

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**PADRÕES DE CIRCULAÇÃO COSTEIRA DO LITORAL
NORTE DO RS**

MAURO MICHELENA ANDRADE

ORIENTADOR – Prof. Dr. Elírio E. Toldo Junior (UFRGS)

Porto Alegre – 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**PADRÕES DE CIRCULAÇÃO COSTEIRA DO LITORAL
NORTE DO RS**

MAURO MICHELENA ANDRADE

ORIENTADOR – Elírio E. Toldo Junior (UFRGS)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. - Eduardo Puhl

Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. - Felipe Mendonça Pimenta

Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. - Osmar Olinto Möller Junior

Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande.

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Ciências.

Porto Alegre – 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Andrade, Mauro Michelena
PADRÕES DE CIRCULAÇÃO COSTEIRA DO LITORAL NORTE DO
RS / Mauro Michelena Andrade. -- 2019.
107 f.
Orientador: Elírio Ernestino Toldo Jr..

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de
Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2019.

1. CORRENTES COSTEIRAS. 2. Nível do mar. 3.
Corrente longitudinal. 4. Fundeios oceanográficos. 5.
ADCP. I. Toldo Jr., Elírio Ernestino, orient. II.
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dedicatória

À Maryhá, minha esposa,
com amor.

"Restará sempre muito o que fazer..."

Lema da Hidrografia da Marinha do Brasil

AGRADECIMENTOS

A aquisição de séries temporais longas de dados oceanográficos envolve muito tempo e muita dedicação de um grande número de pessoas. Esta tese só foi realizada devido ao comprometimento de professores, pesquisadores, técnicos, funcionários e alunos. Assim, agradeço a todos que ao longo de muitos anos de esforços fizeram do CECO uma referência em pesquisas na área da Geociência.

Agradeço ao meu orientador, Elírio E. Toldo Jr. Além dos incontáveis ensinamentos na ciência, aprendi o valor de tratar todos com respeito. Nunca foi tão claro como o exemplo pode transformar as pessoas.

Ao técnico, José Carlos R. Nunes, que desde o início me apoiou, incentivou e discutiu desde as questões técnico-científicas tratadas nesta tese até questões do campo das relações interpessoais, um verdadeiro amigo!

Agradeço aos meus amigos do CECO: Fernando Scottá, Volney Bitencourt, Erick Antal, Cristiano Fick, Natacha de Oliveira, Ana Rita de Oliveira, Cristiane Bahi, Gilberto Santos, Eduardo Martins, Michel Franco e Luidgi Marchese. O doutorado foi muito mais legal com vocês.

Aos amigos de Florianópolis, Luís Felipe, Fernando Sobral, Eric Nardi, Ricardo Pirula e Luana e também aos colegas do LabDino/UFSC, pela ajuda, motivação e acolhida no terço final desta tese.

Quero agradecer a minha pequena e afetuosa família, mãe, pai e irmã, que ainda não compreendem totalmente meu “trabalho”, mas sempre me apoiaram. Também, a família da minha esposa que me acolheram com carinho o comida. Agradeço especialmente a minha esposa Maryhá, pelo amor, carinho e apoio incondicional nesses anos de doutorado. Tua força me deu forças!

Ao auxílio financeiro, através do Edital CAPES Ciências do Mar II 43/2013, para a realização das campanhas oceanográficas, bem como pela Bolsa de Doutorado.

Por fim, agradeço à banca examinadora, a qual dedicou tempo e trabalho na revisão deste trabalho.

RESUMO

O estudo dos processos hidrodinâmicos da plataforma continental interna e da zona de surfe são de extrema relevância científica e social, uma vez que este ambiente marinho apresenta grande dinâmica, sendo um dos mais suscetíveis a impactos antropogênicos por causa da proximidade com os grandes conglomerados urbanos e pelas modificações da zona costeira. Para compreender estes processos, foi estabelecido no litoral norte do RS um plano de monitoramento de curto prazo (4 anos) das velocidades das correntes litorânea e costeira; do nível do mar; dos parâmetros ondulatórios e das variáveis meteorológicas. A análise do conjunto desses dados permitiu a determinação da forte influência da componente longitudinal do vento sobre a circulação por correntes na plataforma interna e, também, sobre as oscilações em baixas frequências do nível do mar. Os valores do tempo de defasagem entre a atuação do vento e a resposta, tanto sobre as correntes costeiras, como sobre o nível do mar, evidenciaram um sincronismo entre os movimentos da água e a ação do vento. Ademais, foi identificado o processo do transporte de Ekman, em uma região muito próxima à costa e em pequenas profundidades. E, também, a variabilidade da hidrodinâmica costeira à sazonalidade do comportamento do vento. Durante os meses de outono e inverno, eventos extremos de elevação do nível do mar são mais frequentes e intensos. A passagem dos sistemas atmosféricos com ventos intensos de Sul, associados a marés de sizígia e ondas com grandes alturas, podem elevar em 3,2 m o nível médio do mar. A amplitude média da maré astronômica e a média das oscilações de baixa frequência foram calculadas em 0,31 e 0,37 m, respectivamente, ou seja, muito semelhantes entre si. Verificou-se também que parte considerável da energia das oscilações do nível do mar tem origem astronômica, sendo que os resultados demonstram que, apesar da pequena amplitude, a maré astronômica sempre deve ser considerada nos estudos sobre a hidrodinâmica costeira no litoral do RS. A circulação por correntes longitudinais na zona de surfe, gerada pela quebra das ondas, em um processo de fluxo de energia por tensão de radiação, foi descrita através de medições diretas na praia, sendo identificado um padrão onde as ondulações de SE geram correntes direcionadas para NE, e vagas de NE induzem fluxos para SO. O cálculo do fluxo de momentum longitudinal teve forte correlação com a intensidade e direção da corrente longitudinal. Além disso, correlações significativas foram encontradas entre altura das ondas e a intensidade da corrente, bem como entre o ângulo de incidência das ondas e a direção da corrente.

Palavras-chave: CORRENTES COSTEIRAS. NIVEL DO MAR. CORRENTE LONGITUDINAL. FUNDEIO ADCP.

ABSTRACT

The study of hydrodynamic processes on the inner continental shelf and surf zone are of extreme scientific and social relevance. This is due to the fact that the mentioned marine environment has great dynamics, a large susceptibility to anthropogenic impacts due to its proximity to large urban conglomerates, and due to modifications of the coastal zone. In order to understand those processes, a short-term (4-year) monitoring plan of the coastal and alongshore current velocities, sea level, wave parameters, and meteorological variables was established on the northern coast of the state of Rio Grande do Sul (RS). The analysis of this dataset allowed the determination of a strong influence of the wind alongshore component on the circulation of currents on the inner continental shelf, and also on the low-frequency oscillations of the sea level. The lag between the wind action and the responses from both coastal currents and sea level evidenced a synchronism between the water movements and the wind driving force. Furthermore, the Ekman transport process was identified in a region very close to the coast and at small depths. The coastal hydrodynamic vulnerability to the seasonality of the wind behavior was also observed. During the autumn and winter months, extreme events of sea level rise were more frequent and intense. The passage of atmospheric systems with intense southern winds associated with spring tides and high waves can raise the mean sea level by 3.2 m. The mean amplitude of the astronomical tide and the average of low-frequency oscillations were calculated and resulted in 0.31 and 0.37 m, respectively, very similar to each other. It was also verified that a considerable portion of the energy from sea level oscillations had an astronomical origin. The results showed that, despite the small amplitude, the astronomical tide must always be considered in the studies on coastal hydrodynamics on the RS coast. The circulation by alongshore currents in the surf zone driven by wave breaking – and encompassed by a process of energy flow by radiation stress – was described through direct measurements on the beach. A pattern where waves from the southeast (SE) drove northeasterly currents, and waves from the northeast (NE) induced fluxes towards the southwest (SW) was identified. The calculation of the alongshore momentum flux had a strong correlation with the intensity and direction of the alongshore current. In addition to that, significant correlations were found between wave height and current intensity, as well as between the angle of wave incidence and the current direction.

Key-words: COASTAL CURRENTS. SEA LEVEL. ALONGSHORE CURRENT. ADCP MOORING.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1.** Delimitação da área de estudo no litoral norte do RS, onde os círculos amarelo e vermelho indicam o local do fundeio do AWAC e da estação meteorológica, respectivamente. 20
- Figura 2.** Localização da infraestrutura existente e instalada durante o desenvolvimento do Projeto Ciências do Mar I e II - CAPES, na praia de Tramandaí. 28
- Figura 3.** Fotografia do perfilador acústico de ondas e correntes (AWAC) na popa do barco Sea Green. 29
- Figura 4.** Perfilador acústico de correntes por Doppler (Aquadopp) com o lastro (branco) utilizado para o lançamento a partir da Plataforma de Pesca..... 31
- Figura 5.** Vista aérea da Plataforma de Pesca de Tramandaí. Fonte: www.obaoba.com.br. 32

CAPÍTULO 2

- Figura 1.** Área de estudo. A) Localização aproximada com destaque para o estado do Rio Grande do Sul; B) Plataforma Interna ao largo de Tramandaí. Círculo e quadrado pretos indicam o local do fundeio do AWAC e da Estação Meteorológica, respectivamente. 39
- Figura 2.** Séries temporais entre 17 de dezembro e 13 de março. A) Dados de vento, valores positivos indicam proveniência do quadrante S, e negativos do quadrante N; B) Componente longitudinal da corrente medidas a 1 m (preto) e a 10 m (cinza) de profundidade, os valores positivos indicam fluxos para N e negativos para S; C) Componente transversal da corrente, os valores positivos indicam fluxos em direção ao mar aberto, e negativos em direção à costa. 41
- Figura 3.** Perfil médio da velocidade da corrente: em preto os valores positivos indicam sentido para N e negativos para S; em cinza, valores positivos indicam correntes em direção ao oceano e negativos à costa..... 41
- Figura 4.** Parâmetros físicos da água adquiridos entre 17 de dezembro e 13 de março. A) Série temporal de nível d'água filtrada; 42
- Figura 5.** Estimativa de densidade espectral da corrente. A) Componente longitudinal da corrente; B) Componente transversal da corrente..... 42
- Figura 6.** Estimativa de densidade espectral do vento. 42
- Figura 7.** Correlação cruzada entre os dados. A) corrente e vento longitudinais; B) corrente transversal e vento longitudinal..... 43
- Figura 8.** Correlação cruzada entre os dados de nível do mar e as componentes longitudinal (em preto) e transversal (em cinza) do vento. 43
- Figura 9.** Descrição do mecanismo de subsidência costeira para uma condição de vento SO. A) Perfil médio da velocidade da corrente longitudinal a costa, valores positivos indicam direção N; B) Perfil médio da velocidade transversal à costa, valores positivos indicam fluxo em direção ao oceano, valores negativos indicam direção à costa; C) Temperatura da água no fundo; D) Nível médio do mar..... 44
- Figura 10.** Descrição do mecanismo de ressurgência costeira para uma condição de vento NE. A) Perfil médio da velocidade longitudinal a costa, valores negativos indicam direção S; B) Perfil médio da velocidade transversal à costa, valores positivos indicam fluxo em direção ao oceano, valores negativos indicam direção à costa; C) Temperatura da água no fundo; D) Nível médio do mar..... 45

CAPÍTULO 3

Figure 1. Study site located in Tramandaí, northern coast of the state of RS. Positions of the mooring and the meteorological station are indicated.	50
Figure 2. SL time series from summer 2014 (mooring 01). a) Raw data. b) Tidal (in black) and subtidal (in red) frequencies.	52
Figure 3. SL time series from winter and spring 2014 and summer 2015 (mooring 02). a) Raw data. b) Tidal (in black) and subtidal (in red) frequencies.	52
Figure 4. SL time series from autumn 2015 (mooring 03). a) Raw data. b) Tidal (in black) and subtidal (in red) frequencies.	52
Figure 5. SL time series from summer and autumn 2016 (mooring 04). a) Raw data. b) Tidal (in black) and subtidal (in red) frequencies.	53
Figure 6. Spectral analysis for each season. Sea level (left) and alongshore wind (right). ...	54

CAPÍTULO 4

Fig. 1 Location of the coastal zone from the northern portion of the state of Rio Grande do Sul (RS) and the lagoon morphological details surrounding Tramandaí beach. Yellow and red circles represent the location of AWAC Mooring and the Meteorological Station, respectively	66
Fig. 2 Unstructured grid with the respective SBCS bathymetry. The spatial resolution of the domain increases as the depth decreases. Red circle represent location of the AWAC Mooring and data extraction point	71
Fig. 3 Validation of AWAC model results (black) using WW3 data (dotted) for all the analyzed parameters (Hs, Tp, Dm) from 2017	73
Fig. 4 Time series of the wave parameters recorded by the AWAC between December 2014 and May 2015. a) significant wave height, b) peak period, and c) mean wave direction. Dashed rectangles indicate the periods of the alongshore current measurements during the field campaigns	75
Fig. 5 Time series of the wave parameters recorded by the AWAC between January and June 2016. a) significant wave height, b) peak period, and c) mean wave direction. Dashed rectangles indicate the periods of the alongshore current measurements during the field campaigns	75
Fig. 6 Time series of the wave parameters generated by the WW3 model between May and October 2017. a) significant wave height, b) peak period, and c) mean wave direction. Dashed rectangles indicate the periods of the alongshore current measurements during the field campaigns	76
Fig. 7 Four patterns of the mean vertical profile of the alongshore current speed in module. a) decreasing profile, b) increasing profile, c) convex profile, d) concave profile	77
Fig. 8 Correspondence between the angle of wave incidence and the direction of the alongshore current	78
Fig. 9 Correlation between significant wave height (Hs) and intensity of the mean alongshore current in the region between banks	79
Fig. 10 Relationship between the momentum flux along the coast – calculated using equation 2 – and the velocity of the alongshore current measured in the surf zone. Red dots represent bimodal sea conditions.....	80

Fig. 11 Scheme of the alongshore current in the surf zone (green arrow) associated with the direction of wave incidence. a) NE waves and southwesterly alongshore current. b) SE waves and northeasterly alongshore current..... 82

CAPÍTULO 5

Figura 6. Esquema com os processos de subsidência (a) e ressurgência (b) costeira identificados no litoral Norte do RS. Seta azul escuro representa a direção do vento, a seta vermelha as correntes na camada de superfície e a seta azul claro as correntes de fundo. 93

Figura 7. Esquema da corrente longitudinal na zona de surfe (seta verde) relacionada com a direção de incidência da onda. a) ondas de NE e corrente longitudinal para SO. b) ondas de SE e corrente longitudinal para NE. 96

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Datas de início e fim, as configurações amostrais e fonte de energia (modo) utilizada em cada um dos fundeios.	29
Tabela 2. Datas de início e fim das campanhas de medição de velocidades de correntes no interior da zona de surfe.	31

CAPÍTULO 3

Table 1. Data sampled periods of each mooring.....	51
Table 2. Mean tidal range (MTR) and SL maximum above and below the zero calculated for tidal and subtidal time series for each mooring.	52
Table 3. Duration and total number of events of SL above (positive) and below (negative) two standard deviations (STD) and three STDs from the raw data series for each season. .	53
Table 4. Variances of tidal and subtidal oscillations and of the high- and low-frequency alongshore wind for each season.....	54

CAPÍTULO 4

Table 1 Sampling periods, season and mooring depth of the oceanographic moorings located on Tramandaí beach	69
Table 2 Periods of the field campaigns of alongshore current measurements carried out from the Tramandaí Fishing Platform. The wave data source (AWAC or WW3) is also shown.....	72
Table 3 Mean square error (RMSE), Pearson's correlation coefficient (R) and Bias calculated between the AWAC data and the WW3 results	74

Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	14
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	24
1.2. OBJETIVOS	26
1.3. HIPÓTESES DO ESTUDO	26
1.4. MATERIAL E MÉTODOS	27
1.4.1. Fundeios oceanográficos	28
1.4.2. Medições de correntes na zona de surfe	30
1.4.3. Medições de parâmetros meteorológicos	33
1.4.4. Análises primárias dos dados	33
1.5. SOBRE A ESTRUTURA DESTA TESE:	35
CAPÍTULO 2 Variabilidade das correntes na plataforma interna ao largo de Tramandaí, RS durante o verão de 2014	36
1. INTRODUÇÃO	37
2. ÁREA, MATERIAIS E MÉTODOS	38
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4. CONCLUSÕES	45
5. REFERÊNCIAS	46
CAPÍTULO 3 Tidal and subtidal oscillations in a shallow water system in southern Brazil	47
1. INTRODUCTION	48
2. MATERIAL AND METHODS	49
3. RESULTS	51
4. DISCUSSION	54
5. CONCLUSIONS	56
6. ACKNOWLEDGMENTS	56
7. REFERENCES	56
CAPÍTULO 4 Circulation in the shallow waters from the northern coast of Rio Grande do Sul, Brazil, a wave-dominated system	58
1. INTRODUCTION	62
2. MATERIAL AND METHODS	68
3. RESULTS AND DISCUSSION	74
4. CONCLUSIONS	81
5. ACKNOWLEDGMENTS	82
6. REFERENCES	83
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO	91
5.1. SÍNTESE INTEGRADORA	92
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Em todo planeta, pequenos e grandes centros urbanos se desenvolveram nas proximidades das zonas costeiras, principalmente devido à possibilidade de instalação de portos, à sua abundante fonte de recursos naturais, e também às atividades ligadas ao lazer. Small & Nicholls (2003) determinaram que 23 % da população mundial, na década de 1990, residia nas zonas costeiras, neste estudo foi considerada uma faixa entre a linha de costa e 100 km e até 100 m de altitude. A densidade demográfica é três vezes maior que a média global. Estimativas mais recentes de órgãos intergovernamentais indicam que em torno de 44 % da população ocupe esta zona. No Brasil, o percentual também está em torno de 23 %; entretanto, a densidade demográfica dessa região é cinco vezes maior do que a média nacional (NAKANO, 2006).

Nesse contexto, o estudo do comportamento oceanográfico na plataforma continental na porção mais próxima à costa torna-se muito importante. Uma vez que, aspectos relacionados à: dinâmica dos sedimentos, segurança da navegação, disponibilidade de nutrientes, vida dos organismos planctônicos na zona eufótica e contaminação das águas marinhas por poluentes devem ser conhecidos. Além disso, problemas relacionados diretamente as forçantes hidrodinâmicas, como por exemplo, inundações por marés meteorológicas, erosão costeira e variações do nível médio do mar, reforçam a necessidade do conhecimento não somente dos efeitos e causas, mas também da variabilidade espaço-temporal das correntes costeiras, do nível do mar e sobre o clima de ondas.

A plataforma continental interna, que abrange profundidades de alguns metros a dezenas de metros, é uma região dinâmica definida entre a zona de arrebentação e a plataforma continental média. Muitos tipos de forçantes que são frequentemente negligenciadas na plataforma continental mais profunda - como marés, plumas de rios, ondas de gravidade superficiais e tensão do vento - conduzem processos de circulação importantes na plataforma interna (LENTZ & FEWINGS, 2012). A circulação entre a plataforma externa e interna tem consequências ecológicas e geológicas muito importantes. Essa região conecta a região costeira ao oceano, proporcionando o transporte entre esses ambientes de poluentes, larvas, sedimentos, nutrientes e fitoplâncton (LENTZ & FEWINGS, op. cit.).

O ambiente costeiro que faz a transição entre a plataforma continental interna e o continente - a praia - é um dos sistemas físicos da superfície da Terra com maior dinâmica. São feições geológicas temporárias, movimentadas pela ação das ondas em um equilíbrio dinâmico e podem ser definidas como um acúmulo de sedimentos depositados pelas ondas. O sistema praiial se estende desde o ponto onde as ondas começam a sofrer transformações pela mudança de profundidade até o ponto de ação dessas no continente, que pode estar associado a uma falésia, duna ou vegetação permanente (SHORT, 1999).

As ondas exercem um importante papel na formação das feições costeiras (CALLIARI et al., 2006). Ao se aproximarem de regiões de águas rasas sofrem transformações por reflexão, refração e difração. Estes fenômenos resultam no estabelecimento de padrões de circulação costeira, os quais são fundamentais para o transporte de sedimentos na costa. A refração ocorre quando a propagação das cristas das ondas em direção às águas rasas possuem um ângulo em relação à linha de praia, o que forçará a mudança do alinhamento da crista da onda (WRIGHT et al., 1999).

Outro processo relacionado à aproximação das ondas com um ângulo oblíquo em relação à linha de costa ocorre no momento da quebra da onda. Esse processo produz um vetor de energia, o qual gera uma corrente paralela à costa, dentro da zona de surfe (DAVIS JR. & FITZGERALD, 2004). Isso sempre ocorre quando a incidência das ondas em relação à linha de praia for oblíqua e será controlado principalmente pela altura e ângulo de incidência da onda. Esse vetor de energia é definido como um fluxo de tensão de radiação (em inglês: "*radiation stress*"), que pode ser transversal ao movimento de propagação da onda (LONGUET-HIGGINS, 1962, apud KOMAR, 1976). Esse mecanismo se constitui na força indutora da citada corrente longitudinal, a qual é característica para cada ambiente e que pode coexistir com correntes geradas pelas marés e pelo vento. Além das forças citadas, essa corrente pode depender da inclinação do fundo da praia, do atrito com o fundo e com o vento (NIELSEN, 2009).

Essa circulação por correntes na zona de surfe é um processo extremamente dinâmico responsável por transportar os sedimentos remobilizados pela quebra das ondas e que se encontram em suspensão e no fundo (U. S. ARMY, 1984). O transporte gerado a partir dessas correntes é a chamada deriva litorânea. A grande

turbulência associada à quebra das ondas possibilita que enormes quantidades de sedimentos sejam transportadas por arraste ou suspensão por longas distâncias paralelamente à costa (ARAÚJO e ALFREDINI, 2001). O conhecimento dessa variável é muito importante para a gestão dos ambientes costeiros, principalmente aqueles urbanizados.

A dinâmica costeira é a principal responsável pelo desenvolvimento das praias arenosas e pelos processos erosivos e deposicionais que as mantêm em constante alteração (VILLWOCK e TOMAZELLI, 1995). Os ventos, as ondas e as correntes longitudinais atuam ininterruptamente sobre os materiais que aí se encontram. A esses processos somam-se as marés e as sobre elevações do nível do mar produzidas pelas tempestades (VILLWOCK e TOMAZELLI, op. cit.). As variações do nível do mar ocorrem geralmente por forçantes naturais, como por exemplo, marés, ondas e ventos. Assim, quando há transferência de energia para a coluna d'água através da quebra das ondas, processos astronômicos e fenômenos meteorológicos, ocorrem as variações do nível do mar (PAULA et al., 2015).

Compreender e dissociar as oscilações do nível do mar causadas por forçantes meteorológicas das astronômicas é muito importante para a segurança da navegação, engenharia costeira e balanço de sedimentos, por exemplo. Os problemas causados por esse fenômeno são mais importantes quando os valores são muito mais altos ou mais baixos do que aqueles normalmente registrados, por exemplo: quando ocorrem níveis mais altos, maior intrusão de água salgada pode atingir áreas em que normalmente a água salgada não ocorre, produz inundações em áreas residenciais com graves danos materiais; quando os níveis são extremamente baixos, a navegação nos canais de acesso aos portos pode ser impedida; além dos impactos ecológicos que também podem ocorrer (CLARA et al., 2015; FENG et al., 2015; WILLIAMS, 2013).

Análises de dados de nível do mar coletados por meio de observações dos níveis do mar e correntes servem para dois principais propósitos. Primeiramente, uma boa análise fornece a base para predições das marés no futuro, a qual é uma valiosa ajuda para a navegação e outras operações costeiras. Em segundo, os resultados das análises dos níveis podem ser interpretados cientificamente para estender o conhecimento em hidrodinâmica costeira e suas respostas às forças da maré astronômica e da atmosfera (PUGH, 2004).

Os estudos sobre a evolução dos sistemas costeiros examinam e exploram as razões pelas quais a posição da linha de costa se altera ao longo tempo (CARTER & WOODROFFE, 1994). Estas alterações são resultados da ação de eventos atmosféricos extremos associados ou não a mudanças climáticas de escala global, bem como dos impactos antropogênicos em escala regional que afetam o balanço sedimentar de áreas costeiras.

Carter & Woodroffe (*op. cit.*) reportam ainda que estudos de evolução de ambientes costeiros vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo. Entretanto, existem significativos e generalizados eventos de perda sedimentar, e consequentemente da limitação do espaço de ocupação humana junto às linhas de costa nas últimas décadas. Indicam ainda existir a necessidade do conhecimento dos processos e causas indutoras desses eventos como forma de embasar soluções técnicas para a preservação desses espaços densamente ocupados.

No entanto, o papel relativo dos diferentes processos físicos e seu acoplamento como forçante no transporte através da plataforma continental permanece pouco compreendido em algumas regiões, devido à falta de observações simultâneas de campo em diferentes profundidades (TORRES-FREYERMUTH et al., 2017). O conhecimento sobre o futuro da zona costeira relacionado ao transporte de sedimentos no que concerne o desenvolvimento dos pontais arenosos, morfologia das praias e migração de desembocaduras tem grande importância, por exemplo, na redução dos riscos na área da engenharia costeira.

Ao longo de toda a costa brasileira, bem como no litoral do Rio Grande do Sul, há um déficit de séries temporais longas de dados observacionais de ondas, correntes e nível do mar, e também há falhas na distribuição geográfica desse tipo de amostragem (COSTA e MÖLLER, 2011). Tanto quanto a variabilidade das correntes costeiras nas escalas temporais interanuais, sazonais, sinóticas e diurnas como, as principais forçantes causadoras desses movimentos, ainda não são bem compreendidas (ZAVIALOV et al., 2002). Além disso, a variabilidade do nível médio do mar, tanto na frequência mareal quanto na sub-mareal, também carece de estudos (VALENTIM et al., 2013). Não há registros na bibliografia de medições de longo prazo desse parâmetro em praias oceânicas do RS.

Outro ponto com estudos incipientes é a interação entre o clima de ondas na

plataforma interna e a circulação por correntes no interior da zona de surfe. Um dos trabalhos pioneiros nessa questão foi feito por Jung (2010), no qual medições de velocidades de correntes na zona de surfe foram realizadas a fim de determinar a relação entre o ângulo de incidência e altura das ondas à intensidade e direção das correntes longitudinais à linha de praia.

Além disso, observa-se uma tendência significativa de aumento do nível médio do mar em vários pontos ao redor do mundo, incluindo locais na costa brasileira (PBMC, 2016) e uma intensificação de eventos extremos de sobre elevação do nível do mar (NEVES FILHO, 1992; MAWDSLEY et al., 2014). Esses efeitos seriam mais prejudiciais se a altura e a duração das tempestades aumentarem como resultado de uma mudança climática, como demonstrado em Fiore et al. (2009). Nesse cenário, as regiões costeiras em todo o mundo devem, em geral, tornarem-se mais vulneráveis.

Área de estudo

O litoral do Rio Grande do Sul, no sul do Brasil, é um exemplo de região altamente vulnerável aos efeitos do aumento do nível médio do mar previstas para o futuro. Isto é devido às características morfodinâmicas intrínsecas, como um pequeno gradiente costeiro, combinado com um alto grau de exposição à dinâmica oceânica (GERMANI et al., 2015). Além disso, alguns processos relacionados à hidrodinâmica, à morfodinâmica e ao movimento dos sedimentos representam perigos e riscos costeiros ao longo do litoral do estado. Os riscos implicam em erosão costeira, perda de habitats e mudanças ambientais. Os perigos estão relacionados a acidentes graves, incluindo fatalidades para os usuários costeiros (CALLIARI et al., 2010).

A Plataforma Continental do Sul do Brasil, localizada entre o Cabo de Santa Marta (29° S) e o Chuí (34° S), se estende até a isóbata de 180 m e possui na parte norte uma largura de 110 km e ao sul, 170 km (CALLIARI et al., 2009; HARTMANN, 1996). A declividade do fundo, entre 0,03° e 0,08°, é considerada suave (TOLDO et al., 2006a). Quanto ao regime sedimentar dessa plataforma, pode-se dizer que ele é predominantemente terrígeno e que a presença de sedimentos relíquias e palimpsest ocupam a maior parte dessa região, enquanto as fontes de suprimentos modernos estão confinadas e relacionadas com a influência do Rio da Prata e da

Lagoa dos Patos (CORRÊA, 1987). A morfologia atual da superfície do fundo e as feições relíquias, definida como palimpsest, têm sido parcialmente modificadas pela hidrodinâmica atual (CALLIARI e KLEIN, 1993).

Com orientação NE-SO, a linha de costa do RS é suavemente ondulante, sem reentrâncias e caracteriza-se por uma barreira contínua com apenas duas descontinuidades permanentes, as desembocaduras da Lagoa dos Patos e da Lagoa de Tramandaí (DILLENBURG et al., 2004). Essa barreira é composta de praias oceânicas arenosas com largura variando entre 50 e 100 metros e declividade entre 3 e 5 graus (FACHIN, 1998). No limite norte está o único promontório rochoso desse litoral, o qual chega até a linha de praia da cidade de Torres. A partir deste local, a costa se estende por aproximadamente 620 km até o município do Chuí, no extremo sul (CALLIARI et al., 2006).

