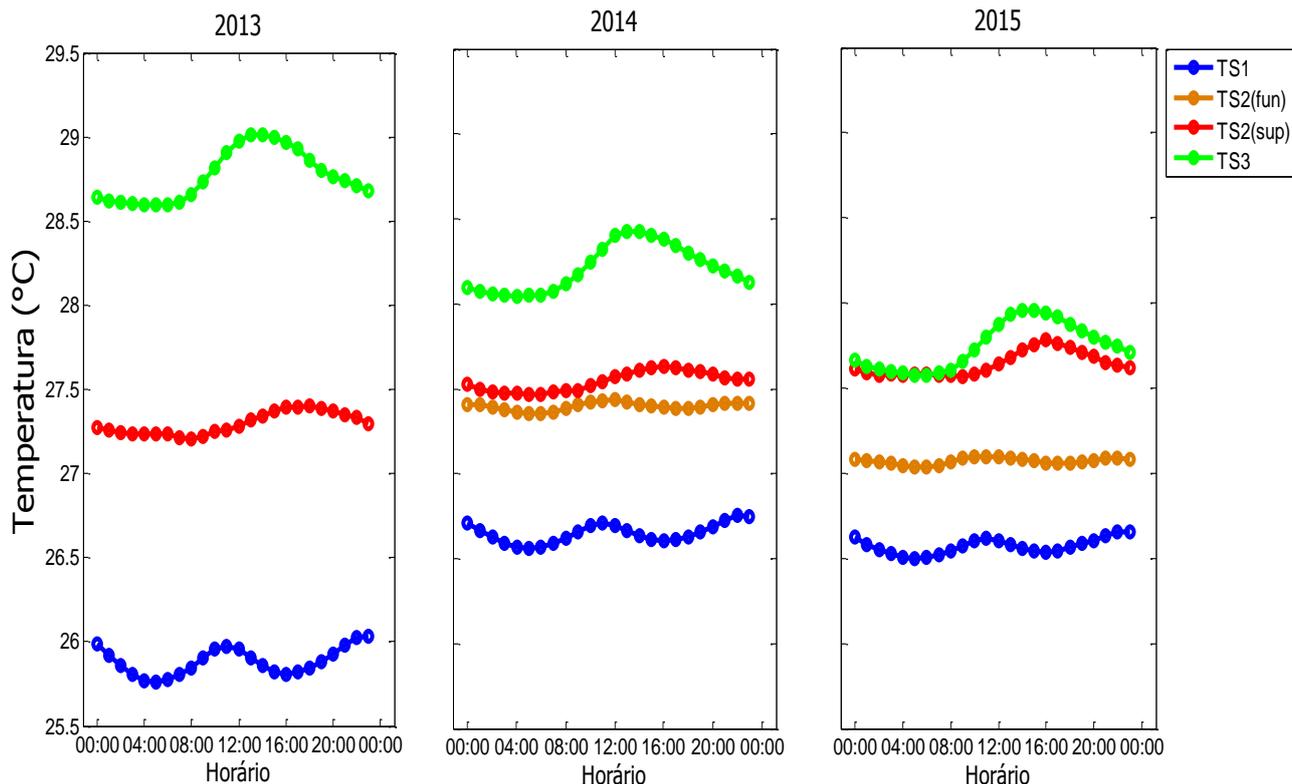
**Figura 30 – Série temporal da variação da temperatura da água em frequência diurna. Estas variações são resultantes da aplicação do filtro em bandas utilizando períodos de corte de 23 e 25 horas. Valores positivos indicam aumento da temperatura e valores negativos se referem a redução.**



**Figura 31 - Série temporal da variação da salinidade da água em frequência diurna. Estas variações são resultantes da aplicação do filtro em bandas utilizando períodos de corte de 23 e 25 horas. Valores positivos indicam aumento de salinidade e valores negativos se referem a diminuição.**

As temperaturas médias ao longo do dia para cada ano de estudo são mostradas na Figura 32. Observa-se que as maiores temperaturas nas estações de superfície ocorreram em torno das 16:00 horas, em TS2, e das 15:00 horas, em TS3. No que se refere às estações de fundo, as maiores temperaturas ocorreram tanto próximo às 11:00 horas quanto às 23:00 horas (TS1 e TS2). Nota-se que ao longo dos três anos de

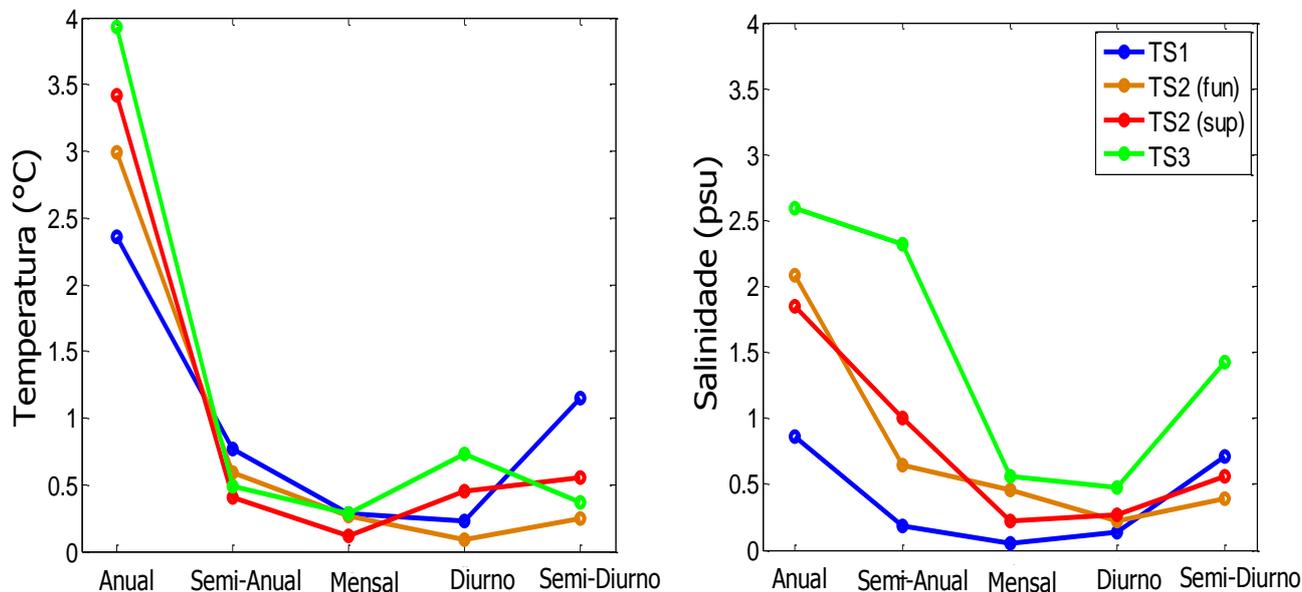
monitoramento existiu a diminuição do gradiente longitudinal diurno da temperatura na BTS. Em média, as amplitudes de diferença térmica máxima (TS3-TS1) foram de 3,2 °C, em 2013, e de 1,4 °C (2015).



**Figura 32 – Médias horárias da temperatura da água para cada estação hidrológica e para cada ano de monitoramento. A estação TS2(fun) não foi incluída para o ano de 2013, pois a mesma apresentou uma grande quantidade de lacunas.**

### 5.2.1 Análise Harmônica

A análise harmônica identificou as principais constituintes harmônicas (Tabela 6) e suas respectivas amplitudes de variação de temperatura e de salinidade associadas à maré (movimentos periódicos) astronômica em cada estação. As amplitudes de variações de temperatura e de salinidade correspondente a cada grande grupo harmônico são expostas na Figura 33. A componente anual (SA) é a que apresentou às maiores amplitudes em ambos os parâmetros, com valores máximos em TS3 (4,0 °C e 2,6 psu) e mínimo em TS1 (2,3 °C e 0,8 psu). A componente semi-anual (SSa), que tem um período de 182 dias, foi mais importante para a salinidade nas estações de superfície, sendo máximo em TS3 (2,4 psu). As componentes semi-diurnas (TABELA 6) mostraram importância para ambos os parâmetros, sendo que o máximo e o mínimo de amplitude de variação foram de 1,1 °C e 0,2°C (TS1 e TS2-fun) e 1,4 psu e 0,4 psu (TS3 e TS2-fun). Nota-se que o ciclo semi-diurno apresentou maiores amplitudes do que o ciclo diurno (representado pela amplitude das componentes listadas na TABELA 6) em ambas as variáveis para todas as estações hidrológicas, com exceção do ciclo diurno da temperatura em TS3.