A localização precisa da área de estudo abrange a porção norte da plataforma continental do RS (Figura 1), mais precisamente as regiões da plataforma interna e da zona de surfe, ao largo do município de Tramandaí. Essa parte do litoral forma um ângulo regional de 37° de inclinação em relação ao Norte Verdadeiro.

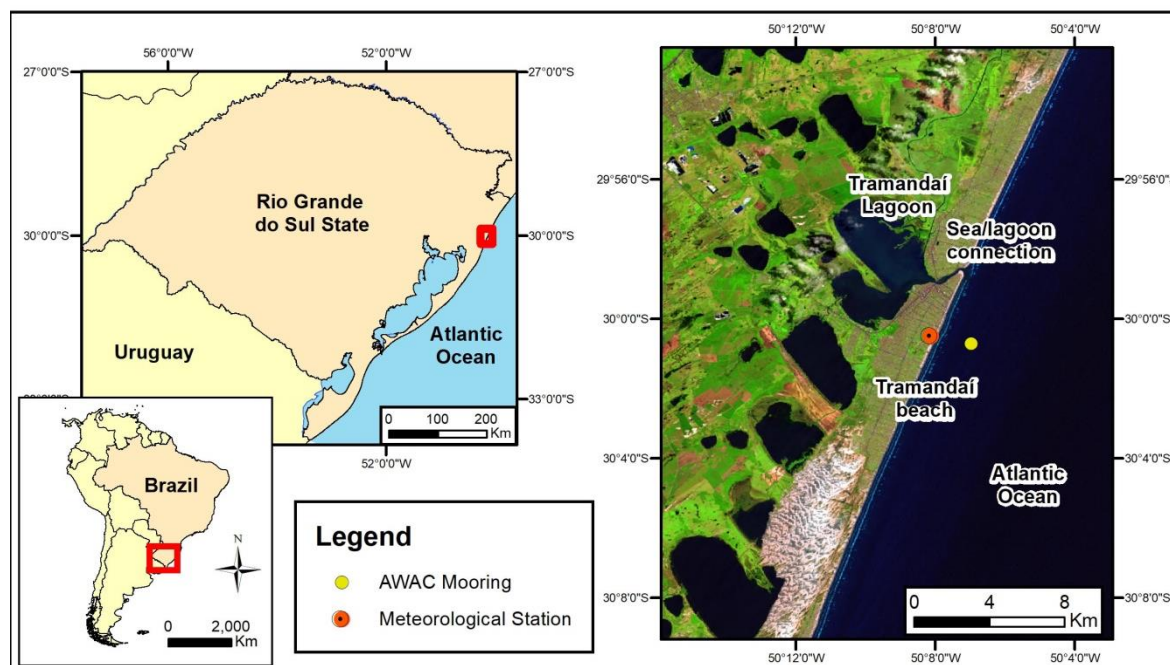


Figura 1. Delimitação da área de estudo no litoral norte do RS, onde os círculos amarelo e vermelho indicam o local do fundeio do AWAC e da estação meteorológica, respectivamente.

A antepraia e a plataforma interna apresentam uma morfologia complexa, a

qual é resultado de vários episódios transgressivos e regressivos gerados por ciclos glaciais que alteraram o nível médio do mar (CALLIARI e KLEIN, 1993; VILLWOCK e TOMAZELLI, 1995). A antepraia é ampla e rasa com limite externo entre 10 e 15 m de profundidade, apresentando grandes bancos arenosos (TOLDO et al., 2006b). O assoalho da antepraia consiste principalmente de sedimentos arenosos, no sistema praias é encontrado um material bem selecionado, areia fina (MARTINS, 1967, apud CALLIARI et al., 2006).

A praia de Tramandaí apresenta na maioria das vezes duas ou mais linhas de arrebatção, os bancos arenosos apresentam-se dispostos longitudinalmente à linha de praia (MA, 2013). A praia de Imbé, vizinha à Tramandaí e localizada ao norte do canal da Laguna de Tramandaí, foi caracterizada no trabalho de Toldo et al. (1993) através de aspectos morfodinâmicos como intermediária a dissipativa. As seguintes características foram determinantes para tal classificação: praia constituída de areia fina, baixo gradiente (entre 1/30 e 1/49), grande extensão e rebatção do tipo deslizante e mergulhante, as quais se dissipam progressivamente através de uma extensa zona de surfe.

No que diz respeito ao regime de vento, dominam ao longo do ano ventos do quadrante NE. Mas, inversões periódicas na direção, para SO, são observadas durante a passagem de frentes meteorológicas, as quais são mais frequentes no outono e inverno (CAVALCANTI & KOUSKY, 2009). Estudos mostram (BARROS et al., 2002; PIOLA et al., 2005) que o campo de ventos também apresenta grande variabilidade interanual ligada a eventos do El Niño Oscilação Sul. Durante anos de El Niño, ventos de NE predominam, enquanto em anos La Niña, a frequência de ventos SO é maior do que a observada regularmente.

Até então, ao longo de toda a costa brasileira bem como no litoral do RS, havia um déficit de séries temporais longas de dados observacionais de ondas, correntes e nível do mar, e também falhas na distribuição geográfica desse tipo de amostragem (COSTA e MÖLLER, 2011). Infelizmente, séries temporais longas de dados são casos raros na costa brasileira e comum o aproveitamento de pequenos intervalos de monitoramentos e extrapolar os resultados para utilização em casos específicos (STRAUCH et al., 2009).

Tanto a variabilidade das correntes costeiras nas escalas temporais diurnas,

sinóticas, sazonais e interanuais, quanto as principais forçantes causadoras desses movimentos, também não são bem compreendidas (ZAVIALOV et al., 2002). Além disso, a variabilidade do nível médio do mar, tanto na frequência mareal quanto na sub-mareal, também carecia de estudos (VALENTIM et al., 2013).

O primeiro estudo sobre correntes costeiras na plataforma continental do RS remonta à década de 1970, e foi descrito em Figueiredo (1980). Esse trabalho pioneiro consistiu em dois fundeios de curta duração, de 36 horas cada, onde foi observada a influência da passagem de um sistema atmosférico na hidrodinâmica local. Podem-se citar ainda os trabalhos mais recentes de Zavialov et al. (2002), Strauch et al. (2009) e Costa e Möller (2011), que apresentaram análises de dados resultantes de fundeios oceanográficos ao longo do litoral. Os trabalhos mencionados reportaram uma circulação em águas rasas gerada pelo vento, observando a passagem de sistemas meteorológicos. Também foram verificados fluxos de baixas frequências predominantemente barotrópicos, com correntes residuais para Nordeste ou Sudoeste, dependendo da estação do ano.

Outro processo oceanográfico identificado na costa do estado do RS é a chamada ressurgência e subsidência costeira. Esse fenômeno foi sugerido inicialmente no trabalho de Calliari e Fachin (1993), através de observações realizadas em um curto fundeio. Recentemente, estes fenômenos também foram identificados em fundeios de PACD e descritos brevemente em Costa (2009).

A maré astronômica é mista com predominância semi-diurna e classificada como um regime de micromaré (ALMEIDA *et al.*, 1997). Essa pequena amplitude de maré ocorre devido à proximidade com um ponto anfidrômico no Atlântico Sul e também pela configuração retilínea da linha de costa, sem irregularidades que poderiam amplificar, por efeitos de ressonância ou convergência, as amplitudes das marés (VILLWOCK e TOMAZELLI, 1995).

No entanto, quando as amplitudes máximas geradas por forçantes meteorológicas e astronômicas são somadas, valores bem acima do nível médio do mar são registrados, sem levar em conta os efeitos de *run-up* gerados pelas ondas. Em uma região mais ao sul, Praia do Cassino, sobre elevações de 1,9 m relacionadas à forçantes meteorológicas já foram medidas (PARISE et al., 2009). Durante eventos de frentes frias, mais comuns durante os meses de inverno, os

ventos fortes de SO, com velocidades médias de 8 m/s, resultam em níveis do mar mais altos na costa (SIEGLE e CALLIARI, 2008). Consequentemente, o transporte e a deposição dos sedimentos ao longo da costa são primariamente dominados pela ação das ondas (DILLENBURG et al., 2004).

O primeiro estudo realizado com aquisição de parâmetros de ondas na região norte do litoral do RS foi executado pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) e descrito em Wainer (1963). Os dados foram adquiridos com um ondógrafo modelo "*Houlographe*", o qual registra apenas a altura e o período das ondas. A direção das ondas foi realizada por observações visuais em uma plataforma erguida na praia de Tramandaí. Dois registros diários foram programados com duração de 15 minutos no ano de 1962 e de 12 minutos no ano de 1963. A profundidade do fundeio foi de 18 m. Segundo Motta (1964), que analisou os dados adquiridos nesses fundeios, as ondas incidentes nesse litoral têm duas direções predominantes, NE e SE. Cabe ressaltar que as ondas de SE têm maior período, altura e energia e, conseqüentemente, maior capacidade de transporte de sedimentos.

Estudos mais recentes corroboraram as conclusões dos citados estudos da década de 1960 (STRAUCH et al., 2009; ALMEIDA et al., 1999). As ondulações incidentes sobre a costa do litoral norte do RS são geradas no sul do Oceano Atlântico, em torno dos 60° de latitude; e as vagas, provenientes de NE, são geradas pelo vento local predominante no verão e primavera. Exceto pela passagem de sistemas meteorológicos, a agitação marítima é caracterizada por ondas de média a elevada energia, com altura significativa de 1,5 m e período entre 7 e 9 s (STRAUCH et al., 2009).

A profundidade de fechamento de 7,5 m foi calculada com base em dois conjuntos de dados de ondas coletados nos anos de 1963 e 1996 no litoral norte do estado (ALMEIDA et al., 1999). Motta et al. (2009) analisaram dados de ondas adquiridos, entre 2006 e 2007, por um ondógrafo WaveRider Datawell, fundeado a 17 m ao largo de Tramandaí. Nesse trabalho foi identificada, além da bidirecionalidade das direções de incidência das ondas, uma sazonalidade da deriva litorânea de sedimentos associada a uma sazonalidade do ângulo de incidência das ondas, calculada utilizando modelos numéricos.

Como exemplo de magnitude do volume de sedimentos transportados pela corrente de deriva litorânea, Motta et al. (2009) encontraram valores na ordem de milhões de m³. Durante o ano estudado foi encontrado um transporte de aproximadamente 1.500.000 m³ para NE, e de 740.000 m³ para SO, assim causando uma resultante para NE de 800.000 m³. Ainda quanto ao transporte de sedimentos, para a mesma região, outro estudo (MA, 2012), utilizando resultados obtidos através de modelos de ondas, encontrou valores de cerca de 320.000 m³, também para NE, para o ano de 2009. Estes resultados distintos podem estar relacionados a variabilidades interanuais ou até mesmo às metodologias utilizadas em cada trabalho.

Na costa do RS, ao longo das últimas seis décadas, diversos estudos foram realizados sobre as correntes litorâneas e o transporte de sedimentos, os principais são: Motta (1964) e (1967); Pitombeira (1975); Tomazelli & Villwock (1992); Toldo et al. (1993); Nicolodi et al. (2000) Lima et al. (2001); Lélis (2003); Toldo et al. (2003); D'Aquino (2004); Fontoura (2004); Toldo et al. (2006a); Jung et al. (2011) e (2012); Motta et al. (2015); Silva et al. (2017); Schossler et al. (2017); Sprovieri et al. (2018). Estes trabalhos utilizaram diversas metodologias, desde as mais empíricas com o emprego de derivadores e cronômetros, até as mais sofisticadas com o uso de instrumentação oceanográfica e modelagem numérica computacional.

1.1. QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

Estudos relacionados à dinâmica dos ambientes costeiros são importantes principalmente pela crescente ocupação e influência antrópica nestas regiões. Obras de engenharia costeira; lançamento de efluentes; transporte de mercadorias; pesca e atividades de lazer constituem as principais intervenções humanas no litoral. Nesse contexto, estudos detalhados sobre a circulação por correntes na plataforma continental interna e na zona de surfe, como também do nível do mar, são de extrema necessidade.

Através da revisão bibliográfica foi constatado que, ao longo de toda a costa brasileira, bem como no litoral do RS, há um déficit de séries temporais longas de dados observacionais de ondas, correntes e nível do mar, e também há falhas na distribuição geográfica deste tipo de amostragem. Esse fato impossibilita o entendimento dos processos relacionados à variabilidade das correntes costeiras

nas diversas escalas temporais que ocorrem, e também, das principais forçantes causadoras desses movimentos.

Apesar dos trabalhos publicados sobre a circulação por correntes na costa do RS, os fenômenos da ressurgência e subsidência costeira em regiões muito próximas à costa, ainda são pouco compreendidos. Ademais, a costa do RS é um local chave para o entendimento das correntes costeiras induzidas pelo vento.

A MA (maré astronômica) na costa do RS é definida em diversos trabalhos como de pequena amplitude sendo recorrente o uso dos seguintes termos: “surpreendentemente pequena” (MELO, 2017); “marés de pequena amplitude” (ROCHA et al., 2015); “influência mínima” (SIEGLE e CALLIARI, 2008) “menor importância” (MÖLLER, 2007); “variação pequena de maré completamente sobreposta por fenômenos meteorológicos” (ALMEIDA et al., 1997). Por esse motivo, muitas vezes a MA não foi considerada, por exemplo, em estudos de circulação por correntes, dinâmica de sedimentos e transporte de propriedades químicas e biológicas.

No entanto, os estudos citados e muitos outros (JUNG e TOLDO, 2011, DA MOTTA et al., 2015; VIANNA e CALLIARI, 2015; SILVA et al., 2017) usaram a amplitude média da MA e a compararam a valores máximos atingidos pela MM. Todavia, essa comparação não é apropriada cientificamente e pode causar uma interpretação errada dos resultados. Como, por exemplo, na aplicação desses valores para o cálculo do prisma de maré, pois se trata de uma importante componente para o equilíbrio hidrodinâmico e ecológico das lagunas costeiras do litoral norte do RS.

Pergunta-se: as marés astronômicas podem ser totalmente negligenciadas nos estudos nessa região? Além do fato de que, até o momento, os poucos dados observacionais não permitiam determinar as reais forças que impulsionam as oscilações de NM nessa costa.

Diante do levantamento bibliográfico sobre as correntes no interior da zona de surfe, concluiu-se, principalmente, que nenhum estudo buscou explicar o processo dinâmico que causa a deriva litorânea. Também ficou explícita a falta de metodologia moderna para observar de forma quantitativa tais processos. Além disso, divergências nos resultados com relação à direção da corrente longitudinal,

sobretudo nos primeiros trabalhos desenvolvidos geram incertezas.

Ainda, mesmo para os trabalhos mais recentes, surgem alguns questionamentos: podem às técnicas utilizadas ou os períodos analisados terem gerado resultados e conclusões equivocadas? As ações antrópicas regionais e as mudanças climáticas globais podem estar alterando os padrões ondulatórios e por consequência a magnitude e direção das correntes longitudinais?

1.2. OBJETIVOS

O **objetivo geral** é identificar e quantificar os processos físicos associados à circulação por correntes, oscilações do nível do mar e ondas de gravidade de superfície, através da relação com as forçantes geradoras. Com isso, desenvolver um modelo conceitual da hidrodinâmica para o litoral norte do estado do RS, por meio dos seguintes **objetivos específicos**:

- Identificar as forçantes geradoras das correntes na região da plataforma continental interna;
- Comprovar a existência de processos de ressurgência e subsidência costeira em regiões muito próximas à costa;
- Quantificar os efeitos das oscilações no nível do mar causados pelas forçantes de altas (mareal) e baixas frequências (submareal);
- Identificar o processo de interação do regime de ondas incidentes à circulação por correntes na zona de surfe;
- Determinar o fluxo de energia ao longo da zona de surfe induzido pela incidência de ondas oblíquas;
- Identificar a influência do vento no escoamento da corrente longitudinal;
- Desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de medição de velocidades de correntes na zona de surfe.

1.3. HIPÓTESES DO ESTUDO

A partir do atual conhecimento disponível sobre o comportamento hidrodinâmico na região em estudo, as seguintes hipóteses foram relacionadas no plano de desenvolvimento desta tese:

- ✓ A influência do vento longitudinal à costa sobre as correntes costeiras na plataforma interna pode induzir processos de ressurgência e subsidência costeira;
- ✓ As oscilações do nível do mar, causadas pela maré astronômica, apresentam amplitudes tão reduzidas em relação às causadas pela influência do vento, a ponto de poderem ser desconsideradas como variável nos estudos hidrodinâmicos costeiros do litoral norte do RS;
- ✓ As oscilações do nível do mar nas frequências mareal e submareal são independentes na causa dos eventos extremos sobre o litoral;
- ✓ O acoplamento entre as ondas incidentes e as correntes longitudinais é causa e efeito de relação direta e instantânea;
- ✓ A tensão de cisalhamento do vento influencia o comportamento do escoamento das correntes longitudinais.

1.4. MATERIAL E MÉTODOS

Este subcapítulo traz as informações sobre os equipamentos e as técnicas de medição utilizadas, que não foram descritas nos artigos científicos com o detalhamento que será abordado aqui.

Faz-se necessária uma explicação sobre a escolha da área de estudo. A praia de Tramandaí foi escolhida, pois apresenta facilidades logísticas aos estudos oceanográficos (Figura 2), dentre elas pode-se citar:

1. Empresas de arrendamento de embarcações e empresas de mergulho;
2. A embocadura da Lagoa de Tramandaí, que possui um pequeno canal de navegação e de ligação ao oceano;
3. Antigo local de fundeio de um ondógrafo WaveRider Datawell;
4. Uma Plataforma de Pesca em formato de “T”, construída perpendicularmente à praia que possui 365 m de comprimento, 8 m de largura e está a aproximadamente 8 m acima nível médio do mar;
5. Estação meteorológica mantida pelo INMET;
6. Localização do fundeio do AWAC (esta tese).

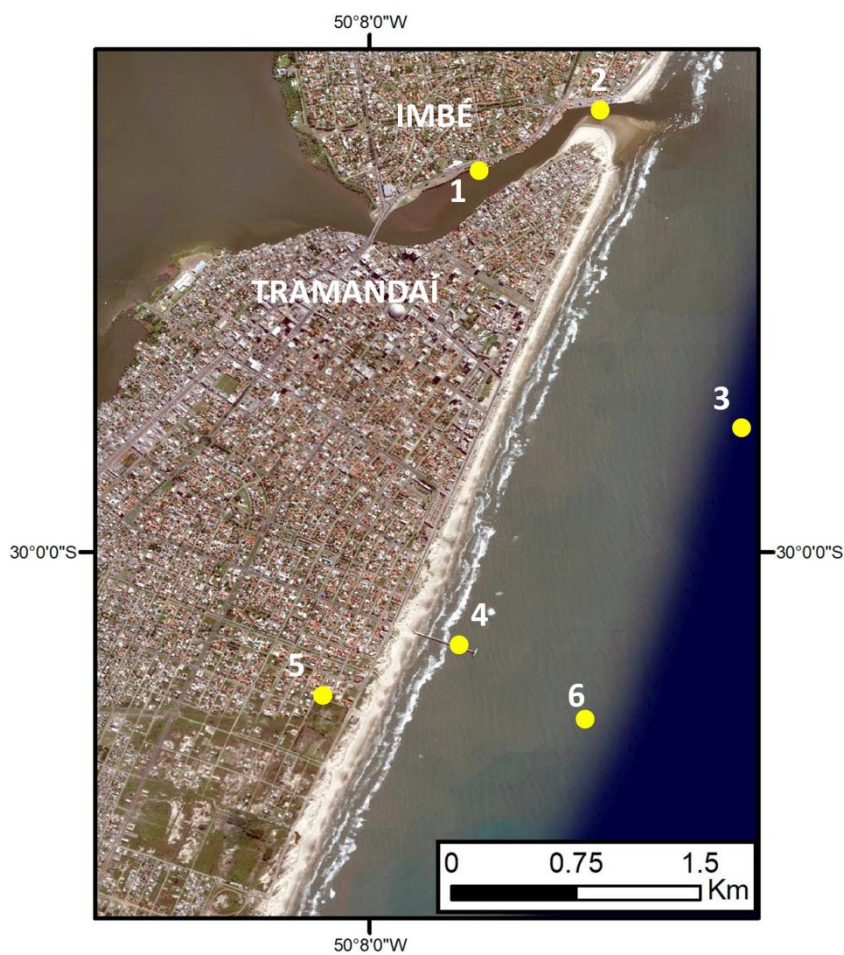


Figura 2. Localização da infraestrutura existente e instalada durante o desenvolvimento do Projeto Ciências do Mar I e II - CAPES, na praia de Tramandaí.

1.4.1. Fundeios oceanográficos

O principal banco de dados utilizado no desenvolvimento desta tese foi coletado em 05 fundeios oceanográficos distribuídos ao longo do tempo entre 17 de dezembro de 2013 e 08 de setembro de 2017. Em cada um deles, foi utilizado o mesmo equipamento, um Perfilador Acústico de Ondas e Correntes, modelo AWAC, da marca Nortek, com frequência de 1 MHz (Figura 3). Além de amostrar todos os parâmetros de ondas e velocidade e direção das correntes em toda a coluna d'água, também amostrou dados de pressão (nível do mar) e de temperatura da água.



Figura 3. Fotografia do perfilador acústico de ondas e correntes (AWAC) na popa do barco Sea Green.

Nos dois primeiros fundeios o equipamento foi instalado a 12 m de profundidade; nos três últimos, a 14 m. A distância entre os dois pontos não foi maior que 400 m. As configurações amostrais variaram entre os fundeios, mas sempre respeitaram os padrões de qualidade estabelecidos para aquisição de dados confiáveis. As datas de início e fim, as configurações amostrais e fonte de energia utilizada em cada um dos fundeios são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Datas de início e fim, as configurações amostrais e fonte de energia (modo) utilizada em cada um dos fundeios.

Fundeiio	Data início	Data fim	Corrente	Ondas	Modo
			Média/frequência amostral (seg.)	Média/frequência amostral (seg.)/taxa (Hz)	
01	17/12/2013	13/03/2014	60/600	512/600/2	Bateria
02	24/06/2014	27/04/2015	120/3600	1200/10800/1	Bateria
03a	27/04/2015	22/05/2015	180/3600	2048/3600/1	Cabo
03b	22/05/2015	30/07/2015	180/3600	2048/3600/1	Bateria
04	19/01/2016	21/06/2016	180/3600	2048/10800/1	Bateria
05	06/05/2017	08/09/2017	180/3600	2048/10800/1	Bateria

O equipamento AWAC, que possui 4 transdutores acústicos, é montado em uma estrutura fixa no fundo do mar e mede diretamente os parâmetros ondulatórios:

altura, período e direção; para ondas longas, ondas de tempestade, ondas curtas ou ondas geradas pelo deslocamento de embarcações. Valendo-se de princípios de acústica, um pulso é transmitido verticalmente em direção à interface água-atmosfera, e a defasagem de tempo entre a transmissão e a recepção da reflexão de superfície é medida e usada para gerar uma série temporal de elevação da superfície. O sistema é capaz de medir ondas com períodos entre 1 e 100 s (NORTEK, 2013).

O AWAC mede altura e período de ondas utilizando o sistema AST, sigla em inglês para Rastreamento Acústico de Superfície (*Acoustic Surface Tracking*). Além disso, o AST permite derivar parâmetros de ondas baseado em análises de séries temporais por ele geradas. Isto significa que o AWAC pode medir diretamente os parâmetros de onda, tais como: altura máxima, altura significativa e período médio. A direção das ondas é calculada combinando o AST com medições (com os outros três transdutores) da velocidade orbital das partículas próximas à superfície. Os dados dos quatro pontos matriciais podem ser processados com um método de probabilidade máxima para gerar espectros de ondas direcionais (NORTEK, 2013).

Além desses parâmetros, esse equipamento mede o perfil vertical de velocidades e direção de correntes em toda a coluna de água. Tal perfil é dividido em células, com tamanhos entre 0,25 e 4,0 m, e possui um alcance máximo de perfilagem de 30 m, com precisão de 1% do valor medido. Também é medido o nível do mar através de um sensor de pressão.

1.4.2. Medições de correntes na zona de surfe

Um segundo banco de dados utilizado no presente trabalho foi adquirido em 06 campanhas de campo durante o mesmo período dos fundeios. As campanhas de medição de velocidade e direção de correntes da corrente longitudinal foram realizadas durante vários anos, e em distintas estações do ano, a fim de amostrar diferentes cenários de ondas e correntes, morfologia do sistema praiado e de condições meteorológicas (Tabela 2).

Tabela 2. Datas de início e fim das campanhas de medição de velocidades de correntes no interior da zona de surfe.

Campanha	Data inicio	Data fim	Estação do ano
01	05/12/2014	06/12/2014	Primavera
02	12/05/2015	13/05/2015	Outono
03	28/01/2016	---	Verão
04	05/05/2016	06/05/2016	Outono
05	19/09/2017	24/09/2017	Inverno e Primavera
06	14/10/2017	16/10/2017	Primavera

Os dados de velocidade e direção das correntes foram coletados com um PACD, modelo Aquadopp (Figura 3), da marca Nortek, com frequência de 1 MHz e cabeça do tipo “right angle”.



Figura 4. Perfilador acústico de correntes por Doppler (Aquadopp) com o lastro (branco) utilizado para o lançamento a partir da Plataforma de Pesca.

Este equipamento foi lançado a partir da Plataforma de Pesca de Tramandaí, distante 1,5 km do local do fundeio do AWAC (Figura 1). O Aquadopp é posicionado na região entre os bancos, ou seja, no canal paralelo à linha de praia na zona de surfe. Cabe ressaltar que as medições foram realizadas com o perfilador

posicionado no fundo com os transdutores acústicos voltados para superfície d'água.

A localização do canal entre os bancos é definida por uma batimetria com fio de prumo, realizada em cada campanha. Como as medições são realizadas desde a linha de praia até o final da Plataforma de Pesca, um perfil topográfico da zona de surfe é gerado. Um sistema de GPS é utilizado para obter as coordenadas planimétricas e os dados batimétricos (profundidade) são salvos em uma tabela.



Figura 5. Vista aérea da Plataforma de Pesca de Tramandaí. Fonte: www.obaoba.com.br.

As medições de correntes no canal são feitas no mesmo instante da medição de ondas pelo AWAC fundeado, ou seja, a cada 3 h durante os períodos diurnos, em campanhas com duração de 1 a 4 dias. Convencionou-se usar um período de aquisição de velocidades de correntes de 10 a 20 min.

O Aquadopp emite ondas acústicas de frequência conhecida que viajam pela coluna de água em direção ao fundo ou à superfície, dependendo da orientação do equipamento. Conforme o som é refletido pelas partículas em suspensão na água, como: sedimento, bolhas de ar, zooplâncton e fitoplâncton, parte da energia retorna aos transdutores. Assim, através do efeito Doppler, calcula a velocidade das partículas, a qual se assume serem iguais às da água (GAMARO, 2012).

Medindo o tempo entre a transmissão e o recebimento do pulso, o Aquadopp determina a velocidade da água em diferentes distâncias a partir do transdutor. Assim, é constituído um perfil vertical de velocidades dividido em células, no qual cada célula representa a média do sinal de retorno para um dado período. Cabe

ressaltar que este equipamento possui três transdutores e cada um deles é responsável pela medição em uma dimensão (X, Y e Z) (NORTEK, 2013).

1.4.3. Medições de parâmetros meteorológicos

Os dados de direção e intensidade do vento e pressão atmosférica utilizados neste trabalho foram amostrados por uma estação meteorológica automática da marca Vaisala, modelo MAWS 301, instalada e mantida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estação está localizada a pouco mais de 2 km do local de fundeio, em uma área livre de obstáculos, com sensores posicionados a 10 m de altitude em relação ao terreno. Os dados de vento são amostrados a cada minuto e integralizados para um período horário.

1.4.4. Análises primárias dos dados

O primeiro passo no processamento dos dados obtidos pelo AWAC e pelo Aquadopp consiste na avaliação da qualidade dos dados no programa Storm, adquirido junto à fabricante Nortek. Nessa etapa, foi verificada a inclinação dos sensores em relação ao fundo, a declinação magnética foi inserida para a correção da orientação dos dados de direção; foi conferida a relação entre o sinal acústico e o ruído (*signal to noise ratio*) e foram excluídos os dados acima da interface entre o ar e a água. Nessa etapa, os dados foram convertidos em planilhas.

Os parâmetros de ondas: altura, direção e período, em formato de texto gerados no programa Storm, foram importados para programas matemáticos para serem processados. Nessa etapa foi verificada a consistência dos dados, são eliminados erros ("*spikes*") e foram selecionados os períodos concomitantes com as medições da corrente longitudinal no canal.

Os arquivos de velocidade e direção de correntes registrados pelo Aquadopp também foram importados para um ambiente de programação matemática. Os arquivos de texto foram conferidos em busca de dados espúrios e foram eliminados os dados coletados quando o equipamento esteve com inclinação superior a 20°. Pois, dados coletados com grande inclinação não são passíveis de correção (NORTEK, 2013).

Nessa etapa, o sistema de referência dos dados foi orientado em relação ao alinhamento da costa. Os dados de vento e de velocidades de correntes foram

rotacionados a 20° em relação ao Norte Verdadeiro, obedecendo à orientação da isóbata de 12 metros e também foram decompostos em componentes longitudinal e transversal à costa, seguindo a metodologia descrita em Miranda et al. (2001).