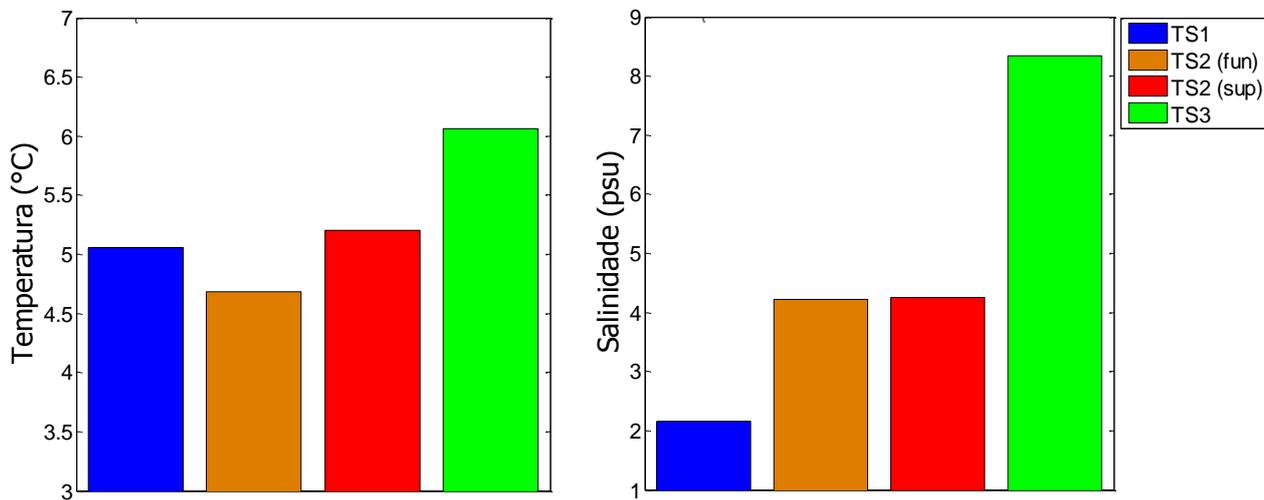


**Figura 33- Amplitude de variação de temperatura e de salinidade correspondente a cada periodicidade harmônica.**

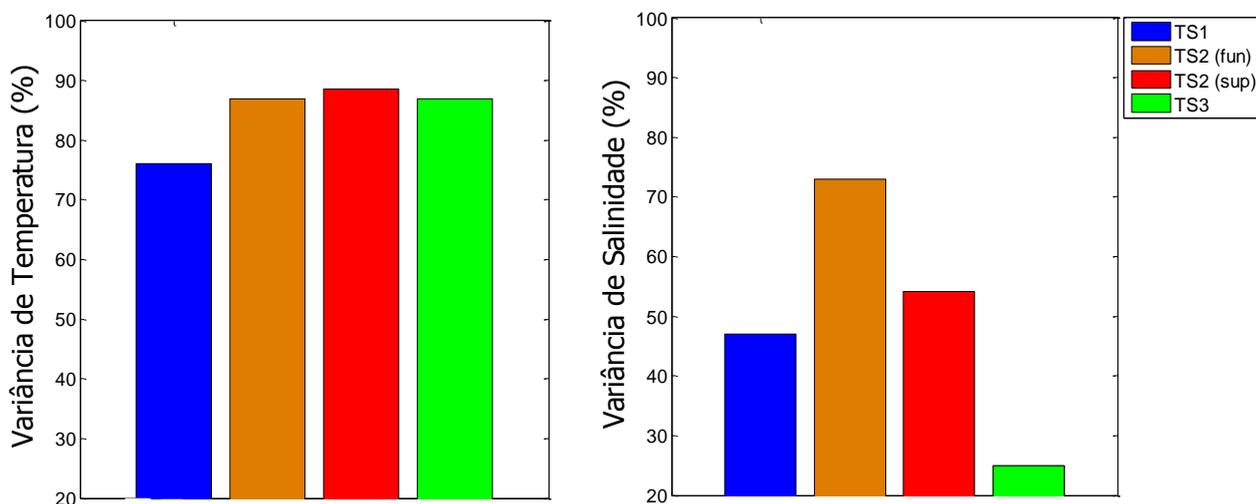
**Tabela 6 – Constituintes harmônicas identificadas pela análise harmônica.**

	Constituintes Harmônicas
<b>Anual</b>	SA
<b>Semi-Anual</b>	SSA
<b>Mensal</b>	MSM, MM
<b>Diurno</b>	O1, K1, S1, P1, Q1, ALP1, 2Q1, SIG1, RHO1, TAU1, BET1, NO1, CHI1, PI1, P1, PS11, PHI1, THE1, J1, SO1, OO1, UPS1.
<b>Semi-Diurno</b>	CRZ, S2, N2, OQ2, EPS2, 2N2, MU2, N2, NU2, GACRZ, H2, MKS2, LDA2, L2, T2, K2, MSN2.

O somatório das amplitudes das constituintes harmônicas calculadas (Tabela 6) esta exposta na Figura 34, onde se observa que as maiores amplitudes de variação de temperatura e salinidade (6 °C e 8,3 psu) ocorreram em TS3 e que as menores amplitudes de variação de salinidade ocorreram em TS1 (2,1 psu). A análise harmônica mostrou que as oscilações de maré explicam entre 76 % a 88 % das variâncias nos valores de temperatura observados (Figura 35). Já no que se refere à salinidade ocorre uma redução da importância das marés na variabilidade deste campo, sendo esta responsável pela explicação de apenas 25 % da variância em TS3 e não mais que 73% no centro da BTS.

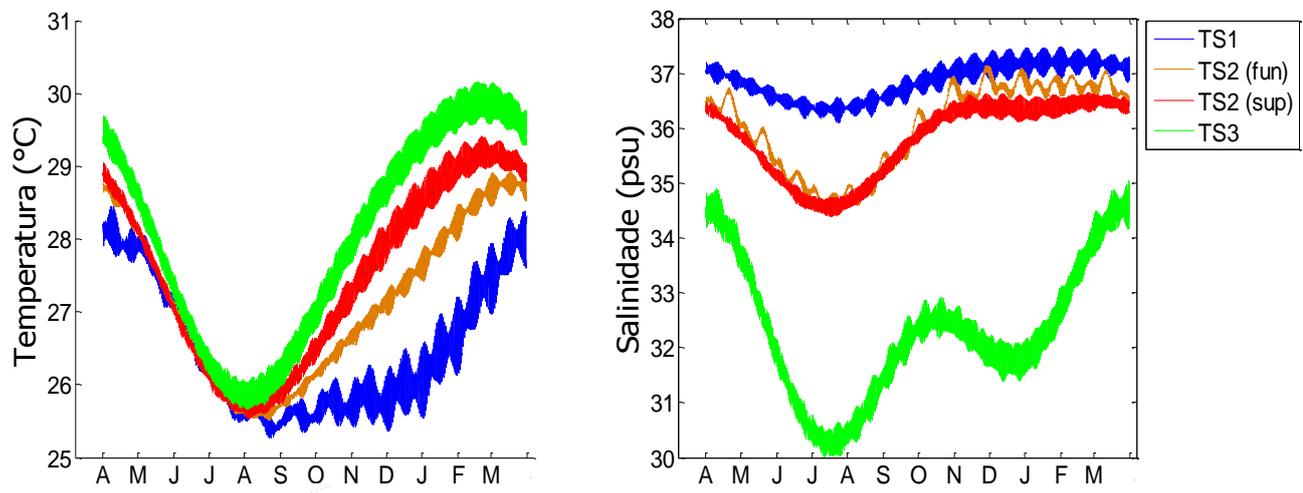


**Figura 34 – Somatório das constituintes harmônicas obtidas para a temperatura e salinidade para cada estação hidrológica.**

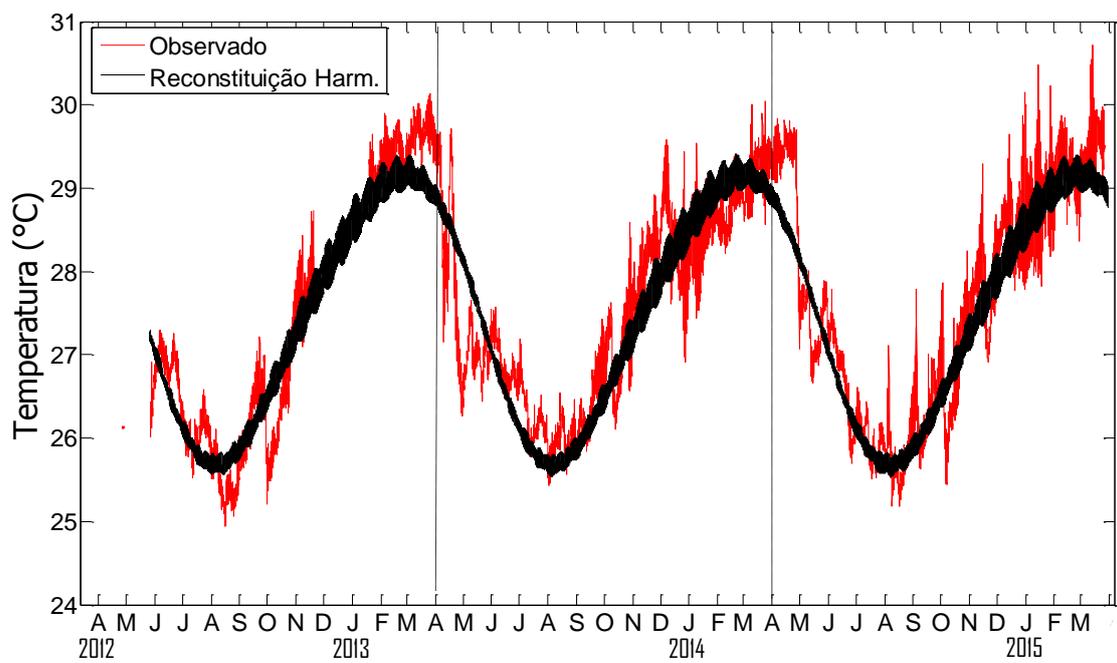


**Figura 35 – Variância (%) da temperatura e da salinidade explicadas pelos movimentos harmônicos astronômicos (Terra, Lua e Sol).**

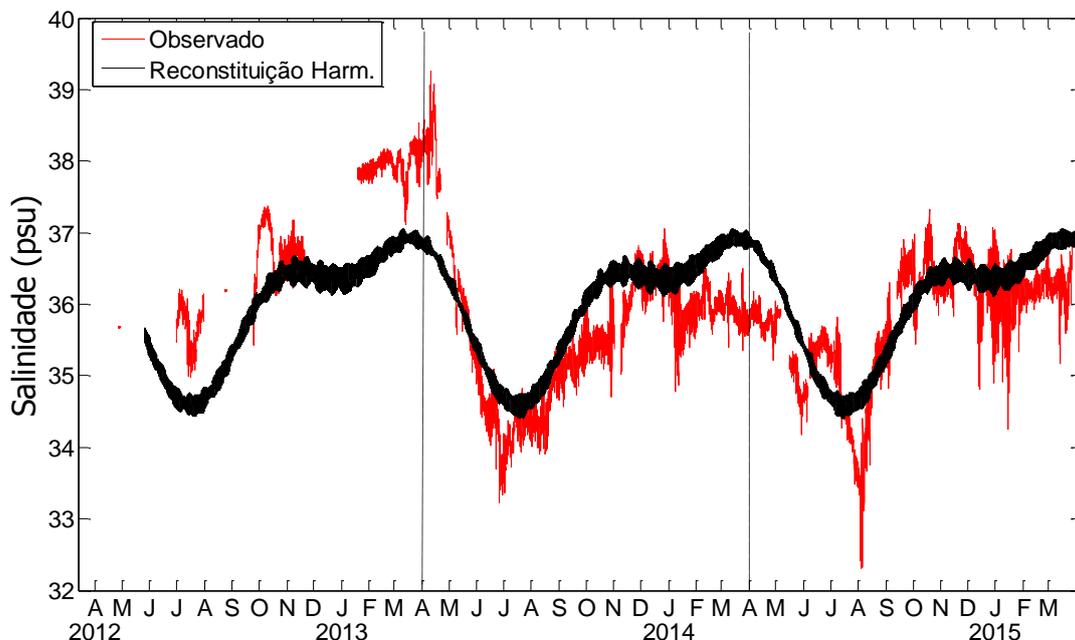
A partir da análise harmônica, foi feita a reconstituição das variações da temperatura e salinidade para as quatro estações (Figura 36), ilustrando os ciclos sazonais de temperatura e de salinidade na BTS descritos anteriormente. A Figura 37 mostra o cruzamento dos dados de temperatura e de salinidade observados com a reconstituição harmônica. Tendo como exemplo a estação TS2 (sup), nota-se que o comportamento sazonal da temperatura da água prevista está bem de acordo com a observação (Figura 37.a). Analisando a série de salinidade nota-se que também existe um comportamento sazonal similar entre a reconstituição harmônica e a observação (Figura 37.b), porém é visivelmente inferior comparada à temperatura.