O clima de ondas, ou seja, os padrões estatísticos dos principais parâmetros de ondas (altura, período, direção de propagação e energia do espectro) foram estabelecidos a fim de determinar as condições de mar predominantes no litoral norte gaúcho. Para isso, foram selecionadas as séries temporais de: altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção média (D_m) e geradas distribuições de frequência.

Com os dados adquiridos pelo Aquadopp, foi realizada a determinação da intensidade da velocidade da corrente longitudinal através da média dos perfis verticais. Assim, foi obtido o perfil médio e também um valor de velocidade média para cada registro. As direções da velocidade da corrente foram obtidas calculando a moda das direções. Esses procedimentos foram seguidos, porque as correntes na zona de surfe apresentam enorme variabilidade, tanto nas intensidades quanto nas direções, as correntes se desenvolvem em “pulsos”. Cabe ressaltar que as variações na direção da corrente são de no máximo 50°, não ocorrendo sentidos opostos dentro de uma medição.

1.5. SOBRE A ESTRUTURA DESTA TESE:

Esta Tese de Doutorado está de acordo com a Norma 103 (03/2012) do Programa de Pós-graduação em Geociências (PPGGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Assim está estruturada em torno de artigos publicados ou submetidos a periódicos. Consequentemente, sua organização compreende as seguintes seções:

Capítulo 1 – Introdução sobre os temas da tese e o estado da arte dos processos investigados na pesquisa. Descrição dos objetivos, das justificativas, das hipóteses e dos materiais e métodos utilizados.

Capítulo 2 – Apresenta o artigo intitulado “*Variabilidade das correntes na plataforma interna ao largo de Tramandaí, RS durante o verão de 2014*”, publicado no periódico Pesquisas em Geociências, vol. 43 (3), no ano de 2016.

Capítulo 3 – Apresenta o artigo intitulado “*Tidal and subtidal oscillations in a shallow water system in southern Brazil*”, publicado no Brazilian Journal Of Oceanography, vol. 66(3), no ano de 2018.

Capítulo 4 – Apresenta o artigo intitulado “*Circulation in the shallow waters from the northern coast of Rio Grande do Sul, Brazil, a wave-dominated system*”, enviado para publicação no periódico *Ocean Dynamics* em dezembro de 2018.

Capítulo 5 – Aborda os temas dos capítulos anteriores, em uma conclusão na forma de um texto integrador dos assuntos da tese.

As referências bibliográficas citadas nos capítulos 1 e 5 se encontram após o Capítulo 5. As referências bibliográficas citadas nos artigos são apresentadas ao final de cada um dos mesmos.

CAPÍTULO 2

VARIABILIDADE DAS CORRENTES NA PLATAFORMA INTERNA AO LARGO DE TRAMANDAÍ, RS DURANTE O VERÃO DE 2014

Variabilidade das correntes na plataforma interna ao largo de Tramandaí, RS durante o verão de 2014

Mauro M. ANDRADE, Elírio E. TOLDO Jr. & José C. NUNES

Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: mauromichelena@gmail.com, toldo@ufrgs.br, jose.nunes@ufrgs.br.

Recebido em 03/2015. Aceito para publicação em 07/2016.
Versão online publicada em 26/08/2016 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - Os fenômenos da ressurgência e subsidência costeira em regiões com pequenas profundidades ainda são pouco compreendidos no litoral brasileiro. O presente trabalho visa obter um melhor entendimento das condições oceanográficas em águas rasas, tais como as forçantes das correntes costeiras e das oscilações do nível do mar. Um perfilador acústico de ondas e correntes, AWAC, da marca Nortek, foi fundeado a 11 m de profundidade ao largo da praia de Tramandaí, programado para registrar uma série contínua de dados de ondas e correntes, com início em 17 de dezembro de 2013 e término em 13 de março de 2014 (período do verão). Os resultados indicaram que a circulação tem inversões de curto período no sentido das correntes, ora para S, ora para N. Também foi possível verificar velocidades máximas de 0,6 e 0,9 m.s⁻¹ no fundo e em superfície, respectivamente. Ademais, um fluxo resultante para S, de aproximadamente 0,018 m.s⁻¹ foi calculado com base no perfil médio da coluna de água. Além disso, foram encontrados indicativos de ressurgência e subsidência costeira, através das análises da direção do vento e das correntes, das variações na temperatura da água e também do nível médio do mar.

Palavras-chave: Correntes costeiras, ressurgência costeira, subsidência costeira, perfilador acústico de ondas e correntes.

Abstract -Variability of currents on the inner shelf of Tramandaí, RS during the summer of 2014. Upwelling and Downwelling events in very shallow water still are poorly understood on Brazilian coastal. This work aims to obtain a better understanding of ocean circulation in shallow waters, such as coastal currents and sea level oscillations. An acoustic waves and currents profiler, AWAC, Nortek brand, was anchored at 11 m depth off Tramandaí beach, which was programmed to record a continuous series of waves and currents data, beginning on December 17, 2013 and ending on March 13, 2014 (summer). The results indicated that in the inner shelf the direction of the currents for short periods reverses, sometimes Southward, sometimes Northward. Also, it was observed the maximum velocities of 0.6 and 0.9 m.s⁻¹ on the bottom and on the surface, respectively. In addition, a flow rate of 0.018 m.s⁻¹ to S was calculated based on the average profile of the water column. Furthermore, were found indicative of upwelling and downwelling circulation patterns, from wind and current direction analysis as well, variations in water temperature and also in average sea level.

Key words: Coastal currents, upwelling, downwelling, acoustic wave and current profiler.

1. Introdução

Em todo o planeta grandes centros urbanos se desenvolveram nas proximidades das zonas costeiras, principalmente devido à possibilidade de instalação de portos, a abundante fonte de recursos naturais, como por exemplo, o pescado, e também às atividades ligadas ao lazer. No Brasil, 23% da população residem em zonas costeiras, sendo que a densidade demográfica desta região é 5 vezes maior do que a média nacional (Nakano, 2006).

Neste contexto, o estudo da porção mais próxima à costa da plataforma continental torna-se muito importante, uma vez que aspectos relacionados à segurança da navegação, à dinâmica dos sedimentos, à disponibilidade de nutrientes, à vida dos organismos planctônicos na zona eufótica e à contaminação das águas marinhas pelos poluentes devem ser conhecidos. Além disso, problemas relacionados diretamente às forçantes hidrodinâmicas, reforçam a necessidade do conhecimento não somente dos efeitos, mas também das causas e da variabilidade espaço-temporal das correntes cos-

teiras.

Ao longo de toda a costa brasileira bem como no litoral do Rio Grande do Sul (RS), há um déficit de séries temporais longas de dados observacionais de ondas, correntes e nível do mar, e também há falhas na distribuição geográfica deste tipo de amostragem (Costa e Möller, 2011). Tanto quanto, a variabilidade das correntes costeiras nas escalas temporais interanuais, sazonais, sinóticas e diurnas como, as principais forçantes causadoras desses movimentos, ainda não são bem compreendidas (Zavialov *et al.*, 2002).

O primeiro estudo sobre correntes costeiras remonta à década de 1970, e foi descrito em Figueiredo Jr. (1980). Este trabalho pioneiro consistiu em dois fundeios de curta duração, de 36 horas cada, onde foi observada a influência da passagem de um sistema atmosférico na hidrodinâmica local.

Pode-se citar ainda os trabalhos mais recentes de Zavialov *et al.* (2002), Strauch *et al.* (2009) e Costa & Möller (2011), os quais apresentaram análises de dados resultantes de campanhas oceanográficas ao longo do litoral. Os trabalhos mencionados reportaram uma circulação em águas rasas dirigidas pelo vento, observando a passagem de sistemas meteorológicos. Também foram verificados fluxos de baixas frequências predominantemente barotrópicos, com correntes residuais para Nordeste ou Sudoeste, dependendo da estação do ano.

Outro comportamento oceanográfico identificado na costa do RS, mas ainda pouco compreendido, é a chamada ressurgência e subsidência costeira. Esse fenômeno foi sugerido primeiramente no trabalho de Calliari & Fachin (1993), através de observações realizadas em um curto fundeio. Recentemente, este fenômeno também foi identificado em fundeios de ADCP e descrito brevemente em Costa (2009).

No que diz respeito à variabilidade do regime de vento, dominam ao longo do ano ventos do quadrante NE. Contudo, inversões periódicas na direção, para SO, são observadas durante a passagem de frentes meteorológicas, as quais são mais frequentes no outono e inverno. O campo de ventos também apresenta grande variabilidade interanual ligadas a eventos El Niño Oscilação Sul. Durante anos de El Niño, ventos de NE predominam, enquanto que em anos La Niña, a frequência de ventos SO é maior do que a observada regularmente (Barros *et al.*, 2002; Piola *et al.*, 2005).

A maré astronômica é mista com predominância semi-diurna, com amplitude média de 0,3 m (Almeida *et al.*, 1997), a qual é classificada como um regime de micromaré e por esse motivo considerada pouco importante na circulação. Essa

pequena amplitude de maré ocorre por causa da proximidade com um ponto anfidrômico no Atlântico Sul e também pela configuração retilínea da linha de costa, sem irregularidades que poderiam amplificar, por efeitos de ressonância ou convergência, as amplitudes das marés (Villwock & Tomazelli, 1995).

No entanto, as forçantes meteorológicas podem fazer com que o nível se eleve em até 1 m acima daqueles previstos para a maré astronômica (Almeida *et al.*, 1997). Em uma região mais ao sul do RS, Praia do Cassino, sobre elevações de 1,9 m relacionadas à forçantes meteorológicas foram medidas (Parise *et al.*, 2009). Durante eventos de passagens de frentes frias, mais comuns durante os meses de inverno, os ventos fortes de SO, com velocidades médias de 8 m.s^{-1} , resultam em níveis mais altos do mar. Deste modo, as grandes variações no nível do mar ocorrem devido à fatores meteorológicos como o vento e as variações na pressão atmosférica, e são os causadores das marés meteorológicas muito relevantes para o litoral do RS (Siegle & Calliari, 2008).

Apesar dos trabalhos publicados, citados acima, abordarem as questões da circulação por correntes na costa do RS, os fenômenos da ressurgência e subsidência costeira em regiões com pequenas profundidades (águas muito rasas) ainda são pouco compreendidos. Ademais, a costa do RS é um local chave para o entendimento das correntes costeiras induzidas pelo vento.

A fim de monitorar as condições oceanográficas, incluindo a medição das direções e velocidades das correntes, foi fundeado um perfilador acústico de ondas e correntes (AWAC/Nortek) à 11 m de profundidade na Praia de Tramandaí, RS. Os resultados encontrados mostram uma grande variabilidade na direção e na intensidade das correntes associada à forçante meteorológica. Também foram encontrados claros indicativos de ocorrência do transporte de Ekman em uma área de águas muito rasas.

2. Área, materiais e métodos

2.1 Área de estudo

A Plataforma Continental do RS localizada entre os paralelos 29°S e 34°S, se estende desde a margem continental até a isóbata de 180 m e possui na parte norte uma largura em torno de 110 km e ao sul, 170 km (Calliari *et al.*, 2009). A declividade do fundo, entre 0,03° e 0,08°, é considerada suave (Toldo Jr. *et al.*, 2006). Com orientação NE-SO, a extensa linha de costa do Estado, com apro-

ximadamente 620 km é retilínea, sem reentrâncias e caracteriza-se por uma faixa contínua de praias oceânicas arenosas com largura variando entre 50 e 100 metros e declividade entre 3 e 5 graus (Fachin, 1998).

A região em estudo localiza-se na plataforma interna no litoral norte do Estado, ao largo do município de Tramandaí (Fig. 1) e possui um ângulo regional de 37° de inclinação em relação ao Norte Verdadeiro. A praia de Tramandaí apresenta na maioria das vezes duas ou mais linhas de arrebenção, os bancos arenosos apresentam-se dispostos longitudinalmente à linha de praia (Ma, 2013). A praia de Imbé, vizinha à Tramandaí e localizada ao norte do canal da Lagoa de Tramandaí, foi caracterizada no trabalho de Toldo *et al.* (1993) através de aspectos morfodinâmicos como intermediária a dissipativa.

2.2 Materiais e métodos

Um perfilador acústico de ondas e correntes, modelo AWAC, da marca Nortek, com frequência de 1 MHz, foi fundeado a 2 km da costa e a 11 m de profundidade. Durante o período em que este equipamento esteve em funcionamento, de 17 de dezembro de 2013 a 13 de março de 2014, foram registrados dados de velocidade e direção de correntes do fundo a superfície, divididos em células de 0,5 m de espessura (total de 30 células), realizando uma média amostral de 60 s a cada 600 s. Cabe ressaltar que foi utilizada uma distância em branco (em inglês, *blanking distance*) de 0,4 m, e que as células que se encontravam fora da coluna d'água foram removidas através do programa *Storm* da fabricante Nortek. O AWAC também amostrou dados de nível do mar (pressão) e de

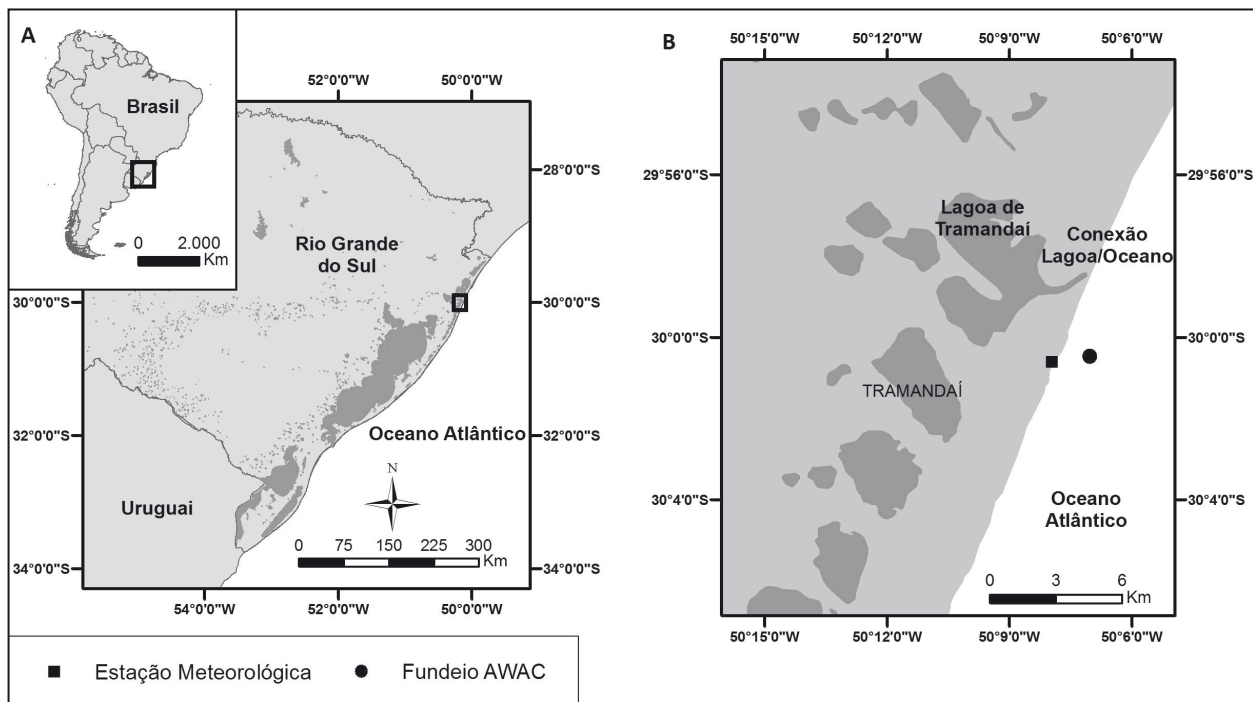


Figura 1. Área de estudo. A) Localização aproximada com destaque para o estado do Rio Grande do Sul; B) Plataforma Interna ao largo de Tramandaí. Círculo e quadrado pretos indicam o local do fundeio do AWAC e da Estação Meteorológica, respectivamente.

temperatura da água. Além destes, o equipamento registrou dados com os parâmetros das ondas, aqui não considerados visto este trabalho ter como objetivo apenas o estudo do padrão de correntes dessa região.

Uma estação meteorológica automática da marca Vaisala, modelo MAWS 301, instalada e mantida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), forneceu os dados de direção e intensidade do vento, utilizados neste trabalho. Esta estação está localizada a pouco mais de 2 km do local de fundeio, em uma área livre de obstáculos com

sensores posicionados a 10 m de altitude em relação ao terreno. Os dados de vento foram amostrados a cada minuto e integralizados para um período horário.

A fim de orientar o sistema de referência dos dados em relação ao alinhamento da costa, os dados de vento e de velocidades de correntes foram rotacionados em 20° em relação ao Norte Verdadeiro, seguindo a orientação da isóbata de 11 m. Estes também foram decompostos em componentes longitudinal e transversal à costa, seguindo a metodologia descrita em Miranda *et al.* (2002).

Com o objetivo de remover as oscilações de alta frequência, utilizou-se um filtro de passa baixas do tipo Lanczos-Cosseno (Thompson, 1983), que remove 95% das oscilações com frequências menores que 1/40 h. O resultado são as chamadas oscilações de baixas frequências.

As análises espectrais realizadas seguiram o método proposto por Welch (1967). No presente trabalho foi aplicada uma janela do tipo Hanning, com sobreposições de 50%, procedimento que resulta em uma estimativa de densidade espectral média, calculada a partir da estimativa de cinco segmentos. Através do uso do janelamento, perde-se resolução espectral; entretanto, aumenta-se a confiabilidade estatística da análise.

Correlações cruzadas foram realizadas para avaliar o quanto uma variável está diretamente relacionada a uma segunda variável. Dessa maneira obtiveram-se os coeficientes de correlação e a diferença de fase em horas para a maior correlação entre as variáveis. O coeficiente de correlação negativo representa uma relação inversa e valores positivos uma relação direta, sendo que os valores próximos a 1 e -1 representam a maior correlação. Valores próximos de zero não demonstram uma relação linear.

3. Resultados e discussão

Os valores máximos de velocidade de corrente medidos em superfície foram de aproximadamente $0,86 \text{ m.s}^{-1}$ no eixo longitudinal, e de $0,44 \text{ m.s}^{-1}$ no eixo transversal à costa. Já na camada próxima ao fundo, foram calculados valores de $0,61$ e $0,3 \text{ m.s}^{-1}$, para as componentes longitudinal e transversal à costa, respectivamente. Costa & Möller (2011) encontraram valores muito próximos a estes na mesma estação do ano, entretanto em uma região mais ao sul do litoral.

Na figura 2 são apresentadas as séries temporais filtradas do vento (Fig. 2A) e das velocidades de correntes (Fig. 2B e C), próximo à superfície (1 m) e ao fundo (10 m), para todo o período do fundeio. Inicialmente, pode-se observar em diversos momentos a mudança na direção da corrente causada pelo vento, ou seja, sob o domínio de ventos do quadrante N a componente longitudinal da corrente esteve orientada para S, e com vento de S a corrente fluiu para N. Ademais, pode-se observar que a magnitude da velocidade do vento é uma ordem de grandeza maior que dá corrente longitudinal. Fluxos em direção à costa ou para o mar aberto também foram observados na componente transversal da corrente (Fig. 2C), inclusive apresentando cisalhamento da corrente na coluna de água, ou

seja, um fluxo na camada de fundo em direção à costa e um fluxo de retorno na superfície em direção ao oceano. O inverso desse padrão de movimento, ou seja, um fluxo na superfície em direção à costa e no sentido contrário no fundo, também foi observado em diversos momentos.

Na figura 3 se observa o perfil vertical médio das velocidades da corrente para todo o período do fundeio. Nota-se um fluxo bidirecional na componente longitudinal (em preto), para S na metade superior da coluna d'água e para N na metade inferior. A média das velocidades do perfil para S é mais intensa. O padrão bidirecional (Fig. 3) pode ser interpretado pelo atrito da corrente com o fundo plano e suavemente inclinado para E (1:100), na região do fundeio. Na figura 2B, se nota que o padrão dos fluxos para N está em fase, ou seja, tanto as correntes de fundo como as de superfície apresentam o mesmo sentido e magnitude. Entretanto, o comportamento das correntes para S é distinto, com discordâncias na direção e intensidade entre as correntes de superfície e de fundo. No Hemisfério Sul as correntes para S são defletidas para a esquerda, gerando um fluxo em direção ao oceano pela superfície e outro em direção à costa pelo fundo, mas como a profundidade diminui em direção à costa, ocorre o efeito de rampa pelo aumento da resistência ao deslocamento dessa corrente de fundo, diminuindo assim sua intensidade e aumentando o giro em direção à costa, o que resulta em um perfil médio do fundeio com um padrão bidirecional.

A velocidade média do perfil foi de aproximadamente $-0,018 \text{ m.s}^{-1}$, demonstrando um padrão barotrópico com direção S nesta estação do ano. Costa & Möller (2011) calcularam uma velocidade média de aproximadamente $-0,06 \text{ m.s}^{-1}$, também dirigida para sul, para um período entre a primavera e o verão entre os anos de 2006 e 2007. O perfil médio das velocidades na componente transversal à costa (Fig. 3, em cinza) demonstrou um fluxo em direção ao oceano, nas camadas mais superficiais e outro oposto pelo fundo, em direção à costa. O fluxo residual integrado desta componente resultou em um valor muito pequeno de $0,002 \text{ m.s}^{-1}$, em direção ao oceano.

As oscilações do nível do mar e da temperatura da água em baixas frequências podem ser observadas na figura 4. Os registros de nível apresentaram uma variação considerável para o período em estudo, onde se pode verificar, entre o nível mais baixo e o mais alto, uma diferença total de aproximadamente 1,4 m. Foi observado, também, no início da série temporal o nível do mar aparentemente mais baixo, e que no final desta série o nível

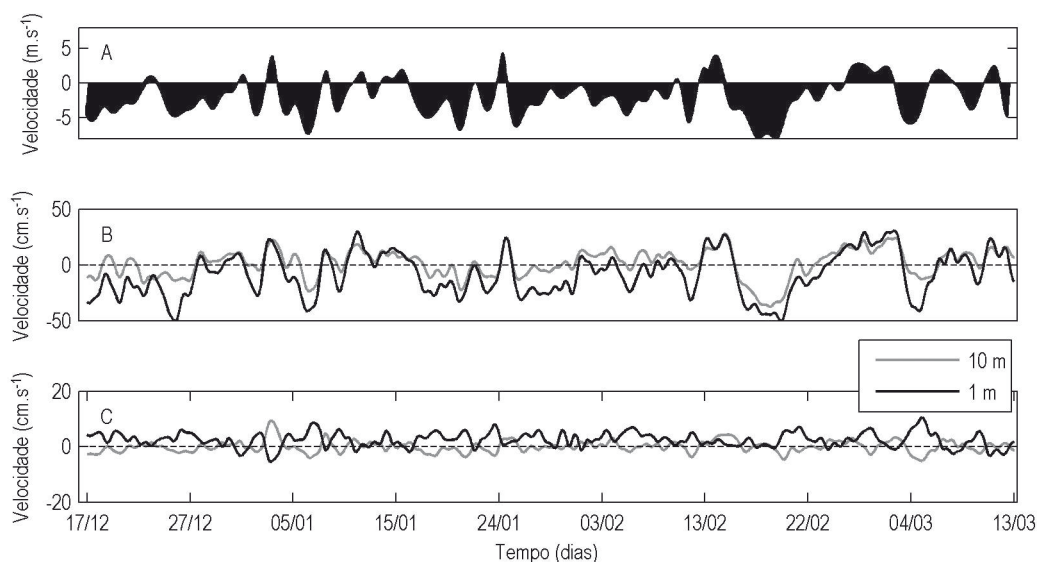


Figura 2. Séries temporais entre 17 de dezembro e 13 de março. A) Dados de vento, valores positivos indicam proveniência do quadrante S, e negativos do quadrante N; B) Componente longitudinal da corrente medidas a 1 m (preto) e a 10 m (cinza) de profundidade, os valores positivos indicam fluxos para N e negativos para S; C) Componente transversal da corrente, os valores positivos indicam fluxos em direção ao mar aberto, e negativos em direção à costa.

estava um pouco acima da média, isto pode ser explicado pela predominância de vento de NE no início da série e de vento de SO no final da série. Este mecanismo pode ser interpretado como maré meteorológica negativa e positiva, respectivamente. A série temporal de temperatura da água, a qual foi amostrada no fundo da coluna d'água, demonstra a variabilidade típica da região, com valores próximos a 19°C logo no início do verão, e da ordem de 24°C no tempo restante do período de aquisição dos dados.

3.1 Análises espectrais e correlações

As análises espectrais realizadas para os dados de corrente longitudinal em superfície e fundo resultaram em maiores energias em torno de 14 dias (Fig. 5A). Observa-se também maior energia ou variância na corrente longitudinal de superfície, quando comparada a de fundo.

As análises da corrente transversal à costa, tanto em superfície quanto no fundo, resultaram em um espectro de energia mais distribuído quando em comparação ao espectro da corrente longitudinal. Entretanto, ainda é verificado um pico de energia em torno de 14 dias e outro, com maior variância próximo de 6 dias (Fig. 5B). Também é possível verificar, na componente transversal da corrente de superfície (Fig. 5B, linha tracejada), um pouco de energia em torno de 24 h, o que pode estar associado à maré astronômica.

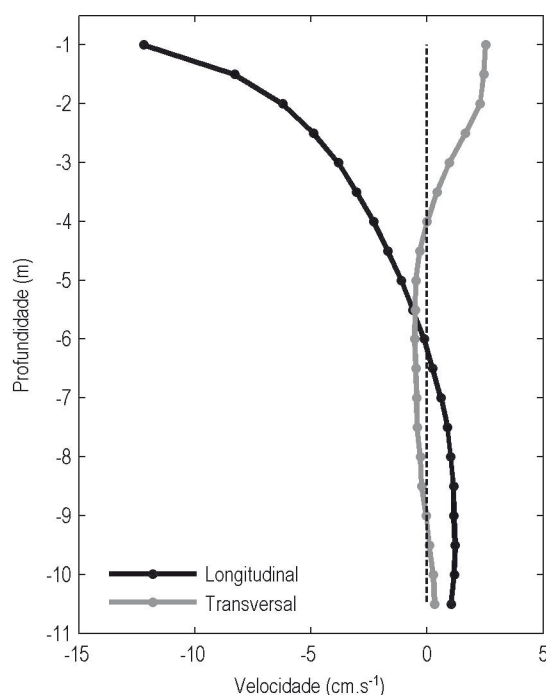


Figura 3. Perfil médio da velocidade da corrente: em preto os valores positivos indicam sentido para N e negativos para S; em cinza, valores positivos indicam correntes em direção ao oceano e negativos à costa.

Na análise espectral dos dados de vento nota-se maior energia em torno de 21 dias para o vento transversal à costa (Fig. 6). Já para o vento longitudinal é possível observar grande energia em torno de 14 dias. Para as duas componentes do vento também foi verificada grande variância na banda de 24 h.

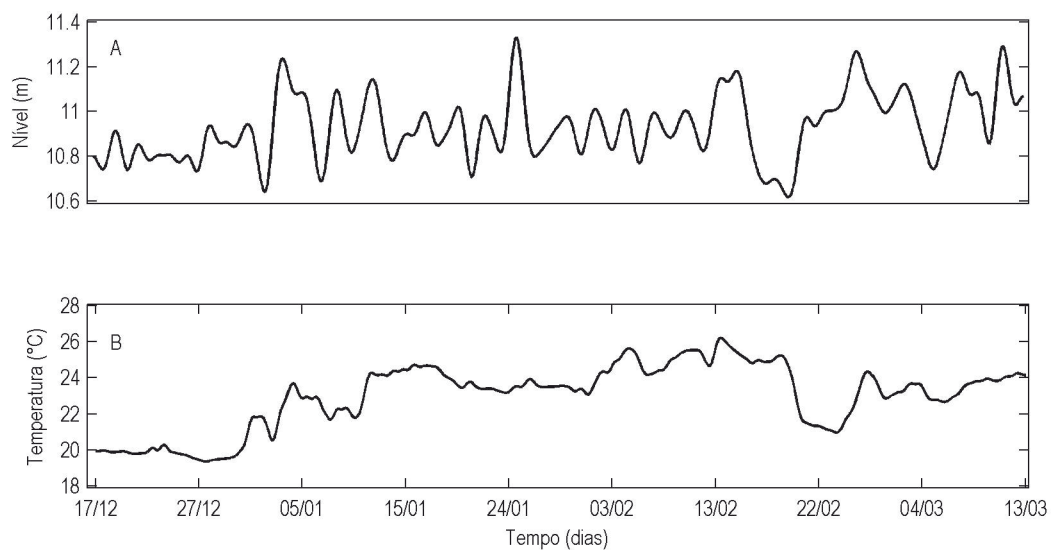


Figura 4. Parâmetros físicos da água adquiridos entre 17 de dezembro e 13 de março. A) Série temporal de nível d'água filtrada; B) Série temporal de temperatura da água.