**Figura 36 – Reconstituição harmônica de temperatura e salinidade da água para as quatro estações hidrológicas.**



**(a)**



(b)

**Figura 37 – Temperatura (a) e salinidade (b) da água reconstituídas harmonicamente e observada na estação TS2 (sup).**

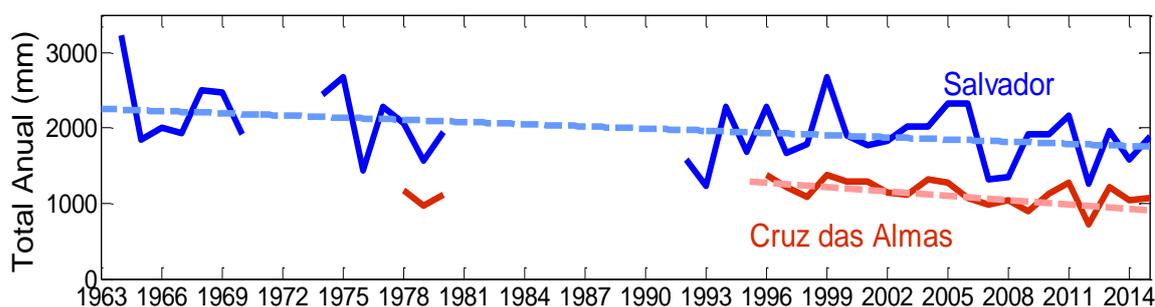
## 6 DISCUSSÕES

A barragem da Pedra do Cavalo, finalizada em 1986 no rio Paraguaçu, a cerca de 20 km da Baía de Iguape, alterou severamente o regime hidrológico do rio à jusante (Genz e Lessa, 2015), pois apenas uma fração da vazão afluyente à barragem passou a ser transferida para o setor estuarino do rio. De acordo com Lessa *et al* (2016), o prolongado período de baixas vazões na bacia de drenagem em 2012-2013 foi exacerbado pela retenção de água feita pela represa, pois a mesma reteve quase que a totalidade do fluxo fluvial ao longo deste intervalo. Assim, neste período a represa proporcionou vazões diárias, afluentes à BTS, majoritariamente inferiores a 20 m<sup>3</sup>/s.

As vazões médias anuais máximas e mínimas obtidas neste presente trabalho (33,5 m<sup>3</sup>/s e 4,9 m<sup>3</sup>/s) ficaram muito abaixo às vazões médias anuais máximas (221 m<sup>3</sup>/s) e mínimas (10 m<sup>3</sup>/s) reportado por Genz (2006), que analisou as alterações hidrológicas do rio Paraguaçu oriundas da construção desta barragem. Também, as maiores vazões médias diárias defluentes (608 m<sup>3</sup>/s) registradas entre 2012 e 2015 foram consideravelmente inferiores às maiores vazões dos últimos trinta anos (5.198 m<sup>3</sup>/s), conforme Medeiros *et al* (2015). Nos últimos trinta anos existiu uma clara tendência de diminuição do volume anual afluyente à BTS (Figura 12), valendo destacar que o ano de 2013 apresentou o segundo menor volume anual pós

barragem. Esta redução de volume anual esta de acordo com os resultados reportado por Genz *et al* (2003), que mostrou uma tendência geral, referente ao período de 1940 a 1999, de redução das vazões médias anuais dos rios do litoral da Bahia. Contudo, após 2013 observa-se a tendência de aumento do volume de descarga afluente à BTS.

As climatologias de 1961-1990 e 1986-2015 (Figura 5.a) e as anomalias de precipitação (Figura 8) mostram que ocorreu uma diminuição do total anual de precipitação nas duas estações meteorológicas (SSA e CRZ). Isto esta de acordo com os resultados apresentados por Lessa *et al* (2016) (Figura 38) e por Genz *et al* (2003), que mostraram a tendência de diminuição dos totais anuais de precipitação tanto em Salvador como em Cruz das Almas. Variações decenais das anomalias de precipitação foram observadas nos últimos trinta anos, que sugere que são os mesmos ciclos salientados por Lessa *et al* (2009). Segundo o mesmo, estes ciclos causam oscilações de aproximadamente 650 mm nos valores acumulados médios anuais. Observa-se que o ano hidrológico de 2013 apresentou uma das menores precipitações acumuladas de toda a série histórica nas duas estações. Assim, somando este cenário pluviométrico local de 2013 com a segunda maior seca dos últimos trinta anos na bacia do Paraguaçu, pode-se afirmar que a BTS vivenciou um dos anos hidrológicos mais secos de sua história recente em 2013. Entretanto, esta seca foi amenizada em 2014 e 2015.

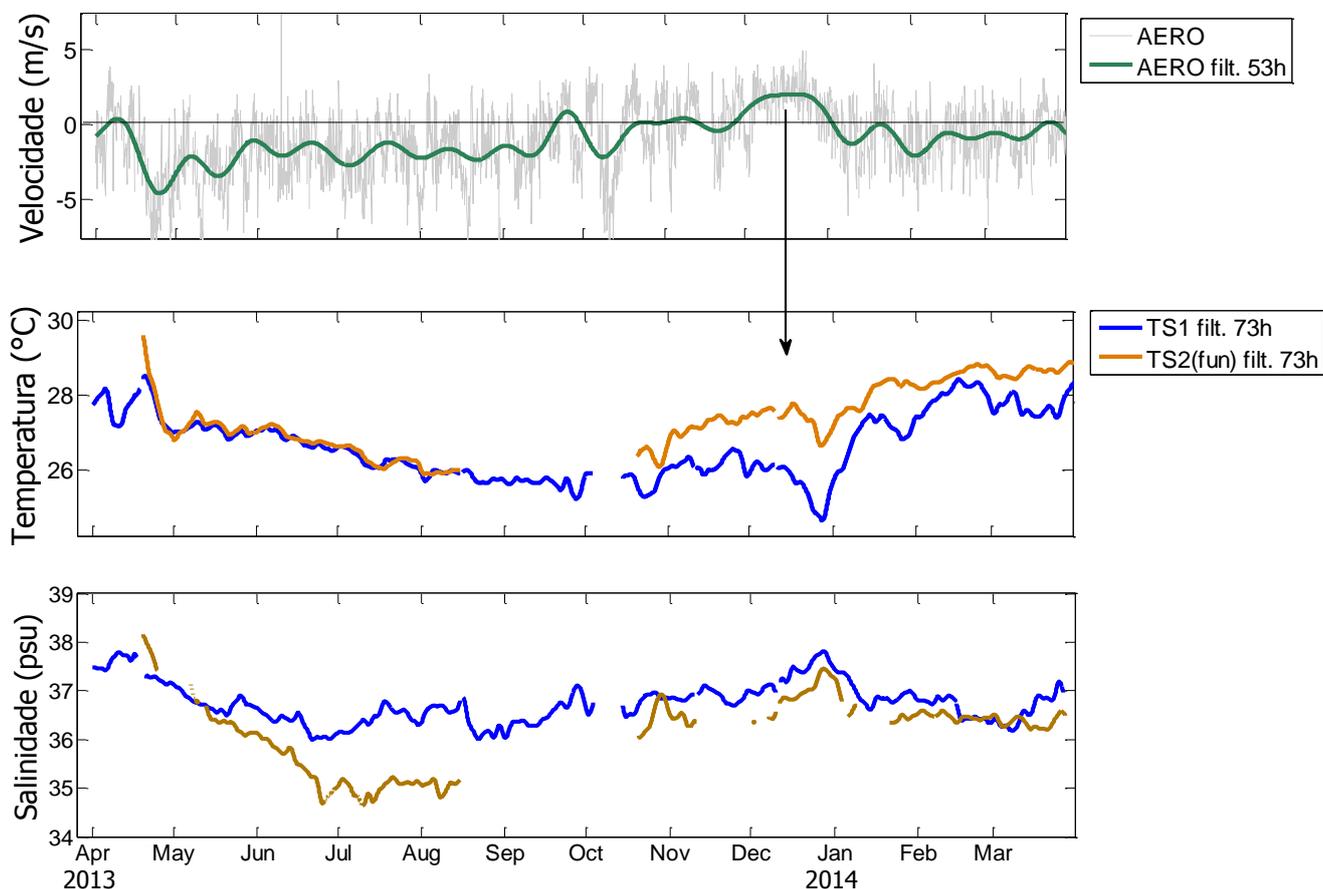


**Figura 38 – Variação do total anual de precipitação em Salvador e Cruz das Almas (Lessa *et al.*, 2016) .**

Dois cenários meteorológicos na BTS foram notados ao longo dos três anos de monitoramento: um seco associado ao ano hidrológico de 2013, e outro relativamente mais úmido compreendendo os anos de 2014 e 2015. O ano de 2013 apresentou cerca de 280 horas a mais de exposição solar comparado aos anos de 2014 e 2015, ficando acima da média climatológica, registrou as maiores temperaturas médias do ar (acima da média climatológica) e apresentou maior frequência de ventos de NE. Os anos de 2014 e 2015 foram marcados por uma maior nebulosidade, menor insolação, redução da temperatura do ar e menor incidência de ventos de NE. Assim, ambos os cenários exerceram influência direta no campo termohalino da BTS.