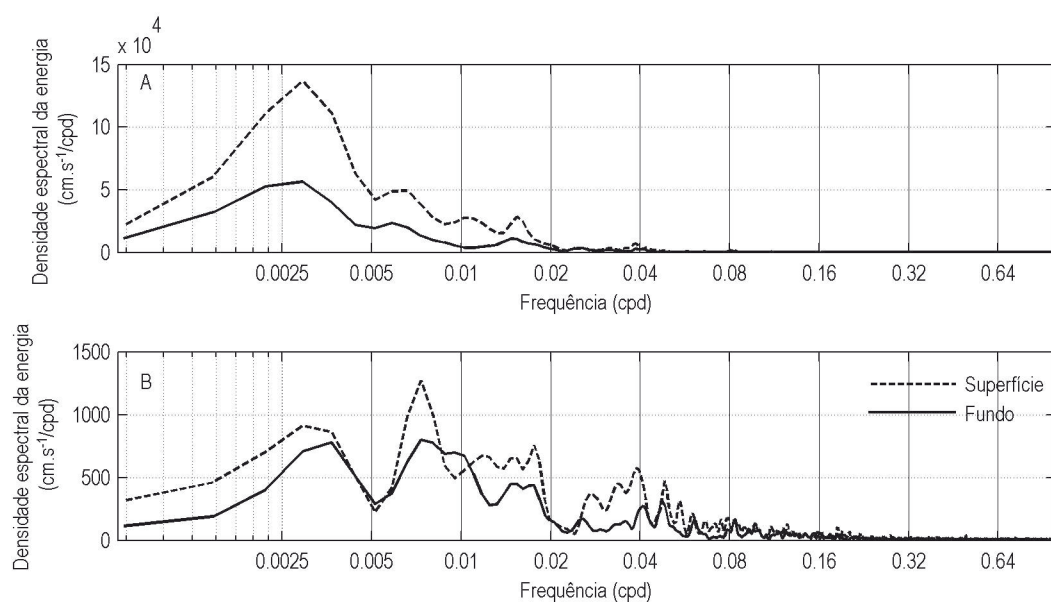


Figura 5. Estimativa de densidade espectral da corrente. A) Componente longitudinal da corrente; B) Componente transversal da corrente.

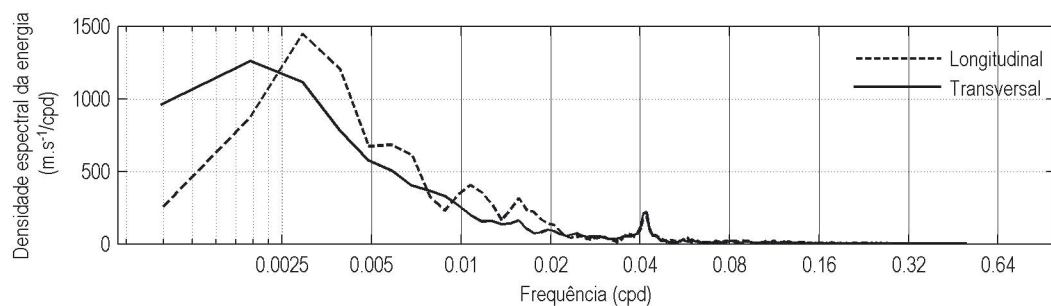


Figura 6. Estimativa de densidade espectral do vento.

Estes resultados demonstram que a maior variabilidade das séries temporais de velocidade da corrente e da velocidade do vento está associada às baixas frequências, indicando assim o vento como a principal forçante da hidrodinâmica local.

Os resultados das análises de correlação cruzada entre as componentes longitudinais do vento e da corrente (Fig. 7A), filtrados em 40 h, reforçam o encontrado nas análises espectrais, uma vez que foi calculado um coeficiente de correlação máximo na camada de superfície de 0,87, sem defasagem entre a atuação do vento e uma resposta da corrente. À medida que a profundidade aumenta a defasagem aumenta, sendo que a meia água a defasagem é de 1 h, e em fundo de 2 h. Os valores do coeficiente de correlação entre o vento e as camadas de meio e fundo, resultaram em 0,77 e 0,78, respectivamente.

A correlação entre o vento longitudinal e a corrente transversal (Fig. 7B) apresentou um valor de -0,54, com defasagem de 5 h, para a camada de superfície. Para a camada de fundo o coeficiente de correlação foi igual a 0,69, com 4 h de defasagem. A correlação negativa encontrada em superfície é explicada pelo transporte de Ekman, para o caso em estudo, valores negativos do vento (vento NE) forçam correntes em direção ao oceano (valores positivos). De maneira oposta, ventos do quadrante S (positivos), forçam um fluxo em direção à costa (valores negativos). Na camada de fundo, a correlação positiva também condiz com o transporte de Ekman, uma vez que, ventos de NE (negativos), promovem correntes em direção à costa (negativos), e ventos de SO (positivos), forçam fluxos em direção ao oceano (positivos).

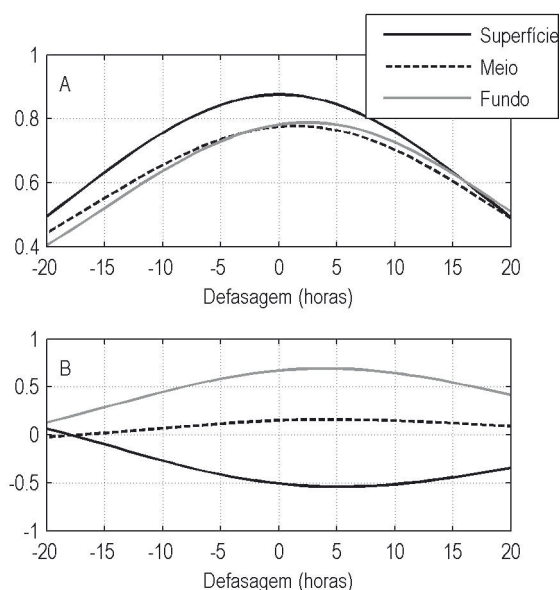


Figura 7. Correlação cruzada entre os dados. A) corrente e vento longitudinais; B) corrente transversal e vento longitudinal.

Estes resultados demonstram que o vento longitudinal se constitui na principal forçante da hidrodinâmica nesta zona de águas rasas, no período do verão. Este padrão também foi encontrado por Costa & Möller (2011), em uma região mais ao sul do litoral do RS. Entretanto, estes autores encontraram maior defasagem no efeito do vento na corrente, justificando esta defasagem à distância entre o local do fundeio do correntômetro e da estação meteorológica usada para a medição do vento.

Corroborando com os resultados acima apresentados, que demonstraram claramente os efeitos das baixas frequências como forçante principal da circulação nesta região, foi realizada a correlação cruzada entre a série temporal de nível e a componente longitudinal do vento (Fig. 8), a qual resultou em um coeficiente de correlação de 0,74, com defasagem de 8 h. Já na correlação entre o vento transversal e o nível, obteve-se um coeficiente de correlação igual a 0,47, com 27 h de defasagem. As correlações positivas encontradas são explicadas pelo transporte de Ekman, que para a região investigada ocorre da seguinte forma: ventos de N (negativos) rebaixam o nível na costa, e ventos de S (positivos) elevam o nível, o que no caso em estudo será chamado, de forma geral, de ressurgência e subsidência, respectivamente.

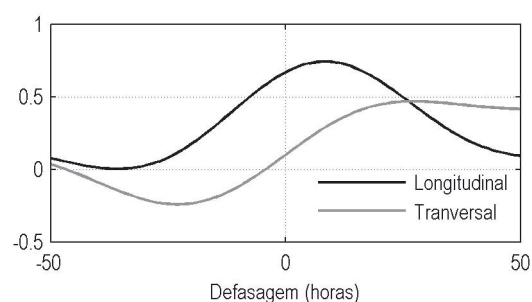


Figura 8. Correlação cruzada entre os dados de nível do mar e as componentes longitudinal (em preto) e transversal (em cinza) do vento.

3.2 Ressurgência e subsidência costeira

Analisando os resultados encontrados nas correlações cruzadas e observando de forma integrada as séries temporais, ficam evidentes os padrões de circulação conhecidos como ressurgência e subsidência costeira. Esse mecanismo foi proposto por Ekman (1905), o qual demonstra que o vento ao soprar sobre o oceano causa uma corrente superficial inicialmente na mesma direção do vento. Com a deflexão pelo efeito de Coriolis, e ao atingir um estado estacionário de equilíbrio, ocorre o desenvolvimento da chamada espiral de Ekman, com um transporte de massa ortogonal-

mente à esquerda da tensão do cisalhamento do vento, conhecido como transporte de Ekman. Este transporte se dá em uma camada superficial, cuja espessura é diretamente proporcional à intensidade do vento e à viscosidade turbulenta, denominada de camada de Ekman (Bowden, 1983). Em áreas rasas, como na plataforma continental interna, as escalas horizontais e verticais são muito reduzidas, assim, essa região encontra-se continuamente sob ação de mecanismos inerentes a baixa profundidade, sendo denominada zona de fricção (Stanley & Swift, 1976). Neste ambiente, as camadas de Ekman de fundo e superfície se sobrepõem, transferindo progressivamente mais tensão de cisalhamento do vento diretamente para o fundo à medida que a profundidade diminui. Esta sobreposição define a região de divergência, ou convergência do transporte de Ekman ortogonal à costa, causadora da subsidência ou ressurgência costeira (Smith, 1981).

Um padrão do modelo de equilíbrio de Ekman foi observado, onde ventos paralelos à costa induzem um transporte ortogonal à linha de costa na camada superficial. No entanto, devido a barreira exercida pela presença da costa, um fluxo de retorno no interior da coluna de água se desenvolve em sentido contrário ao da superfície. No caso da costa oeste do Atlântico, no Hemisfério Sul, ventos do quadrante N promovem correntes para o S que causam a já citada ressurgência costeira. De forma contrária, ventos do quadrante S promovem correntes para o N e com isso, a subsidência costeira. No presente trabalho, há fortes indícios que tanto

a ressurgência, como a subsidência costeira, ocorreram em diversos momentos do registro realizado pelo AWAC.

Já haviam sido encontradas evidências do transporte de Ekman na costa do Rio Grande do Sul, entretanto nunca de forma tão clara e em profundidades tão reduzidas como no caso do fundeio em questão, aos 11 m de profundidade.

A fim de tornar mais compreensível a visualização destes mecanismos, foram selecionados dois períodos. A figura 9 retrata o primeiro período, entre 3 e 4 de janeiro, com duração de mais de 30 h, quando ventos de SO estiveram associados com uma corrente longitudinal, totalmente orientada para o N (Fig. 9A). Esse movimento gerou uma corrente de superfície no eixo transversal em direção à costa, e outra de retorno pelo fundo em direção ao mar aberto (Fig. 9B). Além disso, ocorreu um aumento na temperatura d'água de aproximadamente 4° (Fig. 9C), e também uma elevação do nível do mar em mais de 0,3 m (Fig. 9D), o que claramente caracteriza o já mencionado mecanismo de subsidência costeira.

O segundo período selecionado (Fig. 10), com 40 h de duração, entre os dias 3 e 4 de março, quando foi observado um vento de NE, o qual forçou uma corrente longitudinal orientada para S em toda a coluna d'água (Fig. 10A), que por sua vez, gerou um fluxo transversal na superfície em direção ao oceano, e outro de retorno pelo fundo em direção à costa (Fig. 10B). Com isso, águas com menores temperaturas, cerca de 1° mais frias, foram advectadas em direção à região mais rasa da

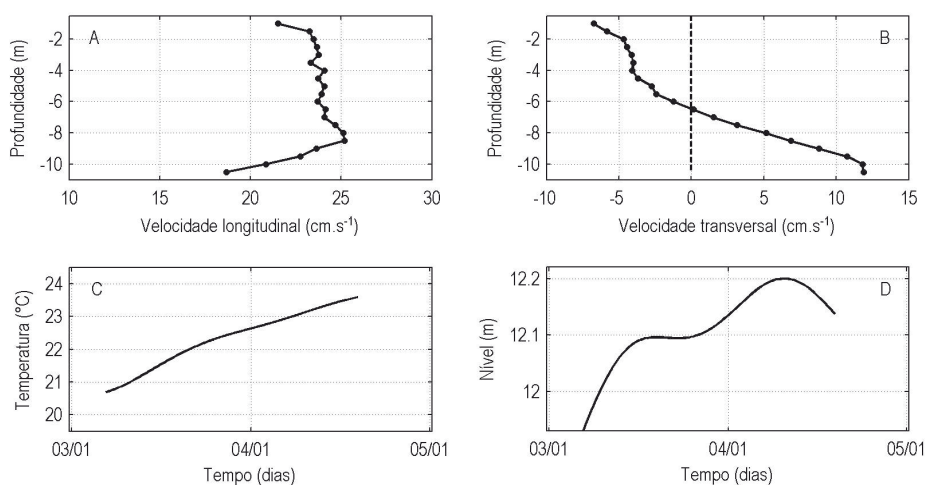


Figura 9. Descrição do mecanismo de subsidência costeira para uma condição de vento SO. A) Perfil médio da velocidade da corrente longitudinal a costa, valores positivos indicam direção N; B) Perfil médio da velocidade transversal à costa, valores positivos indicam fluxo em direção ao oceano, valores negativos indicam direção à costa; C) Temperatura da água no fundo; D) Nível médio do mar.

plataforma continental (Fig. 10C), e também foi observado um rebaixamento do nível do mar localmente, superior a 20 cm (Fig. 10D).

As condições meteorológicas e oceanográficas descritas anteriormente possibilitam a interpretação do modelo de circulação teórico proposto inicialmente por Ekman (1905), e posteriormente por Csanady (1976), o qual descreveu a importância do cisalhamento do vento no comportamento das correntes na plataforma continental. Esse último autor propôs que ventos paralelos à costa in-

duzem um transporte de Ekman ortogonal à costa na camada superficial e devido a presença da costa, um fluxo de retorno se desenvolve na camada de fundo em sentido contrário ao da superfície.

Esse comportamento tão próximo à zona de surfe, ganha destaque quando é identificado e descrito, devido a sua importância no transporte de sedimentos entre esta região e a porção mais profunda da plataforma continental, na importação e exportação do sedimento de fundo (Pepper & Stone, 2004).

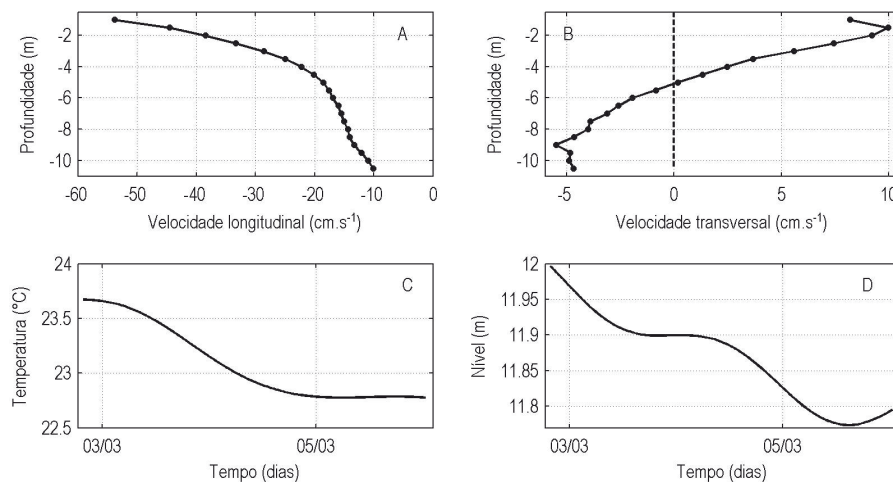


Figura 10. Descrição do mecanismo de ressurgência costeira para uma condição de vento NE. A) Perfil médio da velocidade longitudinal a costa, valores negativos indicam direção S; B) Perfil médio da velocidade transversal à costa, valores positivos indicam fluxo em direção ao oceano, valores negativos indicam direção à costa; C) Temperatura da água no fundo; D) Nível médio do mar.

4. Conclusões

Os resultados apresentados demonstram padrões regionais de correntes costeiras que atuam na plataforma interna, no litoral norte do Rio Grande do Sul, e que ainda não tinham sido descritos e interpretados anteriormente. As análises espectrais e as correlações entre a componente longitudinal do vento e das correntes indicaram o domínio desta forçante na hidrodinâmica local.

O perfil médio de velocidades de todo o registro de correntes indica velocidades mais intensas para S na camada superficial da água em relação à camada de fundo, e a existência de um padrão bidirecional causado pelo atrito do escoamento com o fundo plano e suavemente inclinado para E na região do fundeio.

Os diferentes valores de defasagem entre a atuação do vento e a resposta na corrente em superfície (0 h) e fundo (2 h), evidenciam uma rápida resposta da água à ação do vento. Além disso, foi demonstrada através de dados coletados em campo, uma concordância com o modelo teórico de circulação proposto por Ekman (1905).

Os padrões de circulação por correntes bem

como o modelo de circulação para águas rasas, sob o domínio dos ventos incidentes, representam a primeira contribuição deste projeto de pesquisa. Pretende-se dar continuidade a aquisição de novas séries de dados, incluindo os parâmetros de ondas e a concentração de sedimentos em suspensão com a finalidade de aprimorar a interpretação dos mecanismos e dos padrões de circulação em águas rasas no litoral norte do estado do RS, bem como em outros ciclos sazonais.

Agradecimentos - Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão do auxílio financeiro através do Edital Ciências do Mar para a realização das campanhas oceanográficas, bem como pela Bolsa de Doutorado ao primeiro autor, aos revisores, os quais contribuíram fortemente para a melhoria do artigo, à empresa de navegação Mundial Serviços Marítimos Ltda e aos mergulhadores José Marinho e José D. Alves, pelo apoio logístico. Finalmente, agradecemos ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelo fornecimento dos dados de vento. Este trabalho é parte da Tese de Doutorado do primeiro autor junto ao Programa de Pós-graduação em Geociências da UFRGS.

5. Referências

- Almeida, L.E.S.B., Rosauero, N.M.L. & Toldo Jr., E.E. 1997. Análise Preliminar das Marés na Barra do Rio Tramandaí, RS - Brasil. XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, *Anais...*, Vitória, ES. v.1, p.560-566.
- Barros, V.R., Grimm, A.M. & Doyle, M.E. 2002. Relationship between temperature and circulation in Southwestern South America and its influence from El Niño and La Niña events. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80: 21-32.
- Bowden, K.F. 1983. *Physical oceanography of coastal waters*. New York. Halsted Press, 302 p.
- Calliari, L.J. & Fachin, S. 1993. Laguna dos Patos. Influência nos depósitos lamíticos costeiros. *Pesquisas*, 20(1): 57-69.
- Calliari, L.J., Winterwerp, J.C., Fernandes, E., Cuchiara, D., Vinzon, S.B., Sperle, M. & Holland, K.T. 2009. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon-Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research*, 29(3): 515-529.
- Costa, R. 2009. *Estudo sobre a variabilidade sazonal e da estrutura vertical das correntes costeiras da plataforma interna, ao largo de Rio Grande - RS*. Rio Grande. 97p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande.
- Costa, R. & Möller, O.O. 2011. Estudo da estrutura e da variabilidade das correntes na área da plataforma interna ao largo de Rio Grande (RS, Brasil), no sudoeste do Atlântico Sul, durante a primavera-verão de 2006-2007. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 11(3): 273-281.
- Csanady, G.T. 1976. Mean circulation in shallow seas. *Journal of Geophysical Research*, 81(30), 5389-5399.
- Ekmann, V.W. 1905. On the influence of earth's rotation on ocean currents. *Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik*, 2(11): 52p.
- Fachin, S. 1998. *Caracterização do Perfil de Equilíbrio da Antepraia na Costa do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. 105 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Figueiredo Jr., A.G. 1980. Response of water column to strong wind forcing, southern Brazilian inner shelf: implications for sand ridge formation. *Marine Geology*, 35: 367-376.
- Ma, T.T.M. 2013. *Quantificação do transporte longitudinal a partir de dados de concentração de sedimentos em suspensão, Tramandaí-RS*. Porto Alegre. 72p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Miranda, L.B., Castro, B.M. & Kjerfve, B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. São Paulo, Edusp, 413p.
- Nakano, K. 2006. *Projeto Orla: implementação em territórios com urbanização consolidada*. Coordenação de Kazuo Nakano. São Paulo: Instituto Polis; Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 80 p.
- Parise, C.K., Calliari, L.J. & Krusche, N. 2009. Storm Surges and Beach Erosion in Southern Brazil: Atmospheric Conditions and Shore Erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(3): 175-188.
- Pepper, D.A. & Stone G.W. 2004. Hydrodynamic and sedimentary responses to two contrasting winter storms on the inner shelf of the northern Gulf of Mexico. *Marine Geology*, 210: 43-62.
- Piola, A.R., Matano, R.P., Palma, E., Möller, O.O. & Campos, E.J. 2005. The influence of the Plata river discharge on the western South Atlantic Shelf. *Geophysical Research Letters*, 32: 10-29.
- Siegle, E. & Calliari, L.J. 2008. High-Energy Events and Short-Term Changes in Superficial Beach Sediments. *Brazilian Journal of Oceanography*, 56(2): 149-152.
- Smith, R.I. 1981. A comparison of the structure and variability of the flow field in three coastal upwelling regions: Oregon, Northwest Africa and Peru. *Coastal Upwelling*, (1981): 107-118.
- Stanley, D.J. & Swift, D. J. P. 1976. *Marine Sediment Transport and Environment*. Wiley-Interscience, New York, 602 p.
- Strauch, J.C., Cuchiara, D.C., Toldo Jr., E.E. & Almeida, L.E.S.B. 2009. O Padrão das Ondas de Verão e Outono no Litoral Sul e Norte do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 14(4): 29-37.
- Thompson, R. 1983. Low-Pass Filters to Suppress Inertial and Tidal Frequencies. *Journal of Physical Oceanography*, 13: 1077-1083.
- Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R., Almeida, L.E.S.B., Tabajara, L.L., Martins, R. & Cunha, L.O.B.P. 1993. Parâmetros morfométricos da Praia de Imbé, RS. *Pesquisas*, 20 (1): 27-32.
- Toldo Jr, E.E., Nicolodi, J.L., Almeida, L.E.S.B., Corrêa, I.C.S. & Esteves, L.S. 2006. Coastal dunes and shoreface width as a function of longshore transport. *Journal of Coastal Research*, 390-394.
- Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J. 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. *Notas Técnicas do CECO-IG-UFRGS*, Porto Alegre, 8:1-45.
- Welch, P. 1967. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, 15(2): 70-73.
- Zavialov, P., Möller, O.O.Jr. & Campos, E. 2002. First direct measurements of currents on the continental shelf of Southern Brazil. *Continental Shelf Research*, 22: 1975-1986.

CAPÍTULO 3

TIDAL AND SUBTIDAL OSCILLATIONS IN A SHALLOW WATER SYSTEM IN SOUTHERN BRAZIL

Tidal and subtidal oscillations in a shallow water system in southern Brazil

Mauro Michelena Andrade¹*✉, Elírio Ernestino Toldo², José Carlos Rodrigues Nunes²

¹Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Geociências (Av. Bento Gonçalves, Prédio 43113 - Porto Alegre - RS - 91501-970 - Brazil)

²Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43125 - Porto Alegre - RS - 91501-970 - Brazil)

*Corresponding author: mauromichelena@gmail.com

Abstract

Sea level oscillations in time scales between hours and days have a great vertical amplitude regarding the low lying coastal gradient of the beaches in the Rio Grande do Sul coast. However, the mechanism of oscillations is poorly understood since the scarcity of observational data makes it impossible to determine the forces that control sea level oscillations. Therefore, hourly sea level and wind time series with a time period of 650 days were examined. It has been found that the mean tidal and subtidal amplitudes were very similar to each other and that a considerable portion of the energy from sea level oscillations was due to astronomical forces. A new perspective was introduced when high and low frequencies were compared, leading to the comprehension that astronomical tides should be considered in coastal studies in southern Brazil. The sea level time series analyzed in this study showed that the maximum amplitude of the high spring tide was 0.53m, and that the subtidal rise caused by the wind reached up to 0.66m. In general, when large tidal and subtidal amplitudes are added, it can generate extreme events of sea level rise on the coast, which constitute a direct threat to coastal communities and habitats.

Descriptors: Mean tidal range, Sea level, High and low frequencies, AWAC.

1. INTRODUCTION

Tides are the longest ocean waves and are characterized by the sea level (SL) rhythmic ascent and descent over a period of half a day or one day (Wright et al., 1999). The regular and predictable pattern of astronomical tidal oscillations is modified to a greater or lesser extent by irregular factors, which mainly are the atmospheric pressure and the momentum exchange between the atmosphere and the ocean (Pugh, 1987).

In general, it is estimated that the effects due only to the atmospheric pressure are responsible for 10% of the changes observed in SL, the remainder being exclusively due to wind shear stress on the sea surface (Marone and Camargo, 1994). These meteorological influences produce low frequency oscillations in SL, routinely called meteorological tides (Trucolo et al., 2006) and defined as the difference between the observed level and the

astronomical tide (Pugh, 1987). The generation of this phenomenon depends on the intensity and duration of the alongshore wind, wind fetch length, and local bathymetry (Pugh, 1987).

In this way, large variations in SL driven by the wind cause very significant storm surges on the coast. This effect is more important when observed data are much higher or lower than the predicted astronomical tide. This is the case when high tides can cause saltwater intrusion where it usually does not occur, producing severe flooding and property damage, or when extremely low levels prevent navigation on access channels and harbors and result in possible ecological impacts (Clara et al., 2015; Williams, 2013).

In the Brazilian coast and especially in the coast of the state of Rio Grande do Sul (RS), there is a lack of long-term oceanographic data (Costa and Möller, 2011; Zavialov et al., 2002). Studies on SL at tidal and sub-tidal frequencies using field data are not found in the literature (Valentim et al., 2013).

Submitted on: 17/March/2018

Approved on: 2/July/2018

<http://dx.doi.org/10.1590/S1679-87592018017406603>

Understanding and dissociating SL oscillations caused by meteorological and astronomical forcing is very important for navigation safety, coastal engineering, studies on sediment budget and many other factors. Storm surges are a frequent phenomenon and have high vertical amplitude in beaches from southern Brazil, causing erosion and dune retreat that can reach tens of meters (Siegle and Calliari, 2008). During periods of maximum astronomical tides (spring tides), in low-relief, densely populated coastal systems severe damage may occur in the presence of these oceanic anomalies (Campos et al., 2010). However, the mechanism and the real forces behind those oscillations are poorly understood in the region.

In addition, a significant trend of SL rise and the intensification of extreme events of high. (Mawdsley et al., 2014) are being observed in several points around the world, including locations in the Brazilian coast (PBMC, 2016). These effects would be more pronounced if the height and duration of storm surges increased as a result of a climatic change, as demonstrated by Fiore et al. (2009). In this scenario, coastal regions worldwide would in general become more vulnerable, including the RS coastline due to its intrinsic morphodynamic characteristics. Its low lying coastal gradient combined with a high degree of exposure to ocean dynamics makes this area highly vulnerable in the future due to the mean SL rising (Germani et al., 2015).

Andrade et al. (2016) studied the oceanic current circulation in the inner shelf off Tramandaí Beach and found variations in the direction of currents during short periods, which ranged between southward and northward driven by the alongshore wind. Furthermore, these authors found evidences of upwelling and downwelling circulation patterns.

Regarding the wind regime, winds from the northeastern quadrant are dominant throughout the year. However, periodic reversals to the southwestern direction are observed during the passage of meteorological fronts, which are more frequent in the autumn and winter (Cavalcanti and Kousky, 2009). During meteorological events of cold fronts, strong southwesterly winds with average speeds of 8ms^{-1} induce high SL in the coast (Siegle and Calliari, 2008). There are some evidences of non-local wind effects on coastal SL that are attributed to continental shelf waves (Castro and Lee, 1995; Dottori and Castro, 2009; Dottori and Castro, 2018).

The astronomical tide of the study area is mixed with a semidiurnal dominance and a mean amplitude of 0.3m. It

is classified as microtidal by the analysis of short time series from inside the channel of Lagoa de Tramandaí (Silva et al., 2017). This small tidal range can be explained by the proximity to an amphidromic point for the M2 tide in the South Atlantic Ocean (Möller et al., 2007) and by the rectilinear configuration of the coastline, which could amplify tidal amplitudes through resonance effects or by convergence (Villwock and Tomazelli, 1995).

Tidal oscillations in the RS coast are defined by their small amplitude and in several other studies the use of the following terms is recurrent: “tides of small amplitude” (Rocha et al., 2015); “minimal influence” (Siegle and Calliari, 2008); “minor importance” (Möller et al., 2007). For this reason, tides are often disregarded in studies, such as the ones on current circulation, sediment dynamics, and transport of chemical and biological properties.

The cited studies, and many others (da Motta et al., 2015; Vianna and Calliari, 2015; Silva et al., 2016; Jung and Toldo, 2011), used mean tidal amplitudes and compared them to maximum amplitudes reached by meteorological tides. However, this comparison is not scientifically appropriate and can cause a misinterpretation of data results. We ask ourselves if astronomical tides can really be totally overlooked in studies in this region, besides the fact that, up to now, scarce observational data did not allow us to determine the real forces that drive SL oscillations in this coast.

For the purpose of monitoring oceanographic conditions, including SL observations, an acoustic wave and current profiler was moored on Tramandaí Beach, located in the north of RS state (Figure 1). The findings showed a great variability of driving mechanisms and a significant response of SL to the alongshore wind and astronomical forces.

2. MATERIAL AND METHODS

The state of RS (Figure 1) is consisted of a long sandy barrier shoreline (615km) that presents a smooth sinuosity and two permanent discontinuities formed by the estuaries of Lagoa de Tramandaí in the north and of Lagoa dos Patos in the south (Dillenburger et al., 2004). This system is part of the Southern Brazilian Continental Shelf (SBCS), which is around 150 to 200km wide and has a maximum depth of 140m, with gentle slopes of 0.03 to 0.08°. The shoreface is wide and shallow with a seaward limit of 10 to 15m deep and presents long offshore bars. This sandy beach has a low gradient and varies from intermediate to dissipative showing a longshore bar-trough structure. The

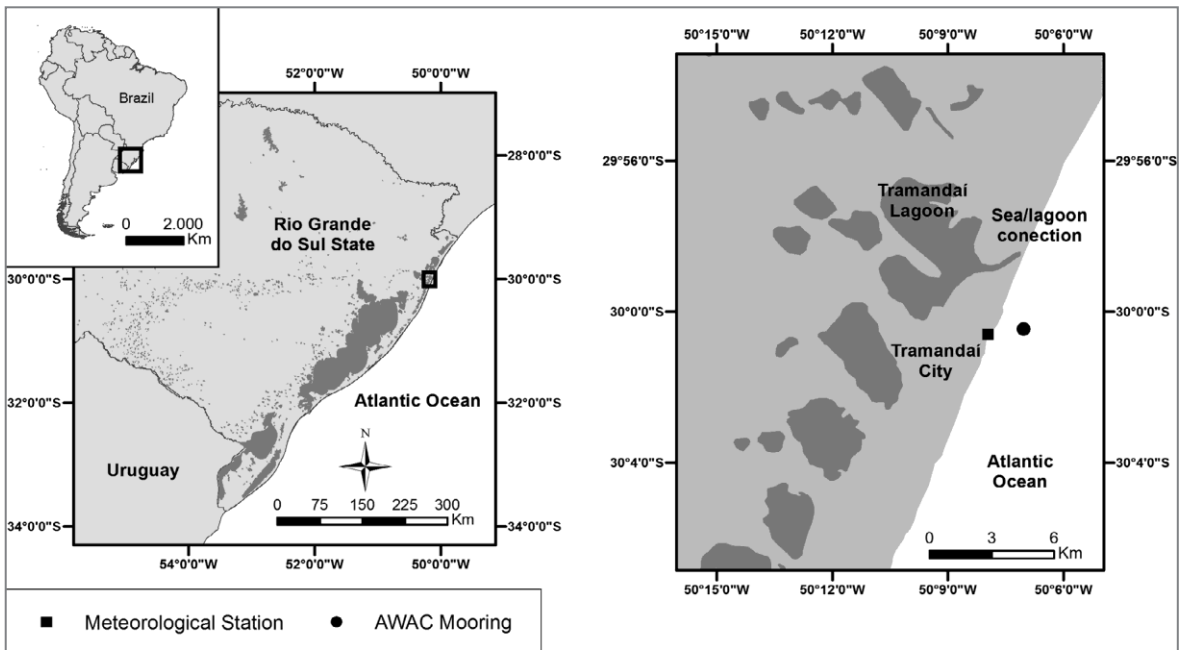


Figure 1. Study site located in Tramandaí, northern coast of the state of RS. Positions of the mooring and the meteorological station are indicated.

shoreface floor consists mainly of sandy sediments, while the beach and surf zone areas are composed by well-sorted fine sand (Toldo et al., 2006).

An acoustic wave and current profiler, AWAC/Nortek of 1MHz, recorded four SL data time series that totalized 650 days and had only two interruptions. The first and second interruptions lasted 100 and 140 days, respectively. The data were measured by a pressure sensor that performed a 120-second average every hour. This equipment sampled two points (400m away) during four periods described in detail in Table 1. The AWAC also acquired current velocity and direction profiles, wave parameters, and water temperature; however, this work only aims at studying the SL data. A fifth and last mooring has been recovered after this article has been submitted. The recovered record forms a series of SL data between May and September 2017. There was no time to perform all the analyzes, however we chose to present an extremely low level event that occurred at the beginning of August in the whole Brazilian coast, which was the subject of several media reports.

An automatic weather station Vaisala MAWS 301, installed and maintained by the National Institute of Meteorology (INMET) from Brazil, provided atmospheric pressure and hourly wind direction and intensity data used in this work. This station is located over 2,000m away from the AWAC mooring in an area free of obstacles with

sensors positioned 10m above SL (Figure 1). Wind data were rotated 20° in relation to True North to be aligned with the orientation of the coast-line and later decomposed into alongshore and cross-shore components, following the methodology described in Miranda (2002).

Since a pressure sensor collected the SL data used in this work, the variation of atmospheric pressure as a function of mean pressure was added. In order to remove the high-frequency oscillations (tidal frequencies), a Lanczos-Cossine low-pass filter (Thompson, 1983) was used, which removes 95% of the oscillations with frequencies higher than 1/40h. The result is the so called low-frequency or subtidal oscillations. The high-frequency oscillations were obtained by the subtraction of subtidal series from the raw, and are referred as tidal frequencies.

The spectral analysis followed the methodology proposed by Welch (1967). A type of Hanning window was applied with 50% overlapping, a procedure that results in an estimated mean spectral density calculated from the estimated five segments. Statistical reliability is improved even though resolution is lost in the process of using spectral windowing.

The correlation coefficient and phase difference in hours (lag) were calculated using cross correlations in order to obtain the largest correlation between SL and wind data. The negative and positive correlation coefficients represent an inverse and direct relationship,

Table 1. Data sampled periods of each mooring.

Mooring	Start date	End date	Seasons	Depth (m)
01	17/12/2013	13/03/2014	Summer	12
02	24/06/2014	27/04/2015	Winter/Spring/Summer	12
03	27/04/2015	30/07/2015	Autumn	14
04	19/01/2016	21/06/2016	Summer/Autumn	14

respectively, with values close to -1 and 1 representing the highest correlation. Values near zero do not demonstrate an existent relationship. All correlations presented a significance level higher than 99%.

The harmonic analysis performed for the SL data is based on the Fast Fourier Transform, which uses tidal harmonic components for the calculation of amplitudes and phases of tidal harmonic constants, providing the importance of each constituent. The results were obtained through the computer program called T-tide, following the methodology developed by Pawlowicz et al. (2002).

From the results obtained in the harmonic analysis, the *Form number* (F) was calculated by dividing the sum of the diurnals O1 and K1 by the semidiurnal constants M2 and S2. Thus, the relative importance of diurnal and semidiurnal constituents is determined and it is possible to classify the tidal regime in a given region by following the classification proposed by Defant (1961), *apud* Miranda (2002).

The mean tidal range (MTR) resulted from the average of all high SL plus the average of all low SL observed over tidal and subtidal time series. The maximum high and low SL represents the major and minor amplitudes reached by the water level, respectively.

SL values above and below two standard deviations (STD) were selected for each mooring, and then the maximum and minimum SL events were separated from the rest. In order to obtain a seasonal scenario, the number of positive and negative SL events for each season was quantified. Occurrences of values above and below three STDs were also selected, which may be related to extreme events.

3. RESULTS

The MTR for all tide time series was 0.31m. The average for all subtidal oscillations in the low-frequency time series was 0.37m. The difference between the maximum and minimum level in the raw time series was 2.2m.

However, when the high-frequency oscillations (tides) were removed, a maximum variation of 1.62m was found. Nonetheless, when the oscillations caused by tides were analyzed alone, a maximum difference of 0.96m was observed.

On August 12, 2017, the lowest SL was recorded among all the time series, 1.26m below the mean SL (recorded by mooring 05, not show). This event was greatly accompanied by the media, being called “the super retreat” of the sea. The SL remained below the mean level for approximately 100 hours, reaching its maximum after 54h of the beginning. This phenomenon was related to a strong meteorological system, an anticyclone on the Atlantic Ocean, that caused intense and persistent southwards winds on the entire SBCS. It notes that this event occurred at spring tide period.

Table 2 presents in detail the values of tidal and subtidal averages for each mooring and the values of the maximum SL at each frequency above and below zero (or mean SL). It is important to notice that SL can reach 1.2m above the mean when adding up tidal and subtidal maximum amplitudes without considering the effect of wave runup.

Figures 2a, 3a, 4a and 5a show the raw SL time series for each mooring. Figures 2b, 3b, 4b and 5b (red color) present the SL filtered data, i.e. subtidal oscillations, and in black it is shown the high-frequency or tidal oscillations of SL. It is possible to notice that in most seasons (Figure 2, Figure 3 between September and February, and the beginning of Figure 5) the tidal and subtidal oscillations are proportional in amplitude. However, in Figure 4 and at the end of Figure 5, the magnitude of the amplitude of subtidal oscillations is greater than tidal oscillations. These periods coincide with the winter and autumn seasons in the Southern Hemisphere.

Table 3 shows the duration in days (sum of duration in hours) of SL events above and below two STDs for the raw data series by season. The total number of these positive and negative peaks of SL events and the number of events that exceeded three STDs are also displayed. It is

Table 2. Mean tidal range (MTR) and SL maximum above and below the zero calculated for tidal and subtidal time series for each mooring.

	MTR (m)		Maximun above zero (m)		Maximun below zero (m)	
	Tidal	Subtidal	Tidal	Subtidal	Tidal	Subtidal
Mooring 01	0.33	0.29	0.51	0.40	-0.40	-0.31
Mooring 02	0.31	0.41	0.53	0.64	-0.43	-0.49
Mooring 03	0.30	0.38	0.44	0.66	-0.35	-0.57
Mooring 04	0.30	0.40	0.43	0.55	-0.35	-0.43

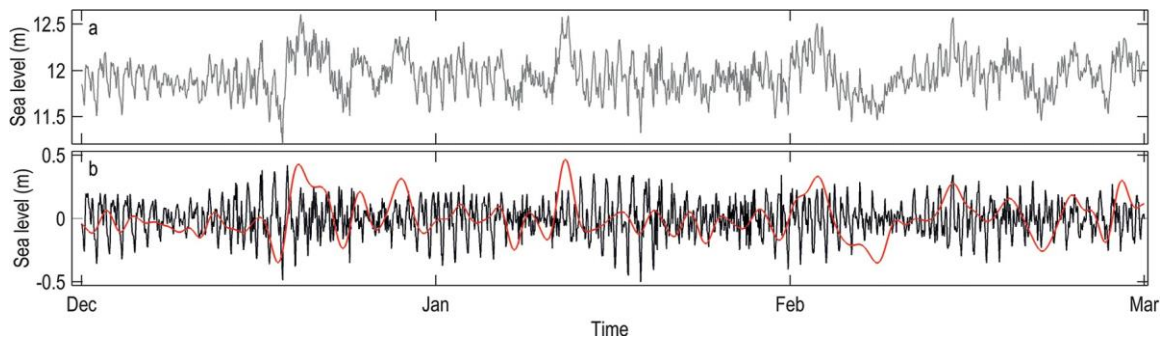


Figure 2. SL time series from summer 2014 (mooring 01). a) Raw data. b) Tidal (in black) and subtidal (in red) frequencies.

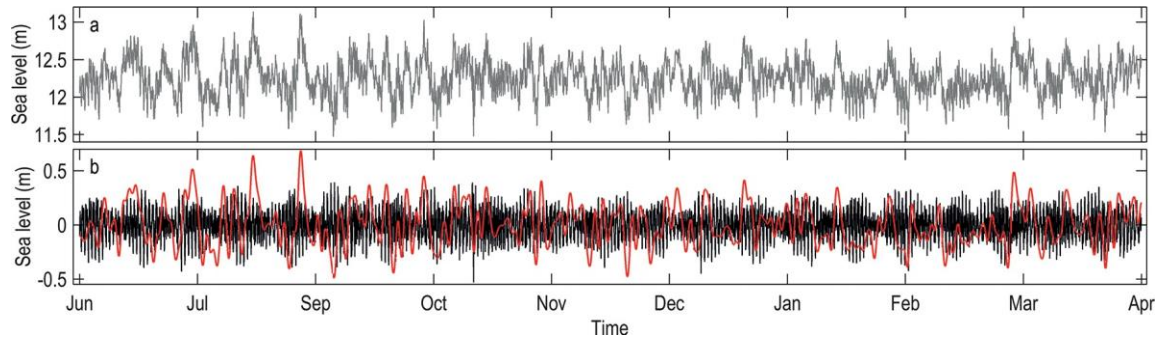


Figure 3. SL time series from winter and spring 2014 and summer 2015 (mooring 02). a) Raw data. b) Tidal (in black) and subtidal (in red) frequencies.

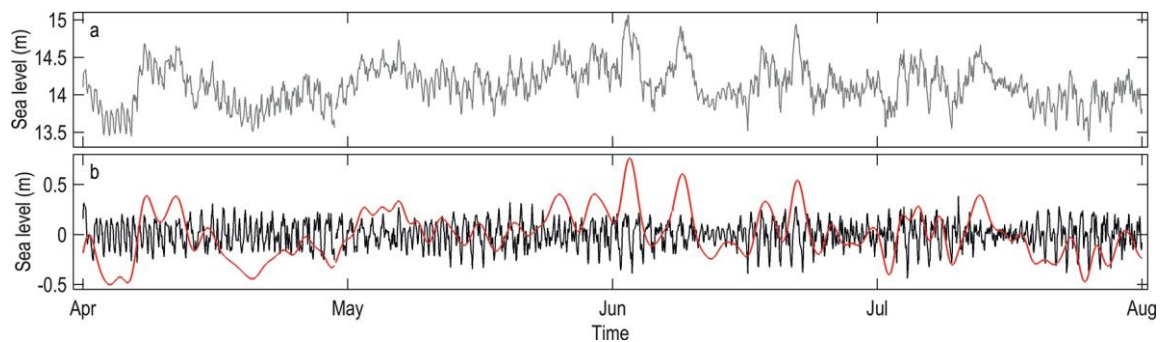


Figure 4. SL time series from autumn 2015 (mooring 03). a) Raw data. b) Tidal (in black) and subtidal (in red) frequencies.

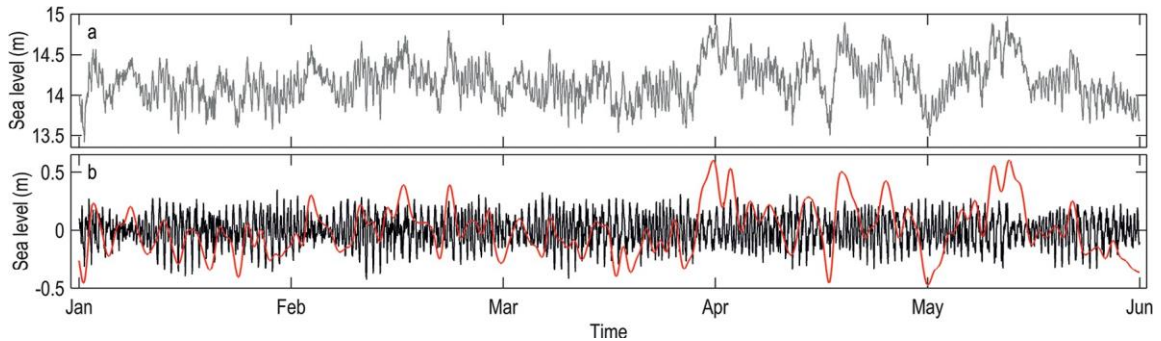


Figure 5. SL time series from summer and autumn 2016 (mooring 04). a) Raw data. b) Tidal (in black) and subtidal (in red) frequencies.

Table 3. Duration and total number of events of SL above (positive) and below (negative) two standard deviations (STD) and three STDs from the raw data series for each season.

	Positivi				Negative		
	STD (m)	Duration (days)	Events	3 x STD	Duration (days)	Events	3 x STD
Summer 2014	0.39	2.3	11	4	1.6	14	2
Winter 2014	0.47	4.8	16	3	2.0	15	1
Spring 2014	0.47	1.0	7	1	2.0	15	1
Summer 2015	0.47	1.2	6	0	1.7	16	2
Autumn 2015	0.54	2.7	6	1	2.0	16	0
Summer 2016	0.49	0.4	4	0	0.8	7	1
Autumn 2016	0.49	5.1	14	2	1.2	11	0

worth mentioning that these extreme events (three STDs) only occurred during spring tides.

Basic statistical analyses for each season indicated that between 54 and 78% and between 21 and 44% of the SL variance could be attributed to subtidal oscillations and astronomical tides, respectively, depending on the season. Table 4 shows in detail the tidal and subtidal variances and the alongshore wind variance at high and low frequencies. The small remaining percentage of approximately 2% is due to other frequencies that are not the object of this study.

The spectral analysis of all SL raw data and the alongshore wind (Figures 6a and 6b) shows a great amount of energy at low frequencies, which corresponds to periods between 20 and 8 days (0.0019 and 0.005cpd). It is also possible to observe that the largest amount of energy in the SL variability occurred in the autumn (green) and winter (blue). These results demonstrate a greater variability of SL and wind speed time series at low frequencies, which also shows a clear relationship between wind and SL variations. It is also possible to observe in Figure 6a a great amount of energy at high frequencies that are associated

with diurnal (25h) and semidiurnal (12h) tides, especially during the summer months (black).

The cross correlation between the alongshore wind and SL for each season resulted in a coefficient between 0.8 and 0.6 with 13 to 17h of time lag. This corroborates with the results found in the spectral analysis, in which the alongshore wind is the main driving mechanism for local SL. The cross correlation between cross-shore wind and SL resulted in a coefficient between 0.6 and 0.3 with 16 to 31h of time lag.

The *Form number* calculated for each season resulted in values between 1.15 and 1.4, which classifies the tide in this region as mixed with a semidiurnal predominance. One exception occurred in autumn 2015, in which the *F number* was equal to 1.62, classifying the tide as mixed with a diurnal predominance. A possible explanation for this result could be the difference observed between the K1 and S2 amplitudes, since the largest and the smallest amplitudes of K1 and S2, respectively, were measured during this period, which consequently increases the resulting *F number*.

Table 4. Variances of tidal and subtidal oscillations and of the high- and low-frequency alongshore wind for each season.

	Variance (%)			
	Tidal	Subtidal	High-freq. wind	Low-freq. wind
Summer 2014	44	54	25	73
Winter 2014	25	73	17	80
Spring 2014	30	68	15	83
Summer 2015	34	64	17	82
Autumn 2015	21	78	22	75
Summer 2016	35	64	21	77
Autumn 2016	22	76	--	--

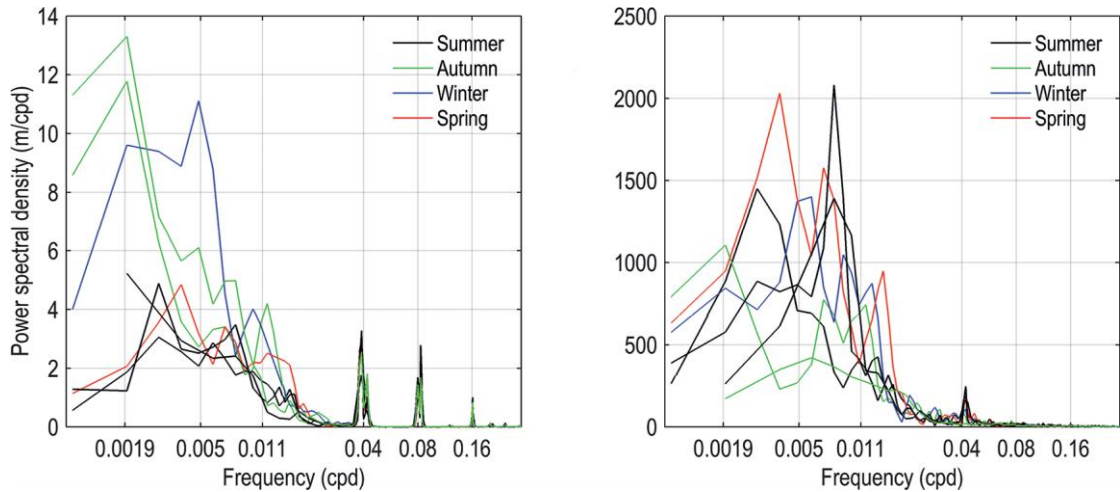


Figure 6. Spectral analysis for each season. Sea level (left) and alongshore wind (right).

4. DISCUSSION

Corroborating with the visual inspection of tidal and subtidal time series (Figures 2, 3, 4 and 5), statistical analyses (Table 4 and Figure 6) indicated that, in some seasons, around almost half of the energy involved in SL oscillations could be attributed to tidal oscillations. These results demonstrated that, even though the averages of astronomical tide amplitudes are considered small by the literature and also by the findings of this paper (0.31m), they are very similar to the calculated average values of subtidal amplitudes (0.37m). Thus, not only the variance of tidal oscillations but also the mean amplitude led us to the conclusion that the astronomical tide cannot be totally neglected in oceanographic studies in the RS coast.

Usually in the literature (Rocha et al., 2015; Siegle and Calliari, 2008; Möller et al., 2007), the mean tidal range and the maximum amplitude reached by meteorological tides are compared, causing the misinterpretation that astronomical tides do not matter in the local SL oscillations and

consequently in associated processes. This reason led many studies to disregard the astronomical tides in their analyses.

Few research works in the study area have broken this paradigm created by that misinterpretation of data results.

Soares et al. (2007) contrasted the cited works by testing the importance of astronomical tides on the SBCS area using numerical simulations. One of the main conclusions was that regional circulation depends on a combination of tides, winds and river plumes.

Spectral analysis of SL and alongshore wind shows that the most part of the energy is found at low frequencies with coincident peaks, demonstrating a clear relationship between wind and SL variations. This can be interpreted as an indication that the wind is an important driving mechanism for local SL oscillations in time scales from hours to days. Another important aspect is the large differences among the SL time series with clear seasonal patterns.

As shown, the wind has a large influence on the local SL variations, so the wind seasonal variability directly

affects the SL variance. Cold fronts that invert the wind direction reach Southern Brazil more frequently between May and September (austral autumn and winter). From October to April (austral spring and summer), cold fronts are less frequent in this region as they present a more zonal and maritime displacement (Escobar et al., 2016). This seasonal pattern in SL variability, showing a higher intensity of positive extreme events during autumn and winter, has already been observed in a region further north from the study area, also associated with atmospheric frontal systems (Campos et al., 2010).

The results from the cross correlation between the alongshore wind and SL for each season demonstrated the effect of the wind on the SL oscillations. This corroborates with the findings from the spectral analysis, in which the alongshore wind is the main driving mechanism for the local SL. The correlation between wind and water circulation had already been demonstrated in previous studies (Costa and Möller, 2011; Andrade et al., 2016), but this is the first time that this was demonstrated with observational SL data in Tramandaí Beach.

The positive coefficients from the correlations can be explained by the Ekman balance model (Ekman, 1905) for the Southern Hemisphere, where southward alongshore winds induce a decrease in the water level (upwelling) and northward alongshore winds cause an increase in it (downwelling). The cross correlation between cross-shore winds and SL resulted in small coefficients, which is an indication of their poor relationship. The Ekman transport in the RS coast had already been observed but in association with the water circulation (Andrade et al., 2016; Soares and Möller, 2001).

A larger number of positive maximum events (greater than two STDs) occurred during the winter and autumn, with exception of autumn 2015, when fewer events were observed. However, this can be partially explained by the high STD of this time series (the largest of all). Negative peaks showed a uniform pattern of occurrence between seasons. Extreme atmospheric events such as the passage of intense extra-tropical cyclones happen more frequently in the winter and autumn months (Machado and Calliari, 2016; Saraiva et al., 2003) and thus it can explain the high occurrence of positive peaks in these two seasons.

It is important to note that the peaks reached only by the subtidal frequency are much lower than the peaks as a whole. In other words, a significant SL rise only occurs with the contribution of the astronomical tide. Again, the astronomical tide cannot be totally disregarded in studies on the RS coast.

High SL amplitudes may be even greater when considering the wave runup effects in storm events (Scheffner, 2008). Guimarães et al. (2015) used numerical modeling and found amplitudes greater than 2m only caused by the wave runup on Tramandaí Beach, which are above the mean SL. This phenomenon can lead to seawater flooding on coastal areas. Therefore, by adding up the maximum amplitudes of high spring tides (0.53m), the subtidal rise driven by the wind (0.66m), and an extreme wave runup (2m), a dangerously high SL can occur on the beach. In the same article, Guimarães et al. (2015) reported erosional events in the beachfront of the city of Imbé. Although not necessarily caused by maximum tidal and subtidal amplitudes, they led to the destruction of natural environments and private properties. When SL rise is associated with strong waves, all the RS coastal zone can be affected by intense coastal erosion and extensive flooding.

Fiore et al. (2009) carried a long-term study on the coastal effects of meteorological tides in Mar del Plata, Argentina. The authors found that the events of meteorological tides suffered an increase in their average number per decade and in their duration, also observing an intensification of positive events. The abnormal SL elevation near the coast allows the upper beach to be vulnerable to waves of high amplitudes, consequently causing erosion and damage to the ecosystem and private properties.

On the RS coast, high wave energy and high SL associated with the passage of cold fronts and spring tides can change the characteristics of the superficial beach sediment, but they can also cause beach erosion and dune retreat at rates of the order of dozens of cubic meters and several meters, respectively (Siegle and Calliari, 2008). Since it is located near one of the cyclogenetic regions in South America (Parise et al., 2009), it is regularly subjected to the occurrence of storms associated with frontal systems and extra-tropical cyclones. According to da Motta et al. (2015), the RS coastal zone is dominated by waves and the regional processes of erosion and deposition are primarily controlled by the alongshore wave energy flux on the beach. These authors found that the results from 22-year temporal analysis of shoreline movement mapping showed strong erosional processes mainly in the central portion of the coast.

Some of these meteorological systems propagate along the coast, maintaining intensity and persistence. This factor, combined with the incidence of southwesterly and northeasterly alongshore winds, induce shelf waves that can spread and reach the southern Brazilian region first, then moving to southeastern Brazil (Castro and Lee, 1995). This phenomenon

is neither spatially nor temporally independent since an extreme event in the south would enable the prediction of what will occur further north (Campos et al., 2010).

Finally, in the context of climate change (Mawdsley et al., 2014; PBMC, 2016) and increased occupation of coastal areas (Small and Nicholls, 2003), disregarding the pure drive for scientific knowledge, it is essential to study SL oscillations over the time scales of astronomical tides and those driven by meteorological forcing.

5. CONCLUSIONS

A mean tidal range equal to 0.31m and a subtidal oscillation average of 0.37m were found based on a long SL time series with more than 650 days. As those averages are very similar, a new perspective on SL oscillations in Southern Brazil is presented, concluding that it is important to consider the astronomical tidal oscillations in future studies on Tramandaí Beach and in surrounding areas. The relative importance of tidal and subtidal movements depends on the season. Generally, it can be stated that subtidal oscillations are more intense in the autumn. Spectral analysis and cross correlations between the alongshore wind and SL indicated a clear relationship of meteorological driving mechanisms and subtidal oscillations. A relatively short time lag between wind activity and the subsequent SL response demonstrates a fast wind action on the water SL dynamics. The passage of intense extra-tropical atmospheric systems with northeastward winds associated with spring tides and waves that have a significant height above average can increase the SL up to 3.2m, causing severe damage to private properties and extensive coastal erosion in the region.

6. ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank CAPES for funding oceanographic campaigns (Edital Ciências do Mar II 43/2013) and for the Doctoral Scholarship destined to the first author. We also thank the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) for providing meteorological data. The authors are grateful to MSc. Orozco for the English review and to the Reviewer for the careful reading of the manuscript and his or her valuable comments and suggestions.

7. REFERENCES

ANDRADE, M. M., TOLDO Jr, E. E. & NUNES, J. C. 2016. Variabilidade das correntes na plataforma interna ao largo de Tramandaí (RS) durante o verão de 2014. *Pesquisas em Geociências*, 43, 289-298.