A variabilidade intra-anual da temperatura média mensal do ar e da água na BTS mostra que o início da estação chuvosa (abril) proporciona um aumento da nebulosidade e diminuição da insolação que, somado à

redução de radiação oriunda do ciclo anual solar, ocasiona a diminuição da temperatura da água, bem como a ruptura do gradiente térmico longitudinal, e diminuição da temperatura do ar até o final do inverno (agosto-setembro). Em seguida, o início da primavera (setembro) marca o início da intensificação da radiação solar, proporcionando mais horas de exposição solar. Somado à diminuição do aporte pluviométrico, isso causa elevação da temperatura da água e aumento do gradiente térmico longitudinal até o final do verão. A estação TS1, além de apresentar um aquecimento lento e retardado, com temperatura máxima sendo alcançada em abril, mostra uma queda da temperatura média no mês de dezembro. Este comportamento está relacionado ao menor tempo de residência da água no setor externo da baía e ao fenômeno de ressurgência costeira, que se inicia na primavera com a chegada dos ventos de NE, conforme Santos (2014). Segundo o mesmo, os ventos de NE tem importante papel no estabelecimento do processo de ressurgência nesta região por efeito da deriva e bombeamento de Ekman. A Figura 39 mostra a correspondência existente entre a orientação do vento sub-inercial longitudinal à costa, a temperatura da água (filtrada em 73 horas) e a salinidade (filtrada em 73 horas) em TS1 e TS2 (fun). Observa-se depressões na série de temperatura da água em conjunção com o aumento de salinidade, sendo estes correlacionados com a orientação e magnitude do vento sub-inercial. Os eventos de queda de temperatura, que foram acompanhados pelo aumento de salinidade, podem ser observados até a região central da baía (TS2), como já havia sido mostrado por Santos (2014), utilizando dados de salinidade e temperatura destas estações para o verão de 2013. Existem ainda evidências biológicas, como a presença de espécies de ictioplâncton epipelágica (*F. enflata*) e mesopelágica oceânicas (*F. hexaptera* e *K. pacifica*), no interior da BTS (Lessa *et al*, 2009). Estas espécies, que ocorrem no talude até 200 m de profundidade, chegam à plataforma transportados pela ressurgência costeira nos meses de verão, e são então advectados para o interior da baía pela circulação gravitacional.



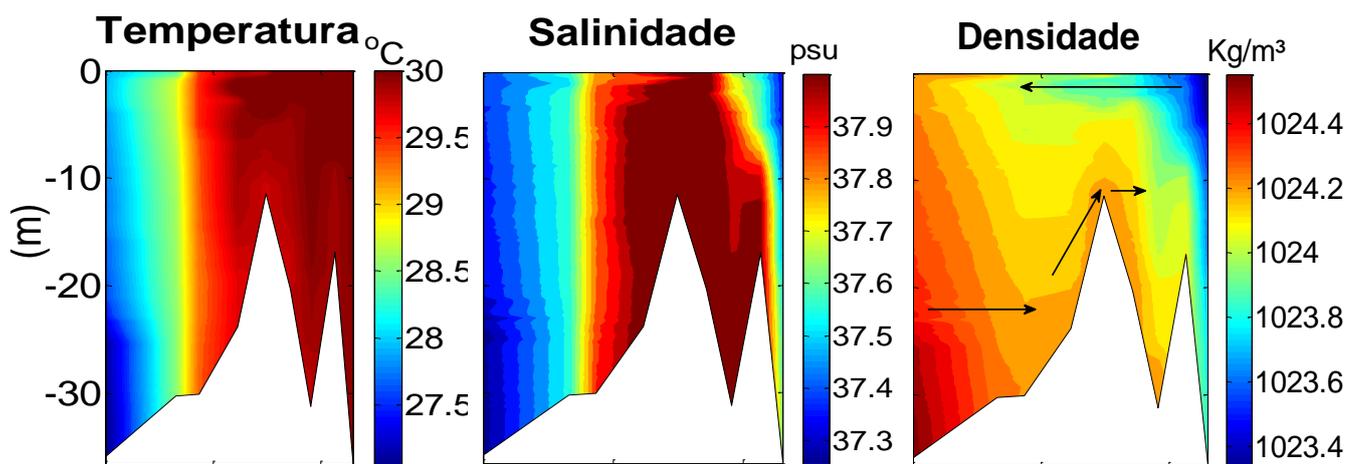
**Figura 39 – Série temporal do vento longitudinal à costa (AERO), da temperatura da água (filtrada em 73 horas) e da salinidade (filtrada em 73 horas) nas estações TS1 e TS2 para o ano hidrológico de 2014.**

As maiores variações longitudinais e verticais de temperatura em um mesmo instante ocorreram no verão, o que está de acordo com resultados compilados por Lessa *et al* (2009). Entretanto, as diferenças máximas aqui encontradas (3,4 °C na vertical e 5,6 °C longitudinalmente) foram superiores às diferenças máximas reportadas por Cirano e Lessa (2007), as quais foram inferiores a 1°C na vertical e 3,4 °C longitudinalmente. Os dados analisados naquele estudo foram oriundos de perfilagens horárias ao longo de um ciclo de maré em várias estações, em dois dias consecutivos de janeiro e maio/junho de 1999. A temperatura máxima então reportada (30,5 °C) ficou abaixo aos registros máximos deste trabalho (31,1 °C) enquanto que a mínima (26,3 °C) ficou acima (24,2 °C). A amplitude da oscilação sazonal de temperatura da água na BTS é semelhante aos ciclos de aquecimento e resfriamento encontrado por Santos (2014), que obteve uma longa série temporal de TSM para o intervalo de 2003 a 2013, próximo à entrada da BTS, e de acordo com Ikeda (1978) e com Kolm *et al* (1994), que mostraram que em média as maiores e menores temperaturas da água de superfície na costa brasileira ocorrem tipicamente em março e agosto, respectivamente.

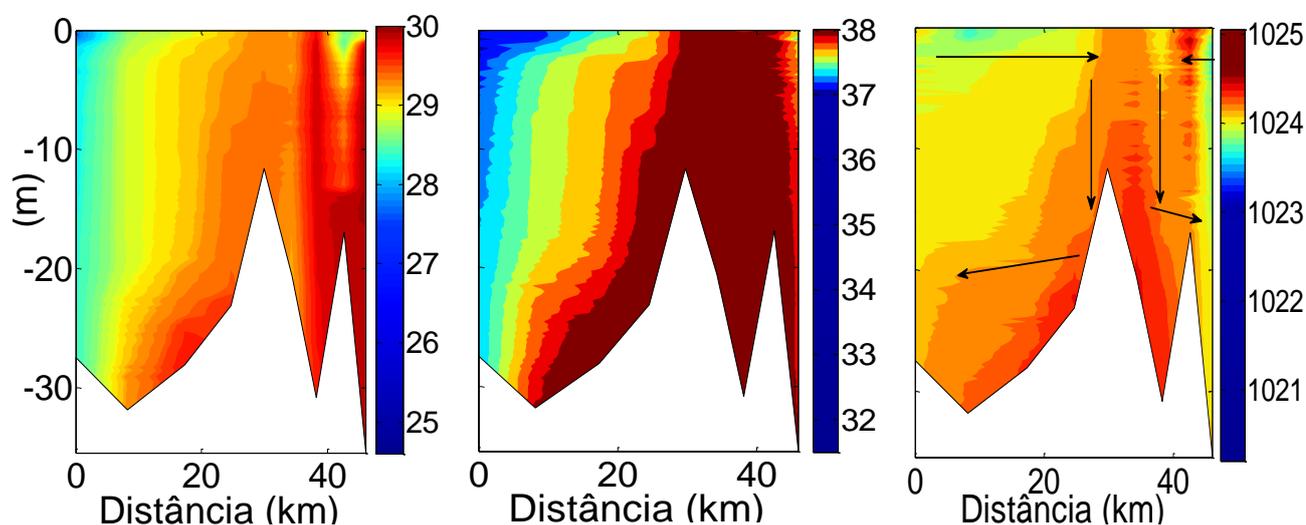
Existe uma defasagem temporal entre o aporte meteórico e fluvial na BTS que, conseqüentemente, faz com que a baía apresente dois períodos de maior aporte de água doce ao longo do ano hidrológico. Assim, o início do ano hidrológico da BTS é marcado pela diluição do sal oriundo da maior entrada de água doce que se estende até o final do inverno. Em seguida, ocorre o aumento da salinidade a partir da primavera por conta da diminuição do aporte pluviométrico e elevação das taxas de evaporação, que é resultante do aumento da insolação e radiação solar, estendendo-se até o final do verão. Entretanto, especialmente em dezembro e janeiro, a tendência de aumento de salinidade nas estações de superfície é rompida quando ocorrem as maiores vazões da barragem de Pedra do Cavalo, que proporcionam forte diluição de sal na estação em TS3, com reflexos sendo sentidos até a superfície de TS2. Já os maiores valores de salinidade em TS1 em dezembro e janeiro não estão diretamente atrelados ao balanço hídrico negativo (ou menos positivo), mas sim aos efeitos da ressurgência costeira que lança água mais salina sobre a plataforma.

O forte balanço hídrico negativo de 2013 ocasionou uma hipersalinidade ao longo do verão. Assim, a BTS tornou-se um estuário negativo, mas devido às elevadas temperatura estrutura de densidade estuarina se manteve (Figura 40). A hipersalinidade perdurou até o mês de abril de 2013, quando uma maior nebulosidade e menor taxa de radiação solar gerou uma rolha de densidade (ou rolha de sal) no centro da BTS. Nesta situação, uma circulação gravitacional inversa deve ter se estabelecido, de modo similar ao evento de inversão do fluxo médio relatado por Pereira e Lessa (2009) no Canal de Cotegipe (ligação entre a Baía de Aratu e a BTS) no verão de 2003. O balanço hídrico positivo na BTS após 2013 ocasionou aumento do gradiente longitudinal de salinidade, que culminou numa diferença de até 19 psu (TS3-TS2-sup). Uma diminuição dos valores de salinidade nas estações de superfície foi observada ao longo do verão dos anos de 2014 e 2015, como consequência das elavas descargas da barragem de Pedra do Cavalo. O tempo de resposta da salinidade de TS2 (sup) à descarga de Pedra do Cavalo (Figura 23.b) foi inferior a sete dias (Figura 10), enquanto que em TS3 deste foi inferior a três dias.

19 de Fevereiro de 2013



19 de Abril de 2013

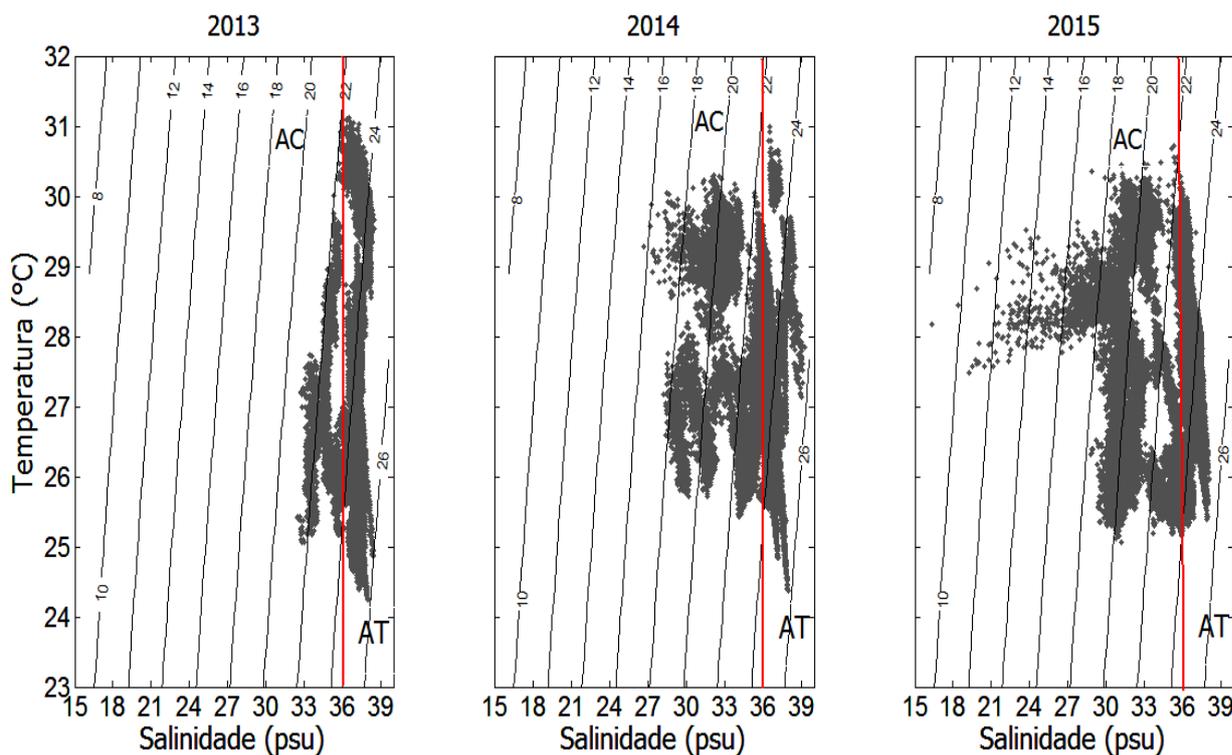


**Figura 40- Perfis de temperatura, salinidade e densidade longitudinais à BTS, em fevereiro e abril de 2013. O polígono branco representa a topografia de fundo, delineada pelas profundidades máximas registradas em cada perfilagem. Distância zero se refere à entrada da BTS (TS1) e o aumento da mesma é em direção a TS3. As setas indicam a estrutura da circulação residual (não-mareal) resultante: circulação estuarina em fevereiro e circulação estuarina inversa em abril. Extraído de Lessa et al (2016).**

No Brasil a hipersalinidade é registrada em pequenos estuários na costa setentrional do Nordeste, destacando o estuário de Jaguaribe e Mossoró, conforme Frota *et al* (2013) e Medeiros *et al* (2010) e, excepcionalmente, na laguna de Arauama no Rio de Janeiro (Kjerfve et al 1996). Eventos de hipersalinidade em grandes golfos e baías, ou mesmo situações perenes de hipersalinidade, foram relatados ao longo da costa da Grande Barreira e no Golfo de Spencer, ambos na Austrália, por Andutta *et al* (2011) e por Nunes-

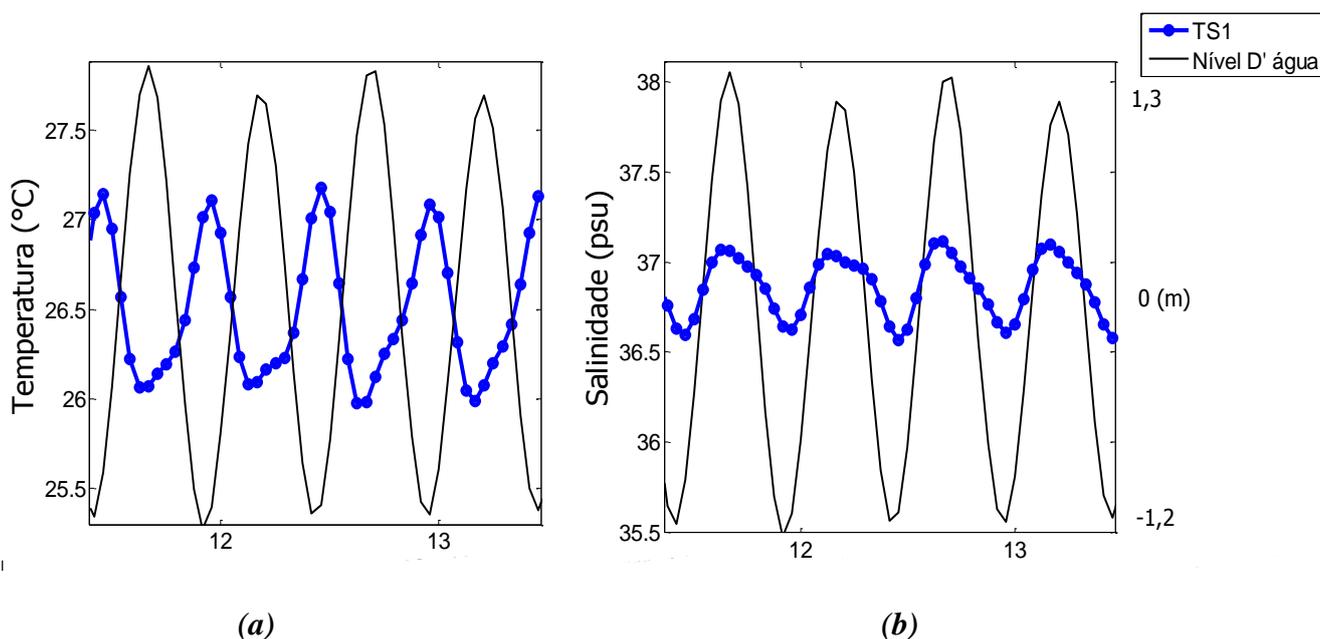
Vaz (2012), em estuários na região de Casamansa, Senegal, por Savenije *et al* (1992) e em estuários próximos a Baía de São Francisco (EUA), conforme Schlenk e Lavado (2011). Já o estabelecimento de uma “rolha de sal” é relativamente incomum entre os estuários do mundo, tendo sido registrados por Cabrera *et al* (2014) na Baía de Malampaya na Filipinas, por Shaha e Cho (2016) no estuário de Pasur na Baía de Bengala, e por Valle-Levison *et al* (2003) em estuários do Golfo da Fonseca na América Central. De acordo com Valle-Levinson (2010) e Cabrera *et al* (2014), a formação de uma rolha de sal reduz a lavagem da porção interior e modifica o transporte de nutrientes e outras substâncias, assim, influenciando na qualidade das águas do estuário.

Cirano e Lessa (2007) reportaram a ocorrência de duas distintas massas d’águas (Água Tropical e Água Costeira) na BTS que são oriundas da diferença sazonal da temperatura, da salinidade e do aporte de água doce. A Água Tropical (AT), que apresenta temperatura acima de 20 °C e salinidade superior a 36 psu, adentra na BTS nos meses de verão, enquanto que a Água Costeira (AC), que é mais fria, porém superior à 20 °C, e menos salina (< 36 psu), se origina na BTS nos meses de inverno e impede a entrada da AT. De acordo com a Figura 41, a AC tornou-se mais presente na BTS, e a AT menos frequente, ao longo dos três anos de monitoramento.