- CAMPOS, R. M., DE CAMARGO, R. & HARARI, J. 2010. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as re-análises do modelo do NCEP no Sudoeste do Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, 175-184.
- CASTRO, B. M. & LEE, T. N. 1995. Wins-forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100, 16045-16056.
- CAVALCANTI, I. F. A. & KOUSKY, V. E. 2009. Frentes frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A., FERREIRA, N. J., JUSTI DA SILVA, M. G. A. & SILVA DIAS, M. A. F. (eds.) Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos.
- CLARA, M. L., SIMIONATO, C. G., D'ONOFRIO, E. & MOREIRA, D. 2015. Future Sea Level Rise and Changes on Tides in the Patagonian Continental Shelf. *Journal of Coastal Research*, 31, 519-535.
- COSTA, R. & MÖLLER, O. O. 2011. Estudo da estrutura e da variabilidade das correntes na área da plataforma interna ao largo de Rio Grande (RS, Brasil), no sudoeste do Atlântico Sul, durante a primavera-verão de 2006-2007. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 11, 273-281.
- DILLENBURG, S. R., TOMAZELLI, L. J. & BARBOZA, E. G. 2004. Barrier evolution and placer formation at Bujuru southern Brazil. *Marine Geology*, 203, 43-56.
- DA MOTTA, L. M., TOLDO Jr, E. E., ALMEIDA, L. E. B. & NUNES, J. C. 2015. Sandy sediment budget of the midcoast of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Marine Research*, 73, 49-69.
- DOTTORI, M. & CASTRO, B. M. 2009. The response of the Sao Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds. *Ocean Dynamics*, 59, 603-614.
- DOTTORI, M., & CASTRO, B. M. 2018. The role of remote wind forcing in the subinertial current variability in the central and northern parts of the South Brazil Bight. *Ocean Dynamics*, 68, 677-688.
- EKMANN, V. W. 1905. On the influence of earth's rotation on ocean currents. *Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik*, 2, 51-52.
- ESCOBAR, G. C. J., SELUCHI, M. E. & ANDRADE, K. 2016. Synoptic classification of cold fronts associated with extremes rainfall over the east of Santa Catarina state. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31, 649-661.
- FIORE, M. M. E., D'ONOFRIO, E. E. & POUSA, J. L. 2009. Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. *Continental Shelf Research*, 29, 1643-1649.
- GERMANI, Y. F., FIGUEIREDO, S. A., CALLIARI, L. J. & TAGLIANI, C. R. A. 2015. Vulnerabilidade costeira e perda de ambientes devido à elevação do nível do mar no litoral sul do Rio Grande do Sul. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 15, 121-131.
- GUIMARÃES, P. V., FARINA, L., TOLDO Jr, E. E., DIAZ-HERNANDEZ, G. & AKHMATSKAYA, E. 2015. Numerical simulation of extreme wave runup during storm events in Tramandaí Beach, Rio Grande do Sul, Brazil. *Coastal Engineering*, 95, 171-180.
- JUNG, G. B. & TOLDO Jr, E. E. 2011. Longshore current vertical profile on a dissipative beach. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29, 691-701.
- MACHADO, A. A. & CALLIARI, L. J. 2016. Synoptic Systems Generators of Extreme Wind in Southern Brazil: Atmospheric Conditions and Consequences in the Coastal Zone. *Journal of Coastal Research*, 75, 1182-1186.

- MARONE, E. & CAMARGO, R. 1994. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: o evento de 18 de agosto de 1993. *Nerítica (Curitiba)*, 8, 73-85.
- MAWDSLEY, R. J., HAIGH, I. D. & WELLS, N. C. 2014. Global changes in mean tidal high water, low water and range. *Journal of Coastal Research*, 70, 343-348.
- MIRANDA, L. B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*, São Paulo, Edusp.
- MÖLLER, O. O., CASTAING, P., FERNANDES, E. H. L. & LAZURE, P. 2007. Tidal frequency dynamics of a southern Brazil coastal lagoon: choking and short period forced oscillations. *Estuaries and Coasts*, 30, 311-320.
- PARISE, C. K., CALLIARI, L. J. & KRUSCHE, N. 2009. Storm surges and beach erosion in southern Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57, 175-188.
- PAWLOWICZ, R., BEARDSLEY, B. & LENTZ, S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28, 929-937.
- PBMC (PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS), MARENGO, J. A. & SCARANO, F. R. (eds.). 2016. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro, COPPE - UFRJ.
- PUGH, D. T. 1987. *Tides, Surges, And Mean Sea-Level*, Chippingham, Antony Rowe Ltd.
- ROCHA, R. S., TOLDO Jr, E. E. & WESCHENFELDER, J. 2015. Delimitação do terreno de marinha: estudo de caso no litoral do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Cartografia*, 67, 1723-1731.
- SARAIVA, J. M. B., BEDRAN, C. & CARNEIRO, C. 2003. Monitoring of storm surges on Cassino Beach, RS, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 35, 323-331.
- SCHEFFNER, N. W. 2008. "Water Levels and Long Waves". Coastal Engineering Manual, Chapter 5, Part II. Engineer Manual 1110-2-1100. Washington, U. S. Army Corps of Engineers.
- SIEGLE, E. & CALLIARI, L. J. 2008. High-energy events and short-term changes in superficial beach sediments. *Brazilian Journal of Oceanography*, 56, 149-152.
- SILVA, A. F., TOLDO Jr, E. E. & WESCHENFELDER, J. 2017. Morfodinâmica da desembocadura da Lagoa de Tramandaf (RS, Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 44, 155-166.
- SMALL, C. & NICHOLLS, R. J. 2003. A Global Analysis of Human Settlement in Coastal Zones. *Journal of Coastal Research*, 19, 584-599.
- SOARES, I. & MÖLLER, O. O. 2001. Low-frequency currents and water mass spatial distribution on the southern Brazilian shelf. *Continental Shelf Research*, 21, 1785-1814.
- SOARES, I. D., KOURAFALOU, V. & LEE, T. N. 2007. Circulation on the western South Atlantic continental shelf: 2. Spring and autumn realistic simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112, C04003.
- THOMPSON, R. O. R. Y. 1983. Low-Pass Filters to Suppress Inertial and Tidal Frequencies. *Journal of Physical Oceanography*, 13, 1077-1083.
- TOLDO Jr, E. E., ALMEIDA, L. E. S. B., NICOLODI, J. L., ABSALONSEN, L. & GRUBER, N. L. S. 2006. O controle da deriva litorânea no desenvolvimento do campo de dunas e da antepraia no litoral médio do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 33, 35-42.
- TRUCCOLO, E. C., FRANCO, D. & SCHETTINI, C. A. F. 2006. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 39, 547-552.
- VALENTIM, S. S., BERNARDES, M. E. C., DOTTORI, M. & CORTEZI, M. 2013. Low-frequency physical variations in the coastal zone of Ubatuba, northern coast of São Paulo State, Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 61, 187-193.
- VIANNA, H. D. & CALLIARI, L. J. 2015. Variabilidade do sistema praia-dunas frontais para o litoral norte do Rio Grande do Sul (Palmares do Sul a Torres, Brasil) com o auxílio do Light Detection and Ranging - Lidar. *Pesquisas em Geociências*, 42, 141-158.
- VILLWOCK, J. A. & TOMAZELLI, L. J. 1995. *Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. Notas Técnicas*. Porto Alegre, CECO, Instituto de Geociências, UFRGS.
- WELCH, P. 1967. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15, 70-73.
- WILLIAMS, S. J. 2013. Sea-Level Rise Implications For Coastal Regions. *Journal of Coastal Research*, 63, 184-196.
- WRIGHT, J., COLLING, A. & PARK, D. 1999. *Waves, tides, and shallow-water processes*, Houston, Gulf Professional Publishing.
- ZAVIALOV, P., MÖLLER Jr, O. O., CAMPOS, E. 2002. First direct measurements of currents on the continental shelf of Southern Brazil. *Continental Shelf Research*, 22, 1975-1986.

CAPÍTULO 4

CIRCULATION IN THE SHALLOW WATERS FROM THE NORTHERN COAST OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL, A WAVE-DOMINATED SYSTEM

Artigo enviado para publicação no periódico *Ocean Dynamics* em 08/12/2018. O conteúdo submetido é apresentado com ajustes na formatação a fim de melhorar a apresentação do mesmo. A seguir é apresentado cópia do e-mail de recebimento do manuscrito pela revista.



ODYN-D-18-00192 - Ocean Dynamics: Submission Confirmation for CIRCULATION IN THE SHALLOW WATERS FROM THE NORTHERN COAST OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL: A WAVE-DOMINATED SYSTEM

ODYN Editorial Office <em@editorialmanager.com>

8 de dezembro de 2018 18:00 Responder a:

ODYN Editorial Office <xavier.castanos@springernature.com>

Para: Mauro Michelena Andrade <mauromichelena@gmail.com>

Dear Mr. Andrade,

Your submission entitled "**CIRCULATION IN THE SHALLOW WATERS FROM THE NORTHERN COAST OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL: A WAVE-DOMINATED SYSTEM**" has been received by journal *Ocean Dynamics*.

The submission id is: OLYN-D-18-00192

Please refer to this number in any future correspondence.

You will be able to check on the progress of your paper by logging on to Editorial Manager as an author. The URL is <https://odyn.editorialmanager.com/>.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Editorial Office *Ocean Dynamics*

PS: If there would be any concern regarding authorship, please contact the Editorial Office.

Now that your article will undergo the editorial and peer review process, it is the right time to think about publishing your article as open access. With open access your article will become freely available to anyone worldwide and you will easily comply with open access mandates. Springer's open access offering for this journal is called Open Choice (find more information on www.springer.com/openchoice). Once your article is accepted, you will be offered the option to publish through open access. So you might want to talk to your institution and funder now to see how payment could be organized; for an overview of

available open access funding please go to www.springer.com/oafunding. Although for now you don't have to do anything, we would like to let you know about your upcoming options.

Recipients of this email are registered users within the Editorial Manager database for this journal. We will keep your information on file to use in the process of submitting, evaluating and publishing a manuscript. For more information on how we use your personal details please see our privacy policy at <https://www.springernature.com/production-privacy-policy> or email dataprotection@springernature.com. If you no longer wish to receive messages from this journal or you have questions regarding the Editorial Manager database and the publishing process, please email our publication office, stating the journal name(s) and your email address(es): PublicationOfficeSPI@springernature.com

In compliance with data protection regulations, please contact the publication office if you would like to have your personal information removed from the database.

**SHALLOW-WATER CIRCULATION ON THE NORTHERN COAST OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL: A WAVE-
DOMINATED SYSTEM**

Mauro Michelena Andrade¹, Elírio E. Toldo Jr.¹, Pedro Veras Guimarães², Nicolas de Assis Bose¹

Affiliations:

1. Programa de Pós-Graduação em Geociências - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - 91501-970 - Brazil).
2. DOPS/HOM/REC - Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) (13 rue du Chatellier, Brest, 29200, France).

Abstract

The surf zone is a highly dynamic transitional environment between the marine and terrestrial systems. Among its main driving forces are the ocean circulation in shallow waters and the bottom morphodynamics. Two databases sampled in the field were used to investigate the behavior of alongshore currents in this region. The first one, acquired during oceanographic moorings, was composed of long time series of waves, current velocities, and sea level. The other database corresponded to direct measurements of velocities and direction of alongshore currents in the surf zone, both simultaneously acquired for the first time in this coastal region. The dataset allowed us to identify and quantify the processes associated with incident waves, sea level oscillations and winds. Their role as forces driving alongshore currents was also studied with applications in the development of a conceptual hydrodynamic model of the coastal drift for the northern coast of the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The circulation of currents driven by wave breaking in the surf zone was analyzed as a result of the radiation-stress energy flow. The findings indicated that waves are the main driving force of alongshore currents. A pattern of waves that came from the southeast (SE) and northeast (NE), generating northeasterly and southwesterly fluxes, respectively, was also identified.

Keywords: Radiation stress, Momentum flux alongshore, Surf-zone hydrodynamics, Field direct measurements, AWAC mooring.

1. Introduction

The coastal environment that makes the transition between the continental shelf and the continent – the beach – is one of the most dynamic physical systems on the surface of the Earth. It is a temporary geological feature driven by waves at a dynamic equilibrium, and can be defined as a wave-deposited accumulation of sediments. The beach system extends from the point where waves begin to undergo transformations due to the change of depth until the limit of their influence on the continent, which may be associated with a cliff, dune, or permanent vegetation (Short 1999).

Waves play an important role in the formation of coastal features (Calliari et al. 2006). When approaching shallow-water regions, the waves undergo transformations due to reflection, refraction, diffraction, and wave breaking. These phenomena result in the establishment of coastal circulation patterns that are fundamental for the sediment transport on the coast. Refraction occurs when the propagation of wave crests towards shallow waters is not parallel to the beach line, which will consequently force the wave crest alignment (Wright et al. 1999).

Another mechanism associated with the oblique angle at which waves approach the coastline occurs at the moment of wave breaking. This process produces an energy vector that drives an alongshore current within the surf zone (Davis Jr. and Fitzgerald 2004). It always takes place when the incidence of waves is oblique in relation to the shoreline, and will be mainly controlled by the height and angle of wave incidence. This energy vector is defined as a radiation-stress flow that may be transverse to the wave-propagation movement (Longuet-Higgins 1962, In: Komar 1976) and drives the alongshore current, which is characteristic of each environment and can coexist with tide- and wind-driven currents. In addition to the mentioned mechanisms, this current may depend on the slope of the beach bottom, bottom friction, and wind (Nielsen 2009).

This circulation by currents in the surf zone is an extremely dynamic process responsible for transporting the sediments reworked by wave breaking and that are in suspension and on the bottom (U. S. Army 1984). The transport driven by these currents is the called coastal drift. The large turbulence associated with wave breaking allows the alongshore transport of enormous amounts of sediments by drag or suspension through

long distances (Araújo and Alfredini 2001). Understanding this process is very important for the management of coastal environments, especially those that are urbanized.

Carter and Woodroffe (1994) reported that, although studies on the evolution of coastal environments have been carried out, significant and generalized events of sedimentary loss are frequent and consequently have limited the human occupation space along the coastlines in the last decades. This indicates that there is still a need to study the processes and causes of these events as a way to support technical solutions for the preservation of densely occupied areas. Reinforcing this point, the relative role of the different physical processes and their coupling as a force that drives the sediment transport across the continental shelf remains poorly understood in some regions. This is due to the lack of simultaneous field observations at different depths (Torres-Freyermuth et al. 2017).

Furthermore, there is a significant upward trend in the mean sea level at various points around the world – including sites on the Brazilian coast (PBMC 2016) – as well as an intensification of extreme events of sea level over-elevation (Neves Filho 1992; Mawdsley et al. 2014). These effects would be more damaging if the height and duration of storms increased as a result of climate change as demonstrated in Fiore et al. (2009). In this scenario, coastal regions around the world should, in general, become more vulnerable (Cartier et al. 2013).

The coast from the state of Rio Grande do Sul (RS) is an example of a highly vulnerable area to the mean sea level rise in the future due to its intrinsic morphodynamic characteristics, such as its low coastal gradient combined with a high degree of exposure to oceanic dynamics (Germani et al. 2015). Moreover, some processes associated with hydrodynamics, geomorphology, and sediment movement represent coastal hazards and risks along the state's coastline. The risks imply coastal erosion, habitat loss, and environmental changes. The hazards are related to major accidents that could happen with coastal users, including fatalities (Calliari et al. 2010).

Over the last six decades on the RS coast, several studies have been carried out on coastal currents and sediment transport (Motta 1964, 1967; Pitombeira 1975; Tomazelli and Villwock 1992; Toldo et al. 1993; Lima et al. 2001; Lélis 2003; Toldo et al. 2003; D'Aquino 2004; Toldo et al. 2006a; Jung et al. 2011, 2012; Motta et al. 2015; Silva et al.

2017; Schossler et al. 2017; Sprovieri et al. 2018). These studies used several methodologies ranging from the most empirical – applying drifters and chronometers – to the most sophisticated ones – using oceanographic instrumentation and numerical computational modeling.

However, no study has attempted to explain the dynamic process that causes the coastal current. The lack of a modern methodology to quantitatively observe such processes was also explicit. In addition, divergences in the findings with respect to the direction of the alongshore current – especially in the first conducted research works – raise uncertainties, and some questions even arise from the most recent works: can the applied techniques or the analyzed periods have yielded wrong results and conclusions? Can the regional anthropogenic activities and global climate change be changing wave patterns and consequently the magnitude and direction of alongshore currents?

The wave climate on the northern RS coast is the main force responsible for sediment transport in the surf zone (Dillenburg et al. 2004; Calliari and Toldo 2016). Therefore, the circulation in this system must be known for a better adjustment of the models of coastal sedimentary dynamics. However, research works using suitable equipment and methodology for the measurement of vertical profiles of current speed and direction in the surf zone are scarce due to the inherent difficulties of such turbulent region. The study and acquisition of long time series of simultaneous data of the driving forces in order to compare them to alongshore currents are rare not only in the study area, but in the whole world (Torres-Freyermuth et al. 2017) .

The scarcity of long time series was modified in 2013 when the nearly uninterrupted monitoring of waves, currents, sea level, and water temperature by oceanographic moorings off Tramandaí beach started. Furthermore, a new methodology for the acquisition of vertical profiles of current speeds and direction within the surf zone began to be used. It should be highlighted that this is the first time that long and consistent time series and also appropriate equipment for measurements were available.

The main objective of this work is to relate data of alongshore currents measured in the surf zone to their main driving forces in shallow waters: waves and winds. With that, we aim at improving the understanding of coastal drift hydrodynamics and also at generating a

basic conceptual model of shallow-water circulation for the RS northern coast, an environment that presents great complexity.

Study area

The South Brazilian Continental Shelf (SBCS), located between Santa Marta Cape (29° S) and Chuí (34° S), extends until the 180-m isobath and is 110 km and 170 km wide in the northern and southern portions, respectively (Calliari et al. 2009; Hartmann 1996). The bottom slope is between 0.03° and 0.08°, which is considered mild (Toldo et al. 2006a). The RS coastline is approximately 620 km long and has a northeast-southwest orientation. It presents a smoothly undulating pattern, no retractions, and is characterized by a continuous barrier that has only two permanent discontinuities: the mouths from Patos Lagoon and Tramandaí Lagoon (Dillenburg et al. 2004). This barrier consists of sandy oceanic beaches that are between 50 and 100 meters wide with slopes between 3° and 5° (Fachin 1998).

The precise location of the study area encompasses the northern portion of the RS coastline (Fig. 1), more precisely the inner shelf and the surf zone regions off Tramandaí city. This part of the coast makes a regional angle of 20° relative to the True North. The foreshore is broad and shallow and has an outer boundary between 10 and 15 m deep (Toldo et al. 2006b). Tramandaí beach presents a low gradient and varies between intermediate to dissipative, mostly having two or more wave breaking lines. Large sandy banks are arranged along the shore in a bar-trough structure (Toldo et al. 2006b). The bottom consists of well-selected fine sandy sediments.

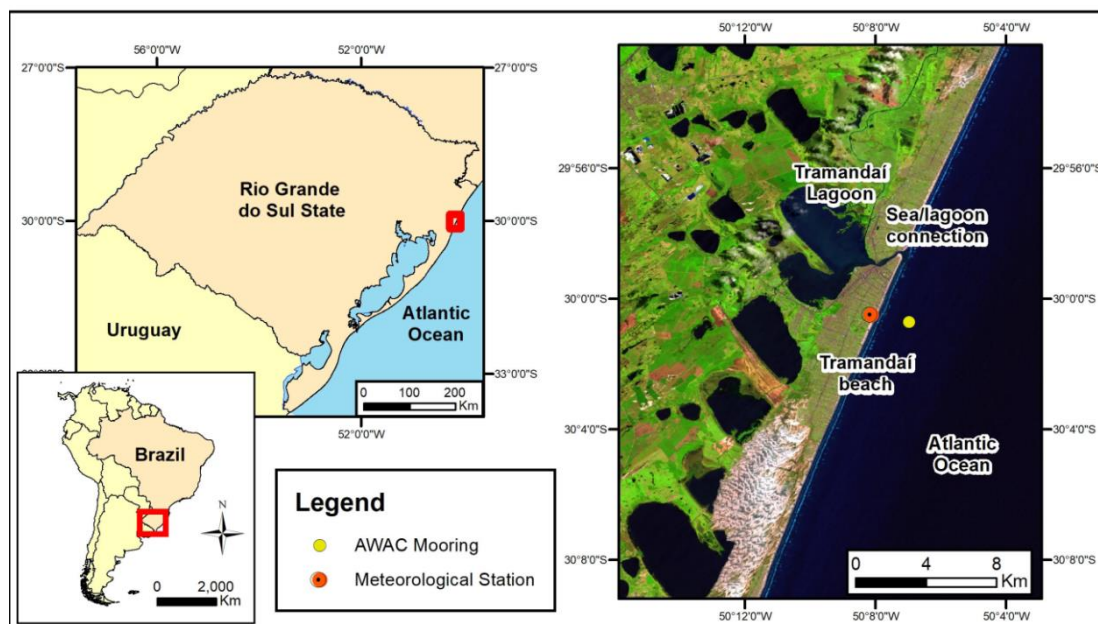


Fig. 1 Location of the coastal zone from the northern portion of the state of Rio Grande do Sul (RS) and the lagoon morphological details surrounding Tramandaí beach. Yellow and red circles represent the location of AWAC Mooring and the Meteorological Station, respectively.

The waves reaching the shore from the northern RS coast are generated in the south of the Atlantic Ocean at around 60° of latitude. The waves from the northeast (NE) are driven by the local wind that prevails in the summer and spring. Except for the passage of meteorological systems, the sea agitation is characterized by waves of medium to high energy with a significant height of 1.5 m and period between 7 and 9 s (Strauch et al. 2009).

The closing depth of 7.5 m was calculated based on two sets of wave data sampled in 1963 and 1996 on the northern coast of the state (Almeida et al. 1999). Motta et al. (2009) analyzed the wave data acquired between 2006 and 2007 by a *Datawell* waverider buoy moored at 17 m deep off Tramandaí. In that work, a bidirectionality of the direction of wave incidence was identified. A seasonality of the coastal sediment drift associated with the seasonality of the angles of wave incidence was calculated using numerical models.

One of the pioneering research works on the measurement of current velocities in the surf zone using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) was performed by Jung et al. (2011). The wave parameters were estimated visually. The interaction between the wave climate and the circulation within the surf zone described a bidirectional alongshore current, as well as a great variability of the intensity of currents for the Tramandaí beach

region. In the same region but using a database of only surface alongshore current directions (observed visually once a day for 4 years), Jung et al. (2012) found a seasonality in the current direction. In the summer and spring months, the flow was southwestward, while in the winter and fall, the northeastward currents predominated. However, an annual bidirectional pattern with no predominance was identified, i.e., the annual resulting coastal drift can be towards the southwest (SW) or NE (Nicolodi et al. 2000). Still using this data of surface currents, a correlation between the direction of wave incidence and the alongshore current was identified.

The studies from Zavialov et al. (2002), Costa and Möller (2011) and Andrade et al. (2016) reported a wind-driven circulation of currents on the continental shelf that was influenced by the passage of meteorological systems. Predominantly barotropic low-frequency flows were also verified, presenting residual currents to the NE or SW whose direction depended on the season. Another oceanographic process identified on the RS coast is the so-called upwelling and downwelling near the coast. This phenomenon was first suggested in the work of Calliari and Fachin (1993) and briefly described in Costa (2009). Andrade et al. (2016) described the mechanism of coastal upwelling and downwelling in a region close to the coast (14 m deep) by analyzing the wind and current directions and the variations in water temperature and sea level.

The astronomical tide on Tramandaí beach is mixed with a semi-diurnal predominance and is classified under a microtidal regime, presenting mean amplitude of 0.31 m and maximum height of 0.96 m (Andrade et al., 2018). This small mean tidal amplitude occurs due to the proximity to an amphidromic point in the South Atlantic and also by the rectilinear configuration of the coastline, showing no irregularities that could amplify the tidal amplitudes by resonance or convergence effects (Villwock and Tomazelli, 1995). However, when the maximum amplitudes driven by the meteorological and astronomical forces are added, values higher than 1.2 m above the mean sea level are recorded without taking the wave run-up effects into consideration (Andrade et al., 2018).

Regarding the wind regime, northeasterly winds prevail throughout the year, but periodic reversals into the SW direction are observed during the passage of meteorological systems, which are more frequent in the fall and winter (Cavalcanti and Kousky 2009).

Previous studies (Barros et al. 2002; Piola et al. 2005) showed that the wind field also presents a large interannual variability associated with El Niño–Southern Oscillation events. During El-Niño years, the northeasterly winds prevail, whereas the frequency of southwesterly winds is higher during La-Niña years when compared to what is regularly observed.

2. Material and methods

The alongshore current driven by radiation stress is particular to each environment and it generally depends on the bottom slope and height and angle of wave incidence (Longuet-Higgins 1970). However, in certain places and situations, wind and sea level oscillations must be considered (Nielsen 2012). Thus, time series of the driving forces (waves, wind, and sea level) were acquired along with measurements of the alongshore current in the surf zone.

The methodology used in the acquisition of the driving forces will be described below, where: oceanographic data correspond to the wave parameters and sea level oscillations recorded on the inner shelf at 14 m deep; when there was a lack of measured wave data, the time series were supplemented by the results from numerical simulations performed with the WAVEWATCH III model (Tolman et al. 2009, hereinafter abbreviated as WW3); the wind data were measured near the data sampling site by the INMET weather station. The methods used to conduct alongshore current measurements are described in the sub-item 2.1.4. Data processing and validation of WW3 results are discussed in subchapters 2.2. and 2.3. In the last sub-item 2.4, the performed analyses between the driving forces and the alongshore current are presented.

2.1. Data acquisition

2.1.1. Oceanographic data

One of the databases used in the development of this work was sampled by five oceanographic moorings distributed over time between December 17, 2013 and September 8, 2017 (Table 1). The same instrument was installed on each of them, which was an Acoustic Waves and Currents Profiler (1-MHz Nortek/AWAC). These moorings acquired all the wave parameters; however, we will use the following variables in this study: significant wave height, peak period, and mean direction. The vertical profile of currents and sea level

were also measured. On the first two moorings, the instrument was installed at 11 m deep and in the last three at 14 m deep. The distance between those two sites was not greater than 400 m. The sampling configurations varied among the moorings, but always met the quality standards (described in section 2.2) established for the acquisition of reliable data (Table 1).

Table 1 Sampling periods, season and mooring depth of the oceanographic moorings located on Tramandaí beach

Mooring	Start date	End date	Season	Depth (m)
#1	12/17/2013	03/13/2014	Summer	12
#2	06/24/2014	04/27/2015	Winter/Spring/Summer	12
#3	04/27/2015	07/30/2015	Autumn	14
#4	01/19/2016	06/21/2016	Summer/Autumn	14
#5	05/06/2017	09/08/2017	Autumn/ Winter	14

The initial calculation of the battery duration from mooring #5 was equal to 6 months (until November 2017), but the battery died before that (in September 2017). This event made it impossible to compare the wave data to the alongshore current data measured in the surf zone during September and October. Therefore, the results from the WW3 numerical simulations – described in the following item – were used.

2.1.2. WW3 model results

The third-generation WAVEWATCH III model (Tolman 2009), version 5.16, was used to generate wave data for the two periods in which there were no AWAC measurements. This model has been extensively used to perform hindcasting on global and regional scales (Chawla et al. 2013; Rascle and Ardhuin 2013; Durrant et al. 2014). The WW3 wave-generation model is governed by the wave-action balance equation as a function of wave frequency (f) and direction (θ), consisting of functions that vary in space (x) and time (t). It can be written as (Equation 1):

$$\frac{DF(K,\theta,x,t)}{Dt} = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} + S_{bot} + S_{tr} \quad \text{Eq. 1}$$

where F is the directional frequency spectrum of the wave and DF/Dt is the material derivative of that spectrum. The main inputs are: S_{in} , which describes wind-driven waves (Ardhuin et al. 2010); S_{ds} , which provides the parameterization of wave dissipation caused by breaking and turbulence in shallow and deep waters (Ardhuin et al. 2010); S_{nl} , which

represents the non-linear transformations of the wave spectrum by discrete approximation (DIA, Hasselmann et al. 1985); the bottom friction term is described by the JONSWAP linear parameterization (Hasselmann et al. 1973) and is represented by S_{bot} . The coefficients of these parameters follow test 471 from Ardhuin et al. (2010), which obtained a better modeled representation of the reality.

The simulation was performed on a non-structured numerical grid that covers the entire SBCS. This grid scheme allows a more refined resolution towards the coast, reaching up to approximately 700 m from the coastline (Fig. 2). Thus, it is possible to optimize the wave model execution time in the open ocean and at the same time to have a better discretization of the bathymetric grid and wave field in shallow and intermediate waters without losing information by grid nesting. The bathymetric database for this grid is the same as the one used by Guimarães et al. (2014), which in shallow and intermediate waters is composed of a set of observational data extracted from nautical charts.

The boundary condition of the local prediction model comes from a spectral nesting from another global simulation also performed using the WW3 model, which had a spatial resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ and an hourly boundary data update for the local grid. Both global and regional grid simulations were forced by the same wind field from the reanalysis project from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) forecasting center, generated in a $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ spatial resolution grid every 3 hours. For a better representation of the waves at the poles, an ice concentration mask with a $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ resolution was used in the global model. It was updated daily and obtained using the high resolution algorithm from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

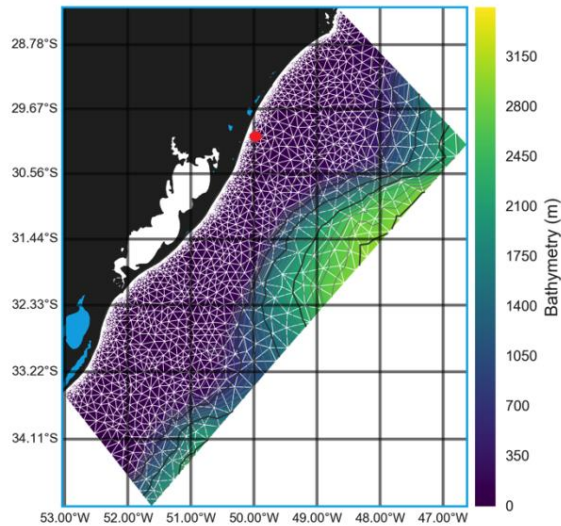


Fig. 2 Unstructured grid with the respective SBCS bathymetry. The spatial resolution of the domain increases as the depth decreases. Red circle represent location of the AWAC Mooring and data extraction point

2.1.3. Wind data

The data of wind direction and intensity were sampled by a *Vaisala* MAWS 301 automatic weather station that was installed and maintained by the Brazilian National Institute of Meteorology (INMET). The station is located on land at a little more than 2 km away from the mooring site in an obstacle-free area. The sensors were positioned at 10 m above the ground. The data were sampled every minute and integrated into an hourly time interval.