**Figura 41 – Diagrama T-S referentes as estações hidrológicas para cada ano. A linha vermelha representa a divisão entre Água Tropical (AT) e Água Costeira (AC).**

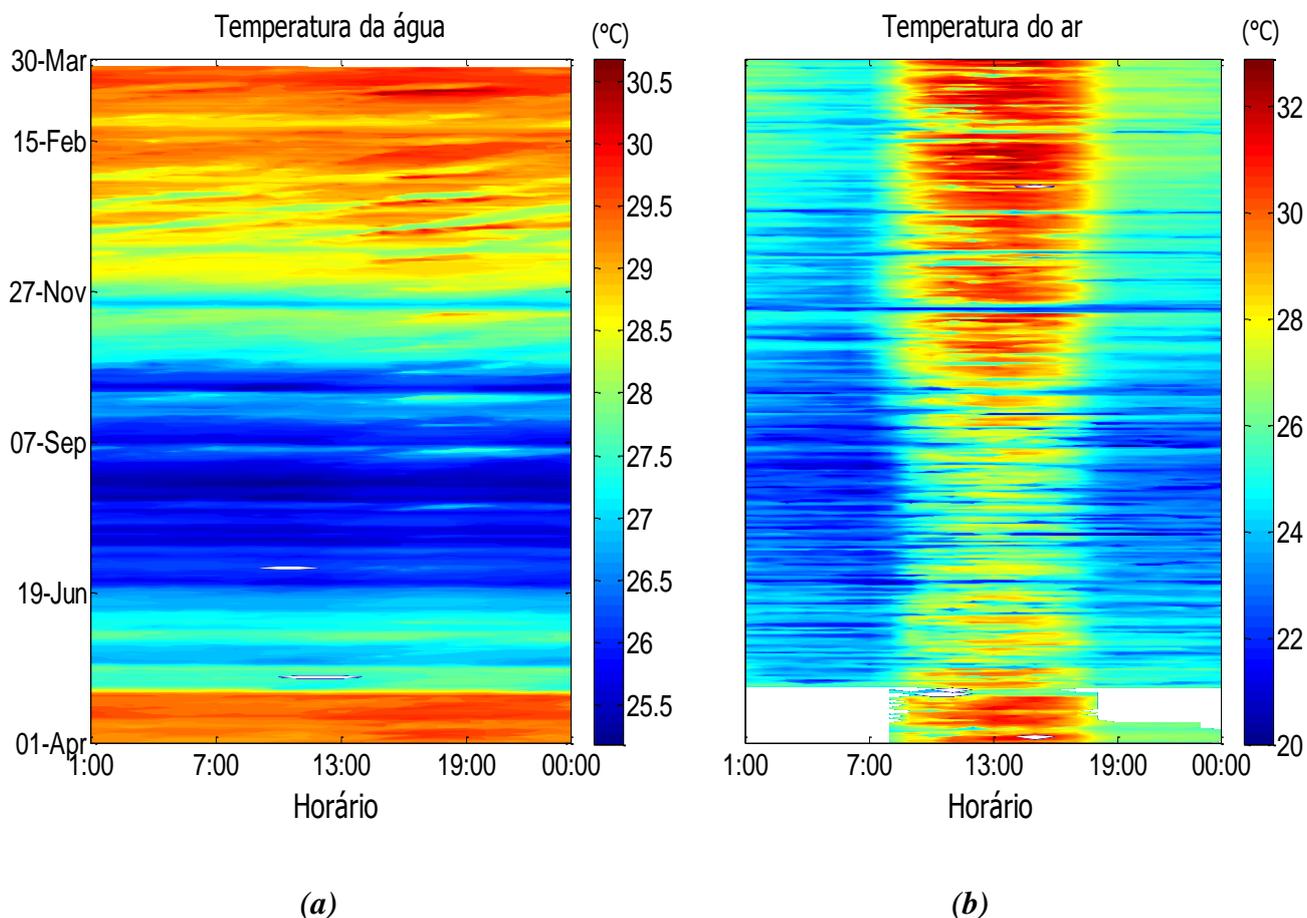
As maiores oscilações de temperatura em frequência mareal ocorreram nas estações de fundo (até 1,1 °C em TS1) e, e as maiores oscilações de salinidade ocorreram na superfície (2,6 psu em TS3), sendo que as maiores oscilações para as duas variáveis ocorreram no verão tanto na superfície quanto no fundo. De modo geral o nível d'água se correlacionou inversamente com a temperatura (Figura 42.a) e diretamente com a salinidade (Figura 42.b), em acordo com as análises de Silva *et al* (2012) e Medeiros *et al* (2010), que investigaram ambos os parâmetros em mesma frequência no estuário de Jaguaribe (Ceará) e no estuário de Caeté (Pará). As águas interiorizadas na BTS, mais quentes e menos salinas, são advectadas para fora na maré vazante, e águas oceânicas, mais frias e mais salinas, são advectadas para dentro da BTS na maré enchente. Assim, ambos os parâmetros apresentam dois picos máximos e mínimos ao longo do ciclo semi-diurno da maré, o que concorda com os resultados mostrados por Van Aken (2008) no Mar de Wadden.



**Figura 42 – Variações semi-diurnas de temperatura e salinidade (isoladas com filtro em banda com períodos de corte de 11 e 12,4 horas) e do nível d'água.**

Já as maiores amplitudes de oscilação de temperatura e salinidade na banda diurna ocorreram nas estações de superfície (TS3 e TS2-sup), o que sugere que a variação diurna para ambos os parâmetros são influenciados pela variação diurna da radiação solar, conforme Van Aken (2008). Vale destacar que o maior pico de radiação solar ao longo do dia, coincidentes com as maiores temperaturas do ar, não coincide com o pico de maior temperatura da água, pois existem as marés, que influenciam as oscilações de temperatura como mostrado acima, com forte influencia lunar, tem período de 24,5 horas, superior ao dia solar. (Figura 43) Assim, existe uma defasagem temporal entre o pico da temperatura do ar com a da temperatura da água. As maiores temperaturas do ar ocorreram em torno das 13:00 horas (Figura 17), enquanto que as maiores temperaturas da água de superfície ocorreram por volta das 15:00 horas e 16:00 horas (Figura 32), em

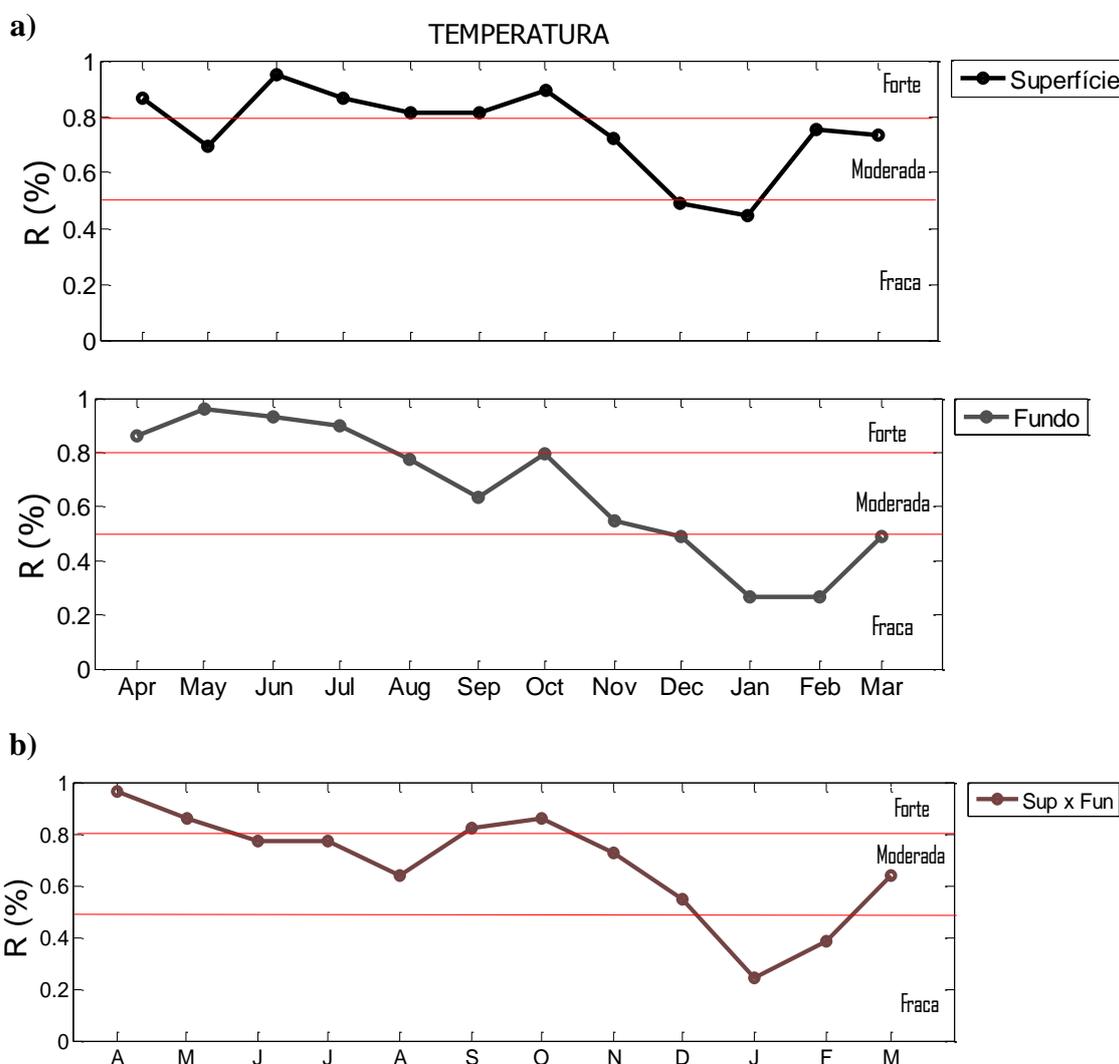
média. É perceptível que a temperatura do ar sofreu resfriamento no fim da tarde até o início da manhã, enquanto que a temperatura da água se manteve aquecida durante a noite, o que é explicado pelo maior calor específico da água.