2.1.4. Alongshore current measurements in the surf zone

The data of alongshore current velocity and direction were acquired in six field campaigns during the same period of the moorings (Table 2). A 1-MHz Nortek Aquadopp current profiler with a right-tangle head was used. This equipment was launched from the Tramandaí Fishing Platform, which is 1.5 km away from the AWAC mooring site described in section 2.1.1.

The Aquadopp was positioned on the bottom in the region between banks, i.e., in the alongshore channel in the surf zone. The location of this channel was defined by a bathymetry performed with a plumb line during each campaign. As measurements were taken from the shoreline to the end of the fishing platform, topographic profiles of the surf zone were generated. A portable GPS system was used to obtain the planimetric

coordinates and the bathymetric data (depth) were saved in a table.

Table 2 Periods of the field campaigns of alongshore current measurements carried out from the Tramandaí Fishing Platform. The wave data source (AWAC or WW3) is also shown

Campaign	Start date	End date	Season	Data source
#1	12/05/2014	12/06/2014	Spring	AWAC
#2	05/12/2015	05/13/2015	Autumn	AWAC
#3	01/28/2016	01/28/2016	Summer	AWAC
#4	05/05/2016	05/06/2016	Autumn	AWAC
#5	09/19/2017	09/24/2017	Winter	WW3
#6	10/14/2017	10/16/2017	Spring	WW3

The current measurements in the channel were taken at the same instant as the moored AWAC wave measurements, i.e., every 3 hours during daytime periods in campaigns that lasted from one to four days. A 10- to 20-minute period of current velocity acquisition was established.

2.2. Data treatment

The first step in processing the AWAC and Aquadopp data was the evaluation of data quality using the Storm software from Nortek. In this step, the angle of the sensors in relation to the bottom was verified. The magnetic declination was added to correct the orientation of wave direction data. The relationship between the acoustic signal and the signal-to-noise ratio was checked.

The files – generated by the Storm in a text format – containing the wave parameters (H_s , Dir , and T_p) measured by the AWAC, and the current speed and direction measured by the Aquadopp, were imported into mathematical programs for analysis. In this step, the data consistency was verified and the spikes were eliminated. The data sampled when the instrument had an inclination higher than 20° were also excluded since large angles cannot be corrected (Nortek 2013). Finally, the time periods corresponding to the alongshore current measurements in the channel were selected.

With the Aquadopp data, the intensity of the alongshore current velocity was determined by the mean of the vertical profiles. Thus, the mean profile is obtained and also a mean velocity value for each record. These mean values were calculated based on a complete measurement, i.e., a 10-minute mean of the current intensity. The current

directions were obtained by calculating the mode of the directions. These procedures were followed because the currents in the surf zone have an enormous variability both in intensities and directions, i.e., the currents develop in the form of "pulses". It should be highlighted that the current direction variations were up to 50° and there were no opposite directions within a measurement.

2.3. Validation of WW3 results with AWAC data

The model results generated for the same location of the AWAC mooring were validated using the 4-month data that the instrument recorded on mooring #5. The objective was to then reconstitute the sea state for the period between Sep. 8, 2017 and Oct. 10, 2017, in which the AWAC ran out of battery. The comparison between observed and simulated data of significant wave height (H_s , Fig. 3a), peak period (T_p , Fig. 3b), and mean direction (D_m , Fig. 3c) indicated that the model satisfactorily reproduces the main wave parameters in the region under study.

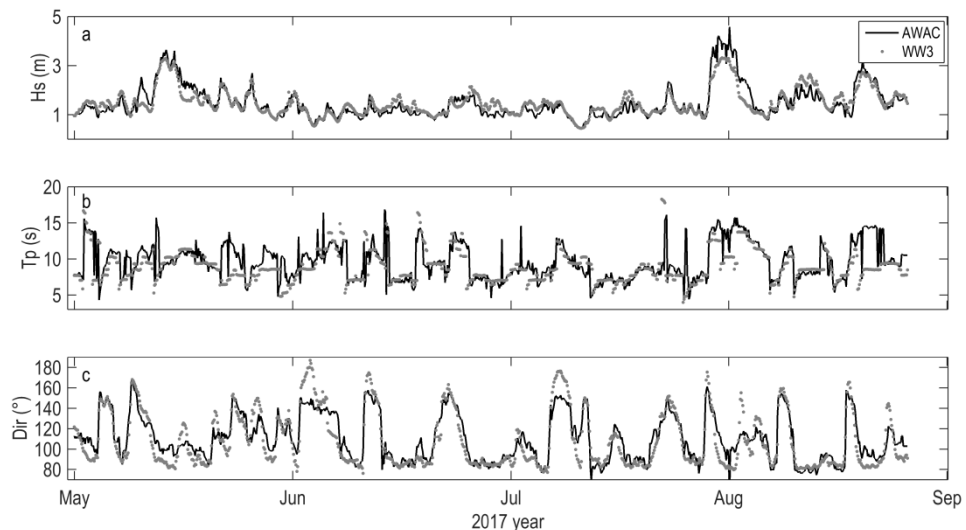


Fig. 3 Validation of AWAC model results (black) using WW3 data (dotted) for all the analyzed parameters (H_s , T_p , D_m) from 2017

The simulated and observed values were statistically compared to validate and quantify the difference between them. For this purpose, we calculated: the mean square error (RMSE), Pearson's correlation coefficient (R), and bias. These statistical variables are widely used by several authors (Perignon 2017; Guimarães et al. 2014; Ardhuin et al. 2010;

Melo et al. 2008). Table 3 presents the validation of the parameters Hs, Tp and Dm using the statistical variables mentioned above. In general, the model presented low variability of the results when compared to the AWAC data.

Table 3 Mean square error (RMSE), Pearson's correlation coefficient (R) and Bias calculated between the AWAC data and the WW3 results

	RMSE	R	Bias
Hs [m]	0.30	0.90	-0.0068
Tp [s]	0.76	0.76	-1.03
Dm [°]	8.56	0.94	-2.35

2.4. Wave and current analyses

The waves parameters (Hs, Tp, and Dm) recorded by the AWAC on the inner continental shelf and generated by the numerical model were selected to be correlated with the mean profile. The correlation was also performed with the mean alongshore current velocities considering their directions measured in the surf zone.

Using the methodology proposed in Nielsen (2012), we can calculate the momentum flux (F_m) along the coast using Equation 2:

$$Fm = \rho g H_b^2 \sin 2\alpha_b \quad \text{Eq. 2}$$

where ρ is the density of sea water, g is the acceleration of gravity, H_b^2 is the significant wave height at the wave breaking point, and α_b is the angle of wave incidence at the wave breaking point. Correlations were performed between the data measured simultaneously in the two regions (in the surf zone and mooring site).

3. Results and Discussion

3.1. Waves

Figures 4 and 5 show the time series of Hs (a), Tp (b), and Dm (c) measured by the AWAC in moorings #2 and #4, which covered the current measurement periods from field campaigns #1 to #4. Figure 6 presents the WW3 model results for the period from May to October, which covers field campaigns #5 and #6.

The field campaigns of current measurements in the surf zone are indicated by the dashed rectangles in Figures 4, 5, and 6. During the field campaigns, different sea conditions were observed: the significant wave height (Hs) was between 0.92 and 2.8 m;

the peak period (T_p) ranged from 4.7 to 16.3 sec; and the mean wave direction (D_m) was between 75° (E-NE direction) and 150° (SE-E direction). These directions can be considered as typical and are in agreement with previous studies in the region (Almeida et al. 1999; Strauch et al. 2009).

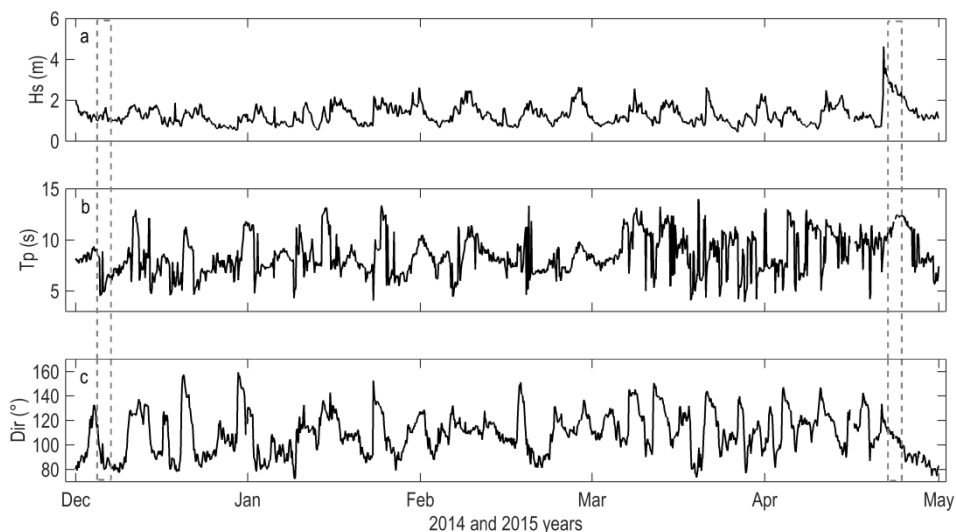


Fig. 4 Time series of the wave parameters recorded by the AWAC between December 2014 and May 2015. a) significant wave height, b) peak period, and c) mean wave direction. Dashed rectangles indicate the periods of the alongshore current measurements during the field campaigns

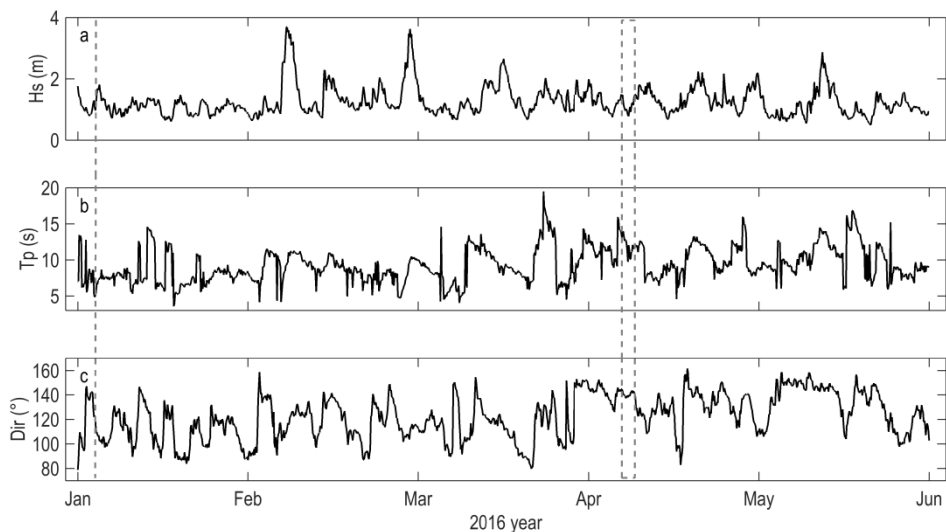


Fig. 5 Time series of the wave parameters recorded by the AWAC between January and June 2016. a) significant wave height, b) peak period, and c) mean wave direction. Dashed rectangles indicate the periods of the alongshore current measurements during the field campaigns

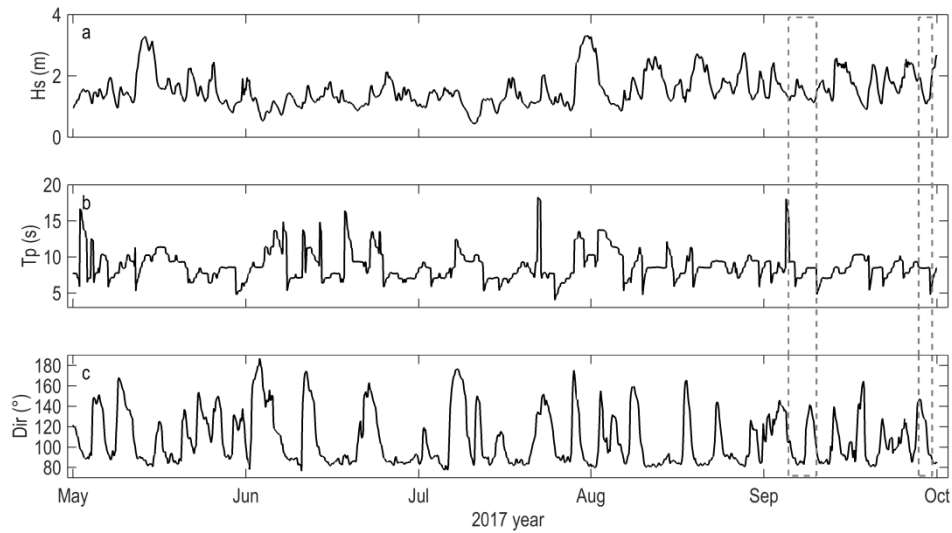


Fig. 6 Time series of the wave parameters generated by the WW3 model between May and October 2017. a) significant wave height, b) peak period, and c) mean wave direction. Dashed rectangles indicate the periods of the alongshore current measurements during the field campaigns

3.2. Alongshore currents

Four patterns of the mean vertical profile of the current velocities in the surf zone were identified (Fig. 7): a) a decreasing vertical profile, i.e., higher velocities at the surface and lower on the bottom; b) an increasing vertical profile, with lower velocities at the surface than on the bottom; c) a convex vertical profile, with higher velocities in the middle of the water column; and d) a concave vertical profile, with higher speeds at the surface and bottom of the water column. The mean alongshore current profiles of types "a" and "d" are considered as typical for this type of environment (Faria et al. 1998; Wang et al. 2002; Zhang and Zou 2012). The mean profiles with patterns "b" and "c" are associated with winds that have a direction contrary to the current, which indicates the importance of this driving force in the alongshore current dynamics within the surf zone from the beaches on the RS northern coast. The wind stress driving alongshore currents is well documented and discussed on North American and European beaches (Hubertz 1986; Ruessink et al. 2001). However, field measurements and the following interpretation of the vertical profile behavior have not been greatly explored even in the global literature.

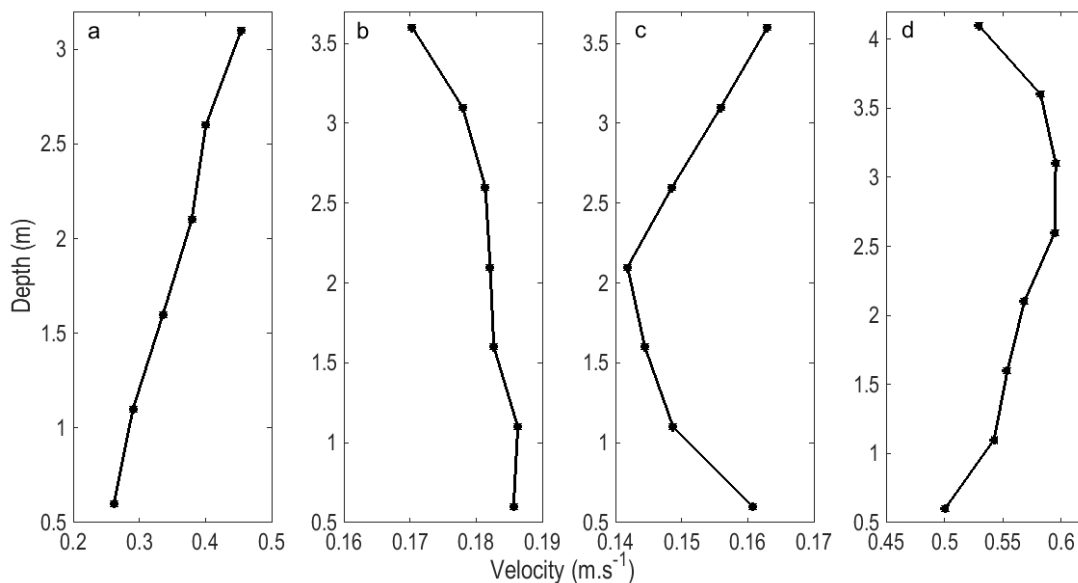


Fig. 7 Four patterns of the mean vertical profile of the alongshore current speed in module. a) decreasing profile, b) increasing profile, c) convex profile, d) concave profile

The variability of the mean vertical profile of the alongshore currents was identified in this region for the first time, and using field measurements. The influence of the wind drag on the surface layer was observed as it can be seen in Figures 7b and 7c. This driving force might be responsible for accelerating or slowing the alongshore current in the closest layer to the surface. These results disagree with what was proposed by Jung et al. (2011), who described only one type of mean profile, i.e., higher surface velocities that decrease towards the bottom.

This variation in the vertical profile of the alongshore currents influences the coastal drift transport capacity since the vertical profile of suspended sediment concentration is also not uniform (Esteves et al. 2005; Ma 2003). Therefore, coastal drift studies that consider the vertical variations of velocity and concentration of sediments suspended in the water column within the surf zone should be conducted.

3.3. Waves and currents

Figure 8 shows the relationship between the current direction data measured in the Fishing Platform (x axis) and the angle of wave incidence (y axis). All the six field campaigns were taken into account to compute the angle. Positive angles of incidence correspond to waves with directions greater than 110° (SE), negative values represent less than 110° (NE).

The yellow and red rectangles correspond to the results that agree with the theories for the formation of the alongshore current by the breaking of obliquely angled waves. That means that south-quadrant waves (positive angles) induce a northerly current, and north-quadrant waves (negative angles) drive southerly currents. However, we note a "scatter" of data points in the upper right of the graph that represents southerly currents, which are not explained by the theory. This data scattering occurred in periods of bimodal seas, i.e., coexistence of swells and sea waves. Even the waves with positive peak direction (SE) were associated with a southwesterly alongshore current. This process may be related to the distribution of energy in more than one direction in the wave spectrum.

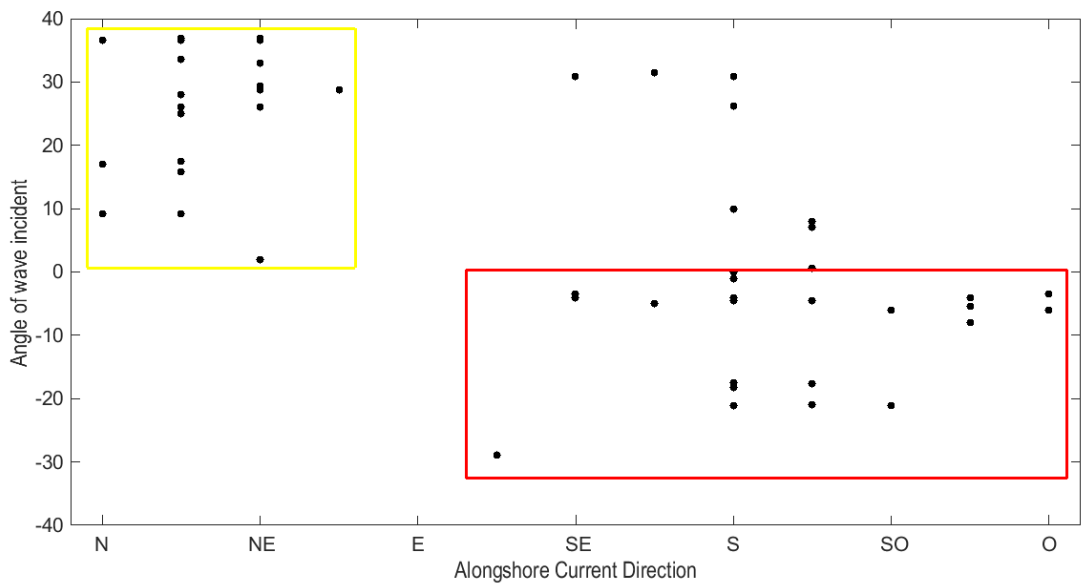


Fig. 8 Correspondence between the angle of wave incidence and the direction of the alongshore current

Figure 9 shows the relationship between the significant wave height and the mean velocity of the current measured in the region between banks. A slight tendency of increasing the current intensity was noted with increasing wave height. There is a significant correlation between H_s and the alongshore current intensity, but it is considered weak since $R = 0.34$.

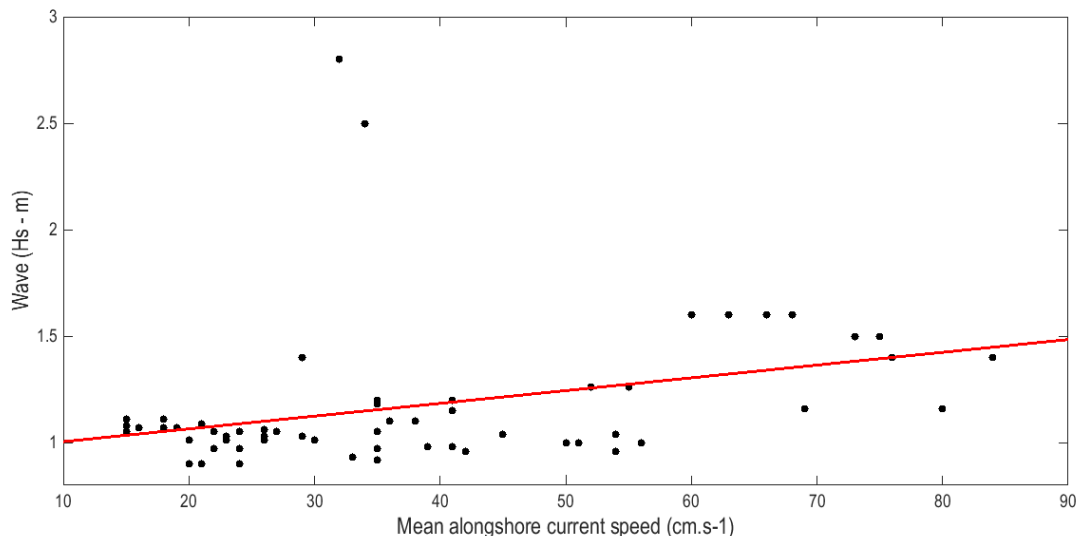


Fig. 9 Correlation between significant wave height (Hs) and intensity of the mean alongshore current in the region between banks

The comparison between the alongshore current velocity measured in the surf zone and the momentum flux along the coast was calculated using Equation 2. This equation takes into account the significant wave height and angle of wave incidence at wave breaking point. The result pointed to a strong positive correlation ($R=0.76$). This indicates that there is a concordance between the theory of radiation stress (Nielsen 2012) and the region under study.

Figure 10 is the result of the comparison between those variables. An alignment of the data points was observed, agreeing with the theory of momentum flow. However, as well as the direct comparison between the directions of waves and alongshore currents, some data points (in red, Fig. 10) diverged from what was expected (Komar 1976; Nielsen 2012). According to Feddersen (2004), the radiation stress fits perfectly in narrow-band conditions of the spectrum direction. This justifies these non-aligned data points that are associated with bimodal seas, i.e., the presence of waves from distinct quadrants (NE and SE), which characterizes a broad-band spectrum.

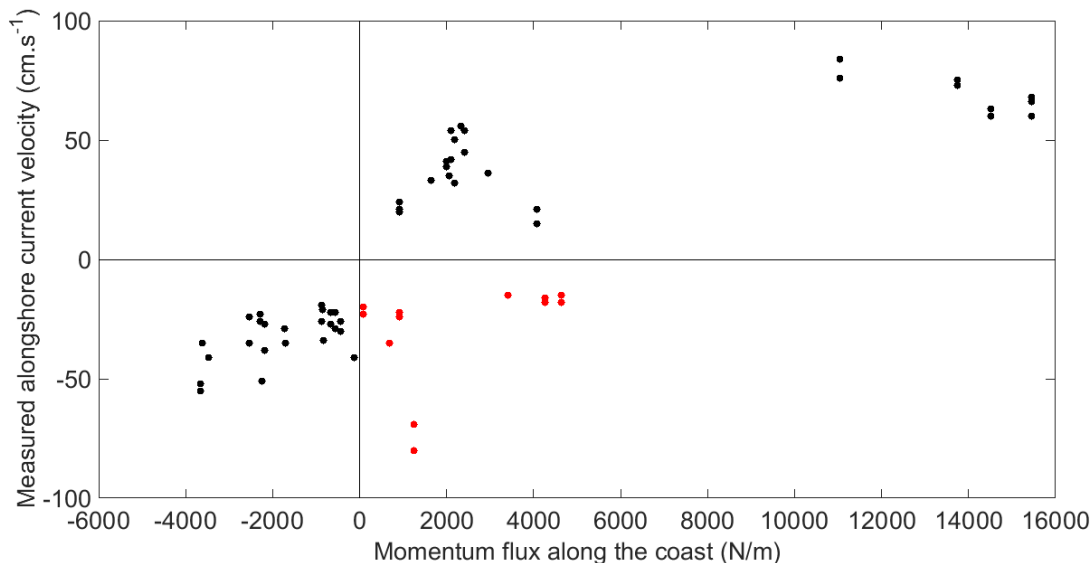


Fig. 10 Relationship between the momentum flux along the coast – calculated using equation 2 – and the velocity of the alongshore current measured in the surf zone. Red dots represent bimodal sea conditions

Based on the results, it was possible to identify a bidirectionality of the currents in the surf zone on the northern RS coast, which was related to the direction of wave incidence. Two patterns were described: when the wave originated from the SE, an alongshore current towards the NE was measured; when waves from the NE occur, the alongshore current was driven towards the SW. This alongshore current behavior had already been qualitatively described in the region under study in the studies from Nicolodi et al. (2010) and Jung and Toldo (2012). In these research works, a seasonal pattern was identified in the directions of the alongshore surface current. In the summer and spring months, the flow was towards the SW, while in the winter and autumn, the northeasterly currents predominated.

However, the annual bidirectional pattern did not prevail, i.e., the resulting annual coastal drift could be towards the SW or NE. According to Nicolodi et al. (2000), between 1996 and 1997, the southwesterly currents were more predominant (62.8 %) when compared to the northeasterly currents (54.8 %). Between 1998 and 1999, however, there was an inversion of this pattern, which was characterized by a slight prevalence of the northeasterly currents in 54 % of the analyzed cases.

Nevertheless, this study quantified the importance of the height and angle of wave incidence in the generation of the alongshore current by calculating the radiation stress.

The radiation stress flux is transversal to the movement of wave propagation and can drive an alongshore current (Feddersen 2004). This flux is characteristic of each environment and can coexist with tide- and wind-driven currents (Komar 1976; Nielsen 2012). This process is responsible for producing an energy vector that drives currents within the surf zone (Davis Jr. and Fitzgerald 2004) and is associated with the approaching of waves that are obliquely angled in relation to the coastline. It takes place after the wave-breaking zone and is mainly controlled by the height and angle of wave incidence.

The circulation of currents in the surf zone is a highly dynamic process and is responsible for transporting sediments that were reworked by wave breaking (Hamilton and Ebersole 2001). The resulting coastal drift is more efficient when the waves reach a rectilinear or slightly curved coast and with a constant bathymetry on the bottom, such as the northern RS coast (Dillenburg et al. 2004; Toldo et al. 2006a). The coastal drift increases as the wave energy increases, more pronounced in regions with small astronomical tide amplitude (also something characteristic from the RS coast), which results in a more continuous and concentrated influence of waves (Siegle and Asp 2007). Thus, sediment quantities of scales of millions of m^3 (Lima et al. 2001; Motta et al. 2015) are transported by alongshore currents along great distances on the coast (Araújo and Alfredini 2001). Understanding the mentioned dynamics is really important to the management of costal environments, especially those that are urbanized.

4. Conclusions

Direct measurements of the alongshore current concomitant with measurements of the wave parameters on the inner continental shelf were used to study the mechanism of the energy flux by radiation stress. This process that drives currents by the breaking of waves that have oblique angles of incidence within the surf zone was described and quantified. The findings indicate that waves are the main driving force of the alongshore current. A pattern in which waves from the SE drive currents towards the NE, and waves from the NE generate fluxes towards the SW (Fig. 11) was also identified. It is important to highlight that an unprecedented methodology to measure alongshore currents in the study region was applied.

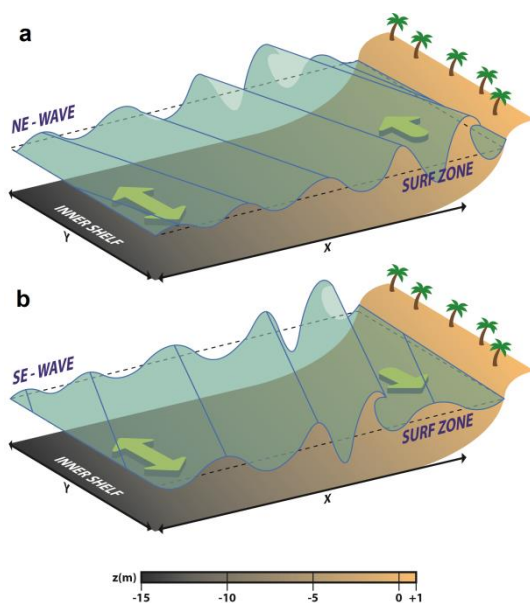


Fig. 11 Scheme of the alongshore current in the surf zone (green arrow) associated with the direction of wave incidence. a) NE waves and southwesterly alongshore current. b) SE waves and northeasterly alongshore current

The calculated alongshore momentum flux had a strong correlation with the intensity and direction of the alongshore current. Furthermore, significant correlations were found between wave height and current intensity, and also between the angle of wave incidence and current direction. Therefore, waves with greater heights and higher angles of incidence in relation to the beach drive more intense alongshore currents on the northern coast of the state of Rio Grande do Sul (RS).