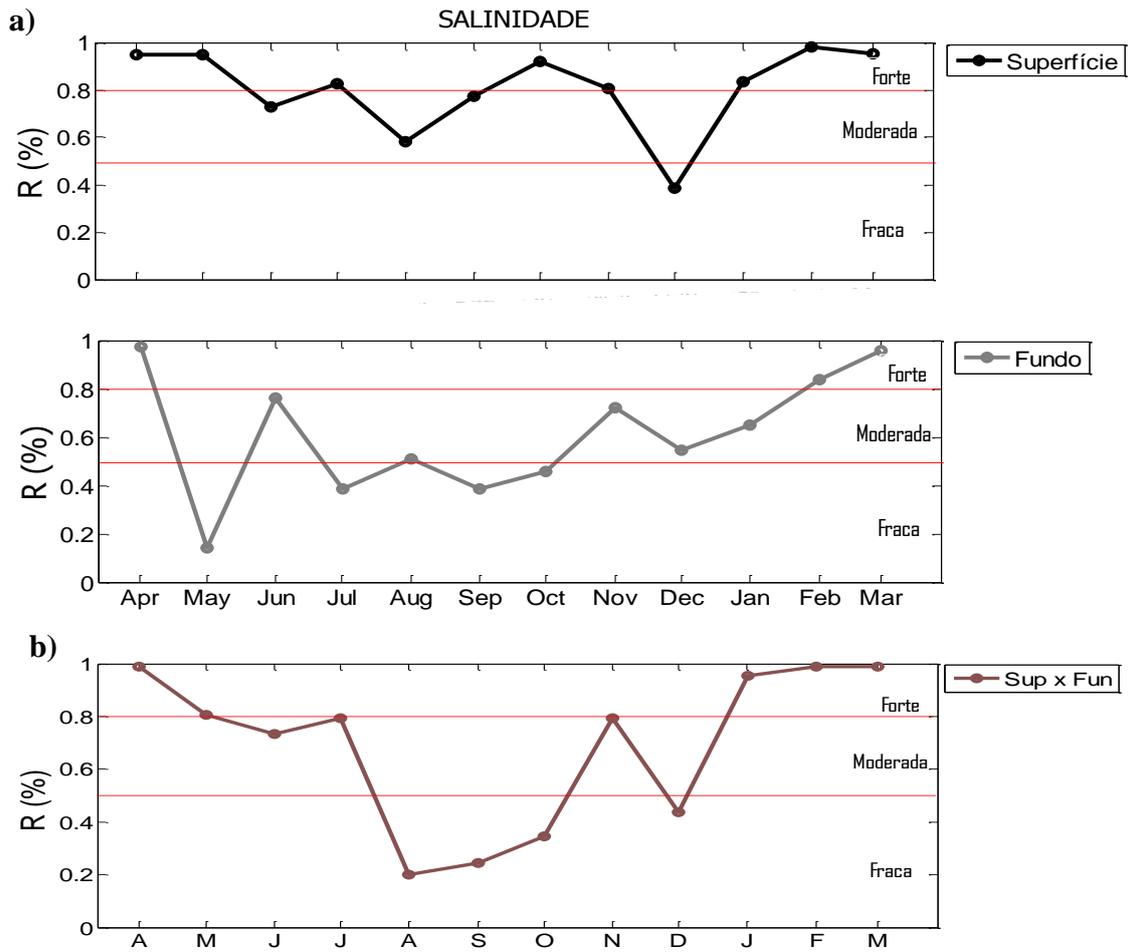
**Figura 43 – Temperatura da água em TS2 (sup) (a) e temperatura do ar em SSA (b) ao longo do dia no ano hidrológico de 2015.**

As análises harmônicas das séries de temperatura e salinidade mostram que fatores astronômicos (não necessariamente marés), explicam mais de 76% da variância observada no campo de temperatura da água em todas as estações, mas são pouco relevantes nas variações do campo de salinidade (Figura 35). A interação de fatores meteoceanográficos sem periodicidade bem estabelecida como circulação eólica, descarga fluvial, nebulosidade e precipitação geram a diferença entre a observação e a previsão para ambos as variáveis, como mostrado na Figura 37. A previsão de temperatura e salinidade para as quatro estações hidrológicas (Figura 36) ilustra muito bem o padrão oscilatório dos campos de temperatura e de salinidade na BTS e mostra que as forçantes astronômicas geram a redução da temperatura e da salinidade no início do ano hidrológico até o final do inverno, quando ocorrem os valores mínimos, e o aumento dos valores destas variáveis no início da primavera até o final do verão. As oscilações do campo de temperatura entre as

estações de superfície (TS2 e TS3), de fundo (TS1 e TS2) e entre superfície e fundo (TS2) apresentaram fortes correlações no início dos anos hidrológicos (meses de outono/inverno), mas com uma tendência de enfraquecimento da correlação em direção ao final do verão (Figura 44). A baixa correlação no verão pode ser explicada por processos tais como o aquecimento diferenciado ao longo da baía, as altas vazões do rio Paraguaçu e a ressurgência costeira. No que se referem às correlações de salinidade (Figura 45) observam-se também fortes correlações entre as estações de superfície e entre superfície e fundo, mas correlações moderadas a fracas, em maioria, entre as estações de fundo. Nestas últimas, uma tendência oposta à da temperatura ocorre ao longo do ano, com aumento dos coeficientes de correlação em direção ao verão. As baixas correlações ao longo do ano podem ser decorrentes do gradiente longitudinal negativo de precipitação existente na BTS, da diminuição da diluição de sal de TS3 a TS2 pelas altas vazões do rio Paraguaçu, e da ressurgência costeira.



**Figura 44 - Índice de correlação (R) mensal de temperatura entre as estações de superfície (TS2 e TS3), estações de fundo (TS1 e TS2) (a) e entre estações de superfície e fundo (TS2) (b).**



**Figura 45 - Índice de correlação (R) mensal de salinidade entre as estações de superfície (TS2 e TS3), estações de fundo (TS1 e TS2) e superfície e fundo (TS2).**

## 7 CONCLUSÕES

Ao longo dos três anos de estudo existiram dois distintos cenários meteorológicos na BTS: um seco associado ao ano de 2013, e outro úmido compreendendo os anos de 2014 e 2015. O ano de 2013 apresentou cerca de 280 horas a mais de exposição solar em relação a 2014 e 2015, ficando acima da média climatológica, registrou as maiores temperatura do ar (acima da média climatológica), apresentou maior frequência de ventos de NE e menores precipitações acumuladas de toda a série histórica dos últimos cinquenta anos na estação de Salvador e dos últimos trinta anos na estação de Cruz das Almas. Somado a estes fatores, neste mesmo ano ocorreu a segunda maior seca dos últimos trinta anos na bacia do Paraguaçu. Assim, pode-se concluir que a BTS vivenciou um dos anos hidrológicos mais secos dos últimos trinta anos. Já os anos de 2014 e 2015 foram marcados por uma maior nebulosidade, menor insolação, redução da temperatura do ar, menor incidência de ventos de NE, e maior aporte de água pluvial e fluvial.

As menores descargas de água doce, as elevadas taxas de radiação solar e insolação do ano hidrológico de 2013 foram os fatores que tornaram a BTS mais salina que o oceano, o que gerou uma situação de hipersalinidade na baía, a qual se desenvolveu para uma rolha de sal (densidade) no centro da BTS. Esta distorção eventual do campo de densidade deve ter alterado a circulação estuarina (gravitacional) clássica, situação esta pela primeira vez documentada no eixo central da BTS. Da mesma forma não é encontrado na literatura referência ao desenvolvimento de uma rolha de sal (densidade) dentre os grades estuários brasileiros.

As maiores amplitudes de oscilações de temperatura em frequência mareal ocorreram nas estações de fundo, com amplitude máxima de 1,1 °C (TS1), enquanto que as maiores oscilações de salinidade ocorreram na superfície, alcançando amplitude máxima de 2,6 psu (TS3). As maiores oscilações para os dois parâmetros ocorreram no verão tanto na superfície quanto no fundo. A propagação da maré na BTS foi o fator físico mais importante pelas oscilações nesta frequência em virtude da advecção de calor e sal ao longo da baía. Assim, ambos os parâmetros apresentam dois picos máximos e mínimos ao longo do ciclo semi-diurno da maré.

As maiores amplitudes de oscilação em frequência diurna (0,6 °C e 0,7 psu) ocorreram nas estações de superfície (TS3 e TS2-sup), o que sugere que a variação diurna para ambos os parâmetros são influenciados pela variação diurna da radiação solar. Existe uma defasagem temporal entre o pico da temperatura do ar com a da temperatura da água. Em média, as maiores temperaturas do ar ocorreram em torno das 13:00 horas, enquanto que as maiores temperaturas da água de superfície tiveram uma maior frequência em torno das 15:00 e 16:00 horas. No que se refere às estações de fundo, as maiores temperaturas ocorreram às 11:00 horas e às 23:00 horas. O ciclo diurno foi marcante nas estações de primavera e verão, enquanto que no inverno foi enfraquecido ou ausente.

O início do ano hidrológico da BTS (abril) marca a ruptura do gradiente térmico e o aumento do gradiente de salinidade da baía até o final do inverno em virtude do aumento da nebulosidade, diminuição da insolação, redução de radiação e aumento da precipitação regional. O início da primavera (setembro) marca o começo da intensificação da radiação solar, da diminuição do aporte pluviométrico, da elevação de horas de exposição solar e aumento da evaporação. Com isso, o gradiente térmico torna-se bem estabelecido e o gradiente de salinidade tende a diminuir até o final do verão. Entretanto, a BTS apresenta gradiente de salinidade bem estabelecido tanto no final do inverno quanto no início do verão, quando ocorrem as altas descargas de Pedra do Cavalo. As elevadas descargas de Pedra do Cavalo exercem intensa influência no campo termohalino em TS3, com tempo de resposta de até três dias, e de forma moderada na região central da BTS (TS2), com tempo de resposta de até sete dias. Este é o primeiro relato que mostra que o campo termohalino da região central da baía sofre influência das vazões de Pedra do Cavalo.

As amplitudes sazonais máximas de temperatura e de salinidade na BTS oscilaram entre 4,0 a 6,0 °C e 2,5 a 5,9 psu. Ao longo dos três anos de monitoramento existiu uma diminuição do gradiente de temperatura e aumento do gradiente de salinidade, que foram decorrentes da transição do ano árido (2013) para os anos mais úmidos (2014 e 2015). Além disso, a Água Continental (AC) tornou-se mais presente na BTS, e a Água Tropical (AT) menos frequente. É plausível que a circulação baroclínica (gravitacional) tenha sido intensificada ao longo dos três anos e favorecido maiores trocas efetivas entre a baía e a plataforma adjacente.

Em média, os valores mínimos de temperatura e de salinidade na BTS ocorrem em agosto, enquanto que os valores máximos ocorrem em março, existindo particularidades em TS3 e TS1. Valores mínimos de salinidade em TS3 ocorrem também em conjunção com as altas vazões de Pedra do Cavalo (dezembro) e os valores mínimos e máximos para ambos os parâmetros em TS1 ocorrem tipicamente em dezembro, quando aumenta a frequência de eventos de ressurgência costeira.

Eventos de ressurgência costeira são relacionados com os ventos de NE na primavera e no verão, causam queda de temperatura de até 2,3 °C em poucos dias em TS1, e chegam a exercer influência também na região central da BTS. Este fenômeno teve ocorrência típica em dezembro e foi mais frequente no ano de 2013.

Fatores astronômicos explicam a maior parte da variância (>76%) observada no campo de temperatura da água em todas as estações, mas são pouco relevantes nas variações do campo de salinidade (25-73%). O ciclo solar anual, semi-anual e o ciclo semi-diurno são, nesta ordem, as periodicidades mais importantes nas oscilações do campo termohalino.

As correlações do campo de temperatura entre as estações de superfície, de fundo e entre superfície e fundo foram fortes no início dos anos hidrológicos (meses de outono/inverno), mas com uma tendência de enfraquecimento em direção ao final do ano hidrológico (meses de verão). A baixa correlação no verão pode

ser explicada por processos tais como o aquecimento diferenciado ao longo da baía, as altas vazões do rio Paraguaçu e a ressurgência costeira. No que se refere às correlações de salinidade existiram também fortes correlações entre as estações de superfície e entre as estações de superfície e fundo, mas correlações moderadas a fracas, em maioria, entre as estações de fundo. Existiu uma tendência oposta à da temperatura ao longo do ano hidrológico, com aumento dos coeficientes de correlação de salinidade em direção ao verão. As baixas correlações de salinidade ao longo do ano podem ser decorrentes do gradiente longitudinal negativo de precipitação existente na BTS, da diminuição da diluição de sal de TS3 a TS2 pelas altas vazões do rio Paraguaçu, e da ressurgência costeira.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRY, R.G., 2013. Atmosfera, tempo e clima. Edição 9, Editora Bookman, Porto Alegre, p. 40-46.
- CABRERA, O.C. *et al.*, 2014. Salt-plug estuarine circulation in Malampaya Sound, Palawan, Philippines. *Philippine Science Letters*, v. 7, p. 428-433.
- CASTELLO, J. P., 2015. Introdução às Ciências do mar. Pelotas: Ed. Textos, Pelotas, p. 314-360.
- CAVALCANTE, G.; FEARY, D.; KJERFVE, B., 2013. Effects of Tidal Range Variability and Local Morphology on Hydrodynamic Behavior and Salinity Structure in the Caeté River Estuary, North Brazil. *International Journal of Oceanography*, v. 2013, p. 1-10.
- CHU, B. *et al.*, 2015. Effects of salinity on the transformation of heavy metals in tropical estuary wetland soil. *Chemistry and Ecology*, v. 31, p. 186–198.
- CIRANO, M.; LESSA, G. C. (2007). Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos. Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, p. 363-387.
- DYER, K.R., 1997. Estuaries: a physical introduction. Second Edition. J. Wiley & Sons Ltd. pp. 195.
- FRAZÃO, E. P., 2003. Caracterização hidrodinâmica e morfo-sedimentar do estuário Potengi e áreas adjacentes: subsídios para controle e recuperação ambiental no caso de derrames de hidrocarboneto. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física). Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).
- FROTA, F.; PAIVAL, B.; SCHETTINI, C., 2013. Intra-tidal variation of stratification in a semi-arid estuary under the impact of flow regulation. *Brazilian journal of oceanography*, v. 61, p. 23-33.
- GARRISON, T., 2010. Fundamentos de Oceanografia. Edição 4, Cengage Learning, São Paulo, p. 175-177.
- GENZ, F. (2006). Avaliação dos efeitos da Barragem de Pedra do Cavalo sobre a circulação estuarina do Rio Paraguaçu e Baía de Iguape. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, Brasil.
- GENZ F.; LESSA G.C., 2015. Twenty-six years of uneven changes in low flows due to different uses and operation of a large dam in a semiarid river. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, p. 523-532.
- HABIB, E. *et al.*, 2008. Effect of rainfall spatial variability and sampling on salinity prediction in an estuarine system. *Journal of Hydrology*, v. 350, p. 56-67.
- HATJE, V.; ANDRADE, B., 2009. Baía de Todos os Santos: aspectos oceanograficos. Salvador: EDUFBA, v. 1, p. 15-30.

IBGE (2014). Instituto brasileiro de geografia e estatística - estimativas populacionais para os municípios brasileiros, disponível em:

[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2013/estimativa\\_tcu.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2013/estimativa_tcu.shtm).

INMET (1992). Normas Climatológicas - 1961 a 1990, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, p. 155.

IKEDA, Y.; STEVENSON, M., 1978. Time Series Analysis of NOAA-4 Sea Surface Temperature (SST) Data. *Remote sensing of environment*, v. 7, p. 349-360.

KARBASSI, A.R.; HEIDARI, M.; VAEZI, A.R., 2014. Efect of pH and salinity on flocculation process of heavy metals during mixing of Aras River water with Caspian Sea water. *Environ Earth Sci*, v. 72, p. 457-465.

KOLM H.E.; ABSHER T.M., 1995. Spatial and temporal variability of saprophytic bacteria in the surface waters of Paranagua and Antonina Bays, Parana, Brazil. *Hydrobiologia*, v. 308, p. 197-206.

KUMAR, V.; SINHA, A., 2015. Linking environmental heavy metal concentrations and salinity gradients with metal accumulation and their effects: A case study in 3 mussel species of Vitória estuary and Espírito Santo bay, Southeast Brazil. *Science of Total Environment*, v. 523, p. 1-15.

LIMA, G.; LESSA, G., 2002. The freshwater discharge in Todos os Santos Bay and significance to the general water circulation. *Revista Pesquisas. Porto Alegre (RS)*, v. 29, p. 85-98.

LESSA, G. C.; CIRANO, M.; TANAJURA, C. A. S. ; SILVA, R.R. (2009). Oceanografia Física. In: Vanessa Hatje; Jailson B. de Andrade. (Org.). Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos. Salvador: EDUFBA, 2009, v. 1, p. 68-119.

LESSA, G.; MAFALDA, P.; SOUSA, M; GOMES, D.; SAMPAIO, C.; TEIXEIRA, C.; SOUZA, J.; ZUCCHI, M., 2016. Variabilidade intra-anual da oceanografia da baía de todos os santos: evidências de 3 anos de monitoramento, p. 7-10, 30-33.

MAGRIS, R. A.; PEREIRA, J.; FERNANDES, L., 2011. Interannual Variability in Tropical Estuarine Copepod Assemblages off Northeastern Brazil. *Journal of crustacean biology*, v. 31, p. 260-269.

MEDEIROS, Y.; FONTES, A.; CASTRO, M., 2015. Plano de operação de reservatórios para atendimento aos requerimentos da vazão ambiental. Comitê brasileiro de barragens, xxx seminário nacional de grandes barragens foz do iguaçu – PR, pp. 3.

MEDEIROS, A. ; BARBOSA, J.; MEDEIROS, P.; ROCHA, R.; SILVA, L. 2010. Salinity and freshwater discharge determine rotifer distribution at the Mossoró River Estuary (Semiarid Region of Brazil). *Braz. J. Biol.*, v. 70, p. 551-557.

- MIRANDA, L.; CASTRO, B.; KJERVE, B., 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 27-58.
- NUNES-VAZ, R. A., 2012. The salinity response of an inverse estuary to climate change & desalination. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 98, p. 49-59.
- PEREIRA, M.A.; LESSA, G.C., 2009. Varying patterns of water circulation in canal de coteigipe, Baía de Todos os Santos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27, p. 103-119.
- PLAVAN, A. A.; PASSADORE, C.; GIMENEZ, L., 2012. Fish assemblage in a temperate estuary on the uruguayan coast: seasonal variation and environmental influence. *Brazilian journal of oceanography*, v. 59, p. 299-314.
- RAMOS, S.S., 2013. Efeito da salinidade sobre a velocidade de queda de sedimentos finos de uma bacia portuária. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). – Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- SANTANA, R.C., 2015. O impacto de diferentes forçantes na circulação residual de um estuário tropical bem misturado: Baía de Todos os Santos, Brasil - 13oS. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia.
- SANTOS, C., 2007. Estatística Descritiva - Manual de Auto-aprendizagem, Lisboa, pp. 123.
- SANTOS, F.M., 2014. Ressurgência costeira localizada na região de formação da Corrente do Brasil (13oS). Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia.
- SHAHA, D.; CHO, Y., 2016. Salt Plug Formation Caused by Decreased River Discharge in a Multi-channel Estuary. *Scientific Reports*, v 6, p. 2-11.
- SILVA, A.C.; LACERDA, L.D.; MORAIS, J., 2012. Spatial and temporal variability of hydrographic parameters measured in the estuary of the jaguaribe river (semi-arid region, northeast, brazil). *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 30, p. 245-261.
- STACEY, M.; BURAU, J.; MONISMITH, G., 2001. Creation of residual flows in a partially stratified estuary. *Journal of geophysical research*, v. 106, p. 13-17.
- VALLE-LEVINSON, A.; BOSLEY, K., 2003. Reversing circulation patterns in a tropical estuary. *Journal of geophysical research*, v. 108, NO. C10, 3331, doi:10.1029/2003JC001786, 2003.
- VALLE-LEVINSON, A., (2010). *Contemporary issues in estuarine physics*. Cambridge University Press, New York, p. 5-35.
- VAN AKEN, H. (2008). Variability on the water temperature in the western Wadden Sea on tidal to centennial time scales. *Journal of Sea Research*, v. 60, p. 227–234.

VAN AKEN, H. (2008). Variability on the salinity in the western Wadden Sea on tidal to centennial time scales. *Journal of Sea Research*, v. 59, p. 121–132.

YOON, B.; WOOA, S., 2015. The Along-channel Salinity Distribution and its Response to River Discharge in Tidally-dominated Han River Estuary, South Korea. *Procedia Engineering*, v. 116 , p 763 – 770.

XAVIER, A. G. 2002. Análise hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, pp. 222.