The influence of the wind direction on the surface layer of the alongshore current was qualitatively observed. In some vertical profiles, wind directions that opposed the current caused a significant decrease in the current velocity from the surface to the middle of the water column. We suggest that future studies seek to quantify the relationship between the intensities of the wind and of the alongshore current.

5. Acknowledgments

We would like to thank CAPES for funding oceanographic campaigns (Edital Ciências do Mar II 43/2013) and for the Doctoral Scholarship destined to the first author. We also thank the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) for providing meteorological data and to the board of directors and employees of the Fishing Platform who assisted in the field

campaigns. The authors are grateful to MSc. Orozco for the English review and to the Reviewers for the careful reading of the manuscript and his or her valuable comments and suggestions.

6. References

Almeida LESB, Rosauero NL, Toldo Jr. EE, Gruber NLS (1999) Avaliação da profundidade de fechamento para o litoral norte do Rio Grande do Sul. Anais do SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Belo Horizonte, MG. CD-ROM.

Andrade MM, Toldo Jr. EE, Nunes JC R (2016) Variabilidade das correntes na plataforma interna ao largo de Tramandaí, RS durante o verão de 2014. Pesquisas em Geociências, 43 (3): 289-298. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78231>

Andrade MM, Toldo EE, Nunes JCR (2018) Tidal and subtidal oscillations in a shallow water system in southern Brazil. Brazilian Journal of Oceanography, 66(3), 245-254. <http://dx.doi.org/10.1590/s1679-87592018017406603>

Araújo RN, Alfredini P (2001) O Cálculo do Transporte de Sedimentos Litorâneo: Estudo de Caso das Praias de Suarão e Cibratel (Município de Itanhaém, São Paulo). RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol: 6 n.2: 15-28.

Ardhuin F, Rogers E, Babanin AV, Filipot, JF, Magne, R et al (2010) Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation. Journal of Physical Oceanography, 40(9): 1917–1941p. <http://doi:10.1175/2010JPO4324.1>.

Barros VR, Grimm AM, Doyle ME (2002) Relationship between temperature and circulation in Southwestern South America and its influence from El Niño and La Niña events. Journal of the Meteorological Society of Japan, 80:21-32.

Calliari LJ, Fachin S (1993) Laguna dos Patos. Influência nos depósitos lamíticos costeiros. Pesquisas em Geociências, 20(1): 57-69.

Calliari LJ, Toldo Jr. EE, Nicolodi JL (2006) Classificação Geomorfológica. In: Erosão e Prograduação do Litoral Brasileiro – Rio Grande do Sul/DieterMuehe, organizador. Brasília:

MMA. 476 p.

Calliari LJ, Winterwerp JC, Fernandes E, Cuchiara D, Vinzon SB, Sperle M, Holland KT (2009) Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon–Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research*, 29(3), 515-529.

Calliari LJ, Guedes RMC, Lélis RF, Antikeira JA, Figueiredo SA (2010) Perigos e riscos associados a processos costeiros no Litoral sul do Brasil (RS): uma síntese. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 14(1), 51-63.

Calliari LJ, Toldo Jr.EE (2016) Ocean Beaches of Rio Grande do Sul In: *Brazilian Beaches Systems*. 1 ed.: Springer, 2016, v.17, p. 507-541.

Carter RWG, Woodroffe CD (1994) Coastal Evolution: an introduction. In: Carter and Woodroffe (Eds). *Coastal Evolution: later quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University Press.1-32 p.

Cartier A, Larroudé P, Héquette A (2013) Longshore sediment transport measurements on sandy macrotidal beaches compared with sediment transport formulae. In *Sediment Transport Processes and Their Modelling Applications*. InTech.

Cavalcanti I, Kousky V (2009) Parte I - Sistemas meteorológicos que afetam o tempo na América do Sul: frentes frias sobre o Brasil. Para entender tempo e clima. São Paulo: Oficina de Textos, 135-147.

Chawla A, Spindler DM, Tolman HL (2013) Validation of a thirty year wave hind cast using the climate forecast system reanalysis winds. *Ocean Model* 70:189–206, DOI 10.1016/j.ocemod.2012.07.005

Costa, R (2009) Estudo sobre a variabilidade sazonal e da estrutura vertical das correntes costeiras da plataforma interna, ao largo de Rio Grande – RS. Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande, RS, Brazil.

Costa R, Möller OOJr. (2011) Estudo da estrutura e da variabilidade das correntes na área da plataforma interna ao largo de Rio Grande (RS, Brasil), no sudoeste do Atlântico Sul, durante a primavera-verão de 2006-2007. *Revista da Gestão Costeira Integrada* 11(3): 273-281.

D'Aquino CDA (2004) Calibração e aplicação do modelo numérico Genesis nas praias de Tramandaí e Imbé-RS. Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil. 110p.

Davis Jr. RA, FitzGerald DM (2009) *Beaches and coasts*. Ed. John Wiley & Sons. 432 pp.

Dillenburg SR, Esteves LS, Tomazelli LJ (2004) A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76(3), 611-623.

Durrant T, Greenslade D, Hemar M, Trenham C (2014) A Global Hindcast focussed on the Central and South Pacific. *CAWCR Technical Report (70)*: 46.

Esteves L S, Williams JJ, Lisniewski MA, Perotto H (2005). Caracterização do perfil vertical da concentração de sedimentos transportados na zona de surfe. In: X Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - Abequa. Anais... Guarapari/ES.

Fachin S (1998) Caracterização do Perfil de Equilíbrio da Antepraia na Costa do Rio Grande do Sul. Dissertation. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 105 p.

Faria AF, Thornton EB, Stanton TP, Soares CK, Lippmann TC (1998) Vertical profiles of longshore currents and related bed shear stress and bottom roughness. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C2), 3217-3232.

Feddersen F (2004) Effect of wave directional spread on the radiation stress: comparing theory and observations. *Coastal engineering*, 51 (5-6): 473-481.

Fiore MME, D'onofrio EE, Pousa JL (2009) Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. *Continental Shelf Research*, 29(14): 1643-1649.

Germani YF, Figueiredo SA, Calliari LJ, Tagliani CRA (2015) Vulnerabilidade costeira e perda

de ambientes devido à elevação do nível do mar no litoral sul do Rio Grande do Sul. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 15(1).

Guimarães PV, Farina L, Toldo Jr.EE (2014) Analysis of extreme wave events on the southern coast of Brazil. *Natural Hazards and Earth System Science*, 14(12): 3195–3205p. <https://doi:10.5194/nhess-14-3195-2014>.

Hamilton DG, Ebersole BA (2001) Establishing uniform longshore currents in a large-scale sediment transport facility. *Coastal Engineering*, 42(3): 199-218.

Hartmann C (1996) Dinâmica, Distribuição e Composição do Material em Suspensão na Região Sul da Laguna dos Patos, RS. Tese. UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil.

Hasselmann K, Barnett TP, Bouws E, Carlson H, Cartwright DE, Enke K et al 1973 Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft* 8-12.

Hasselmann S, Hasselmann K, Allender JH, Barnett TP 1985 Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, 15(11): 1378-1391.

Hubertz JM (1986) Observations of local wind effects on alongshore currents. *Coastal Engineering*, 10: 275 – 288.

Jung GB, Toldo EE (2011) Longshore current vertical profile on a dissipative beach. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29(4): 691-702.

Jung GB, Toldo EE (2012) Análise qualitativa da direção da corrente longitudinal entre 2004 e 2008 na Praia de Tramandaí, RS, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13(1).

Komar PD (1976) *Beach Process and Sedimentation*. Prentice Hall, 429p.

Lélis RJ, Calliari LJ (2003) Variabilidade da linha de costa oceânica adjacente às principais desembocaduras do Rio Grande do Sul, Brasil. In: IX Congresso da Associação Brasileira de

Estudos do Quaternário - Abequa. Anais... Recife/PE.

Lima SF, Almeida LE, Toldo Jr.EE (2001) Estimativa da capacidade de transporte longitudinal de sedimentos a partir de dados de ondas para a costa do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 28(2): 99-107.

Longuet-Higgins MS (1970) Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 1. *Journal of Geophysical Research*, 75(33): 6778-6789.

Ma TT (2003) Quantificação do transporte longitudinal a partir de dados de concentração de sedimentos em suspensão, Tramandaí-RS. Dissertation. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 72 p.

Mawdsley RJ, Haigh ID, Wells NC (2014) Global changes in mean tidal high water, low water and range. *Journal of Coastal Research*, 70(1): 343-348.

Melo E, Hammes G, Franco D, Romeu MAR (2008) Avaliação de desempenho do modelo WW3 em Santa Catarina. Report Laboratório de Hidráulica Marítima, UFSC.

Miranda LB, Castro BM, Kjerve B (2002) Princípios de Oceanografia Física de Estuários. 413 p. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (Edusp).

Motta VF (1964) Resultados de algumas medições de transporte litorâneo em modelo costeiro esquemático. Report n. F1257. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. 46p.

Motta VF (1967) Estudo em modelo reduzido para a regularização da embocadura lagunar de Tramandaí/RS. Report. Rio de Janeiro: S. N. 69p.

Motta LM, Toldo EE Jr., Almeida LE, Nunes JCR (2009) Medidas das variações das taxas de deriva litorânea na praia de Tramandaí. Trabalho apresentado no Salão de Iniciação Científica da UFRGS, 2009.

Motta LM, Toldo EE, Almeida LE, Nunes JCR (2015) Sandy sediment budget of the midcoast of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Marine Research*, 73(3-4): 49-69.

Neves Filho SC (1992) Variação da Maré Meteorológica no Litoral Sudeste do Brasil: 1965-1986. Dissertation. Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

Nicolodi JL, Toldo Jr. EE, Gruber NLS (2000) Análise da Direcionalidade das Correntes Litorâneas no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. In: XIII Semana Nacional de Oceanografia, 2000, Itajaí, SC. Anais do XIII SNO. Universidade do Vale do Itajaí, p: 461-463.

Nielsen P (2009) Coastal and estuarine processes (Vol. 29). World Scientific Publishing Company.

NORTEK (2013) Comprehensive Manual. Nortek As. 138 p.

PBMC (2016) Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Marengo, JA, Scarano FR]. COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6.

Perignon Y (2017) Assessing accuracy in the estimation of spectral content in wave energy resource on the French Atlantic test site SEMREV. *Renewable Energy* (114): 145–153p. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.086>.

Piola AR, Matano RP, Palma E, Möller OO, Campos EJ (2005) The influence of the Plata river discharge on the western South Atlantic Shelf. *Geophys. Res. Lett* (32): 10-29.

Pitombeira ES (1975) Estimativa do volume anual de transporte litorâneo na costa do Rio Grande do Sul. Dissertation, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil, 98p.

Raschle N, Ardhuin F (2013) A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization. *Ocean Modelling* (70): 174–188. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.12.001>

Ruessink BG, Miles JR, Feddersen F, Guza RT, Elgar S (2001) Modeling the alongshore

current on barred beaches. *Journal of Geophysical Research* 106: 451-463.

Schossler V, Toldo EE Jr., Dani N (2017) Morfodinâmica da desembocadura da Lagoa do Peixe, litoral sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 44 (1): 25-39.

Short AD (1999) *Handbook of Beach and Shore face Morphodynamics*. CHICHESTER: WILEY, 379P. ISBN 0-471-965707.

Siegle E, Asp NE (2007) Wave refraction and longshore transport patterns along the southern Santa Catarina coast. *Brazilian Journal of Oceanography*, 55(2): 109-120.

Silva AF, Toldo EE Jr., Weschenfelde, J (2017) Morfodinâmica da desembocadura da Lagoa de Tramandaí (RS, Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 44 (1): 155-166.

Sprovieri FC (2018) *Clima de Ondas, Potencial Energético e Transporte de Sedimentos no Litoral Norte do Rio Grande do Sul*. Tese, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil. 142 p.

Strauch JC, Cuchiara DC, Toldo EE Jr., Almeida LEB (2009) O Padrão das Ondas de Verão e Outono no Litoral Sul e Norte do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 14-4: 29-37.

Tomazelli L, Villwock J (1992) Considerações sobre o ambiente praial e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 19(1), 3-12.

Toldo EE, Dillenburg SR, Almeida LESB, Tabajara LL, Martins R, Cunha LOBP (1993) Parâmetros morfométricos da Praia de Imbé, RS. *Pesquisas*, 20 (1): 27-32.

Toldo Jr EE, Almeida LESB (2003) A linha d'água como indicadora da posição da linha de praia. In: IX CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO - Abequa. Anais... Recife/PE.

[a] Toldo Jr. EE, Nicolodi JL, Almeida LESB, Corrêa ICS, Esteves LS (2006) Coastal dunes and shoreface width as a function of Longshore transport. *Journal of Coastal Research*, SI 39

(Proceedings of the 8th International Coastal Symposium), 390 - 394. Itajaí, SC, Brazil, ISSN 0749-0208.

[b] Toldo Jr. EE, Almeida LESB, Nicolodi JL, Absalonsen L, Gruber NSL (2006) O Controle da Deriva Litorânea no Desenvolvimento do Campo de Dunas e da Antepraia no Litoral Médio do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 33 (2): 35-42.

Tolman HL 2009 User manual and system documentation of WAVEWATCH-III. Technical report, NOAA/NWS/NCEP/OMB.

Torres-Freyermuth A, Puleo JA, DiCosmo N, Allende-Arandía ME, Chardón-Maldonado P et al (2017) Nearshore circulation on a sea breeze dominated beach during intense wind events. *Continental Shelf Research*, 151, 40-52.

U. S. Army Coastal Engineering Research Center/CERC (1984) Shore Protection Manual. Ed. 4. Vol (I). Washington, U. S. A. Government Print Office, 208p.

Villwock JA, Tomazelli LJ (1995) Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. *Notas Técnicas, CECO-UFRGS*, 8:1-45.

Wang P, Ebersole BA, Smith ER, Johnson BD (2002) Temporal and spatial variations of surf-zone currents and suspended sediment concentration. *Coastal Engineering*, 46(3), 175-211.

Wright J, Colling A, Park D. (1999) *Waves, tides, and shallow-water processes (Vol. 4)*. Gulf Professional Publishing (Eds.).

Zavialov P, Möller OOJr., Campos E (2002) First direct measurements of currents on the continental shelf of Southern Brazil. *Continental Shelf Research* 22: 1975–1986.

Zhang ZW, Zou ZL (2012) Vertical distribution of longshore currents over plane and barred beaches. *Journal of Hydrodynamics*, 24(5), 718-728.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1. SÍNTESE INTEGRADORA

O presente estudo sobre a circulação por correntes na plataforma continental interna, na zona de arrebentação e, também, das oscilações do nível do mar contrasta com estudos anteriores, os quais se concentraram principalmente na caracterização desses movimentos. Esta tese quantificou os papéis do vento longitudinal como forçante da circulação das correntes na plataforma interna e nas oscilações do NM. Também buscou-se a compreensão da importância hidrodinâmica da maré astronômica nessas variações. Por fim, a análise do papel dominante da incidência oblíqua de ondas de gravidade de superfície na formação da corrente longitudinal trouxe um entendimento sobre esse processo extremamente complexo.

Correntes

Os resultados apresentados demonstram padrões regionais de correntes costeiras que atuam na plataforma interna, no litoral norte do Rio Grande do Sul, pela primeira vez descrita e interpretada. As análises espectrais e as correlações entre a componente longitudinal do vento e das correntes indicaram o domínio dessa forçante na hidrodinâmica local. Os valores de defasagem entre a atuação do vento e a resposta na corrente evidenciaram a rápida resposta da água à ação do vento.

O modelo teórico de circulação proposto por Ekman (1905) foi observado através de dados coletados em campo em uma região muito próxima à costa. O modelo teórico propõe que ventos paralelos à costa induzem um transporte ortogonal à linha de costa na camada superficial da coluna d'água. No entanto, devido à barreira exercida pela presença do terreno, um fluxo de retorno no interior da coluna de água se desenvolve em sentido contrário ao da superfície. No caso em estudo (costa oeste do Oceano Atlântico no Hemisfério Sul) as correntes são defletidas à esquerda do movimento.

Desta forma, ventos do quadrante S promovem correntes para N, as quais são defletidas e geram correntes de superfície em direção à costa, elevam o NM e causam um fluxo de retorno pela camada de fundo. Caracterizando assim o processo de subsidência costeira (Figura 6a). De forma contrária, ventos do quadrante N promovem correntes para S que são defletidas e causam correntes de superfície em direção ao oceano na superfície, gerando um rebaixamento do NM e um fluxo de água pelo fundo em direção à costa a fim de manter a conservação da massa. O processo descrito é a chamada ressurgência costeira (Figura 6b).

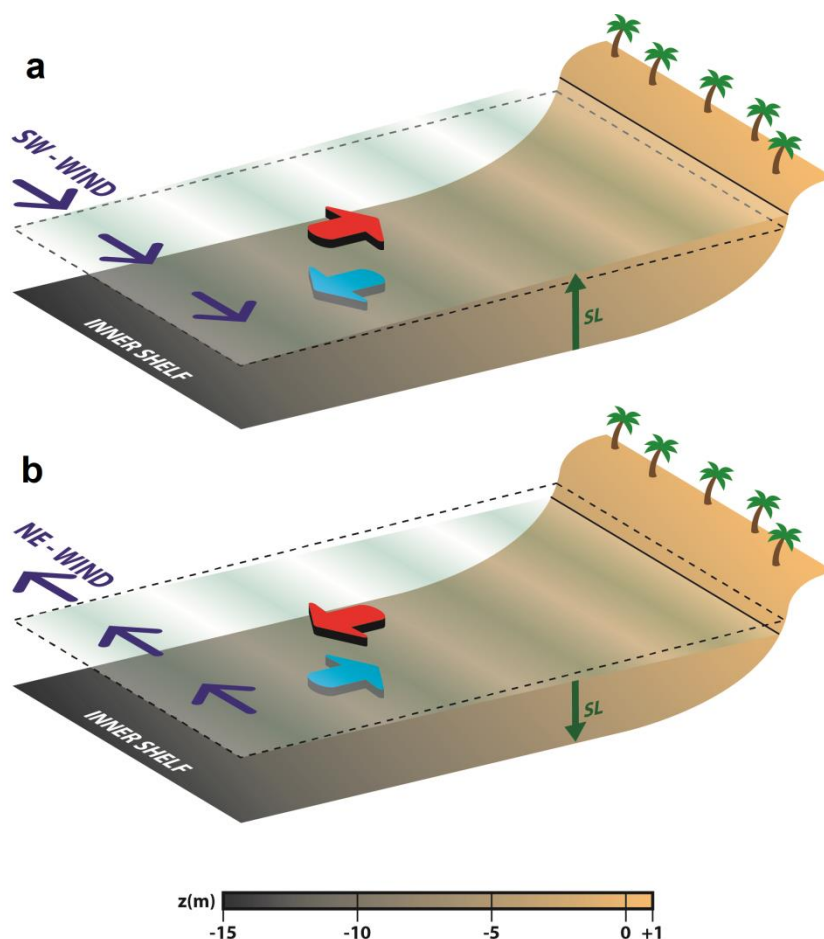


Figura 6. Esquema com os processos de subsidência (a) e ressurgência (b) costeira identificados no litoral Norte do RS. Seta azul escuro representa a direção do vento, a seta vermelha as correntes na camada de superfície e a seta azul claro as correntes de fundo.

Nível do mar

A amplitude média da maré astronômica igual a 0,31 m e a média das oscilações de baixas frequências do nível do mar igual a 0,37 m foram calculadas com base em uma longa série temporal de NM com mais de 650 dias de duração. Uma vez que essas médias são muito similares, uma nova perspectiva das amplitudes do NM na região sul do Brasil foi apresentada. Conclui-se que é importante considerar as oscilações astronômicas em estudos futuros sobre a hidrodinâmica costeira no litoral do RS.

A importância relativa entre as oscilações de altas e baixas frequências dependem das estações do ano. Geralmente, pode-se afirmar que aquelas em baixas frequências são mais intensas nos períodos de outono. As análises espectrais e as correlações cruzadas entre o vento ao longo da costa e o NM indicam uma clara relação entre as forçantes meteorológicas e as oscilações em frequências submareais.

O curto intervalo de tempo entre a ação do vento ao longo da costa e a subsequente resposta no NM, demonstra uma ação rápida do vento nesta hidrodinâmica. A passagem de sistemas atmosféricos de ciclones extratropicais intensos com ventos de Sul, associados a períodos de marés de sizígia e ondas com altura significativa acima da média, podem elevar o NM em 3,2 m acima do nível médio, causando erosão costeira nas praias e danos a propriedades privadas.

Ondas e correntes

Medições diretas na zona de surfe da corrente longitudinal, concomitantes com medições dos parâmetros de ondas na plataforma interna foram utilizadas para estudar o mecanismo do fluxo de energia por tensão de radiação. Processo, que gera uma circulação por correntes na

zona de surfe pela quebra das ondas com ângulos de incidência oblíquos, foi descrito e quantificado.

Os resultados indicam que as ondas são a principal forçante da corrente longitudinal. Também foi identificado um padrão no qual as vagas de NE geram fluxos para SO (Figura 7a) e as ondulações de SE geram correntes direcionadas para NE (Figura 7b).

O fluxo de momentum longitudinal calculado teve forte correlação com a magnitude e direção da corrente longitudinal. Além disso, correlações significativas foram encontradas entre altura das ondas e magnitude da corrente longitudinal, e também entre o ângulo de incidência das ondas e a direção da corrente. Portanto, ondas com maiores alturas e com maiores ângulos de incidência em relação à praia geram correntes longitudinais com maior magnitude no litoral norte do RS.

A influência da direção do vento na camada superficial da corrente longitudinal foi observada de forma qualitativa. Em condições de ventos com direção contrária a da corrente, foi observada uma diminuição significativa da velocidade da corrente entre a superfície e o meio da coluna de água.

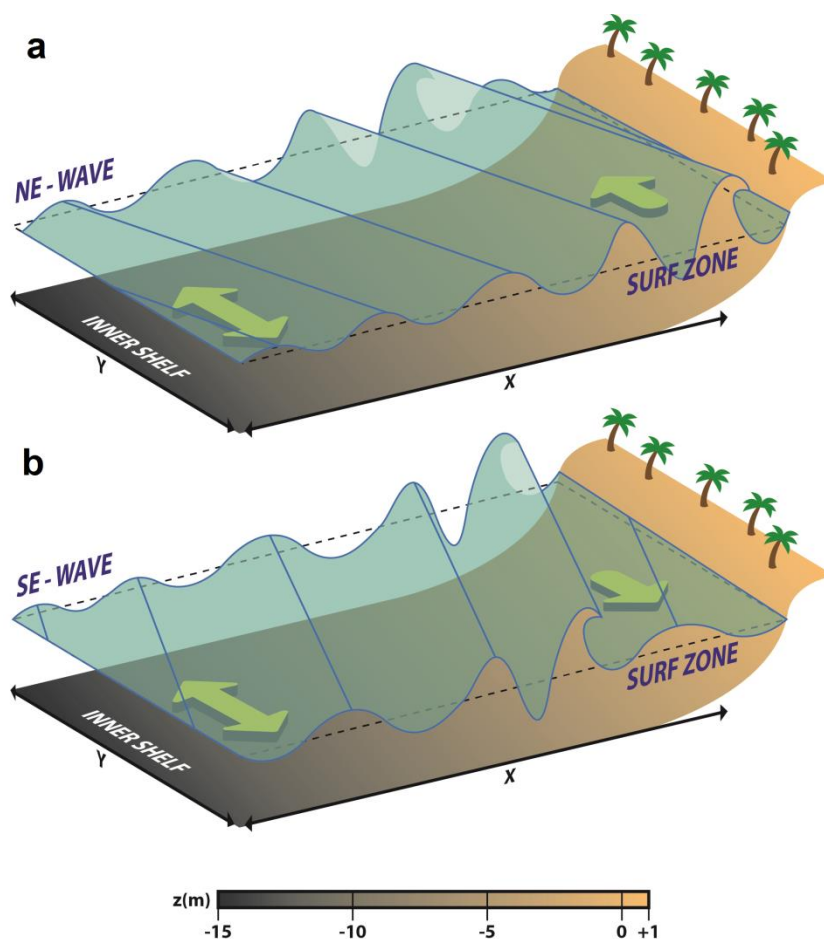


Figura 7. Esquema da corrente longitudinal na zona de surfe (seta verde) relacionada com a direção de incidência da onda. a) ondas de NE e corrente longitudinal para SO. b) ondas de SE e corrente longitudinal para NE.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolvimento de estudos detalhados da magnitude da circulação por correntes gerada pela maré astronômica e, também, pode ser avaliado o fluxo residual gerado por essas correntes.

Uma climatologia das ondas no litoral norte do RS pode ser utilizada para caracterizar o padrão de ondulações mais frequentes, utilizando o banco de dados com parâmetros de ondas desenvolvidos pelos Projetos Ciências do Mar I e II. Com estes resultados, pode ser gerada uma

estimativa do comportamento da corrente longitudinal para o litoral norte do RS entre os anos de 2013 e 2017.

Desenvolvimento de análise sobre a mecânica do prisma de maré para as lagoas costeiras (Tramandaí e Lagoa do Peixe), a partir dos estudos sobre as oscilações do NM apresentados nesta tese.

Quantificar a influência da tensão de cisalhamento do vento na corrente longitudinal na zona de surfe.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L. E. S. B., ROSAURO, N. M. L. e TOLDO JR., E. E. 1997. Análise Preliminar das Marés na Barra do Rio Tramandaí, RS - Brasil. **Anais SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, Vitória, ES. v.1, p.560-566, 1997.

ALMEIDA, L. E. S. B., ROSAURO, N. L., TOLDO JR., E. E. e GRUBER, N. L. S. 1999. Avaliação da profundidade de fechamento para o litoral norte do Rio Grande do Sul. **Anais do SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, Belo Horizonte, MG. CD-ROM.

ALFREDINI, P. 1999. The longshore transport evaluation used as a tool for the brazilian coastline litoral processes knowledge. VII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - Abequa, **Anais...** Porto Seguro, BA. 13p.

ARAÚJO, R. N. & ALFREDINI, P. 2001. O Cálculo do Transporte de Sedimentos Litorâneo: Estudo de Caso das Praias de Suarão e Cibratel (Município de Itanhaém, São Paulo). **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol: 6 n.2: 15-28.

BARROS, V. R., GRIMM, A. M., DOYLE, M. E. 2002. Relationship between temperature and circulation in Southwestern South America and its influence from El Niño and La Niña events. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, 80:21-32.

CALLIARI, L. J. & FACHIN, S. 1993. Laguna dos Patos. Influência nos depósitos lamíticos costeiros. **Pesquisas em Geociências**, 20(1): 57-69.

CALLIARI, L. J. & KLEIN, A. H. F. 1993. Características Morfodinâmicas e Sedimentológicas das Praias Oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. **Pesquisas em Geociências**, 20(1): 48-56.

CALLIARI, L. J., TOLDO Jr., E. E., NICOLODI, J. L. 2006. **Classificação Geomorfológica. In: Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro – Rio Grande do Sul**/Dieter Muehe, organizador. Brasília: MMA. 476 p.

CALLIARI, L. J., WINTERWERP, J. C., FERNANDES, E., CUCHIARA, D., VINZON, S. B., SPERLE, M., & HOLLAND, K. T. 2009. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon–Cassino beach sedimentary system. **Continental Shelf Research**, 29(3), 515-529.

CALLIARI, L. J., GUEDES, R. M. C., LÉLIS, R. F., ANTIQUEIRA, J. A., & FIGUEIREDO, S. A. 2010. Perigos e riscos associados a processos costeiros no Litoral sul do Brasil (RS): uma síntese. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, 14(1), 51-63.

CARTER, R. W. G. & WOODROFFE, C. D. 1994. Coastal Evolution: an introduction. In: Carter and Woodroffe (Eds). Coastal Evolution: later quaternary shoreline morphodynamics. **Cambridge University Press**. 1-32 p.

CAVALCANTI, I., & KOUSKY, V. 2009. **Parte I - Sistemas meteorológicos que afetam o tempo na América do Sul: frentes frias sobre o Brasil. Para entender tempo e clima**. São Paulo: Oficina de Textos, 135-147.

CLARA, M. L., SIMIONATO, C. G., D'ONOFRIO, E. & MOREIRA, D. 2015. Future Sea Level Rise and Changes on Tides in the Patagonian Continental Shelf. **Journal of Coastal Research**, 31, 519-535.

CORRÊA, I. C. S., 1987. Sedimentos superficiais da Plataforma e Talude Continental do Rio Grande do Sul. **Pesquisas**, 19 (1):95-104.

COSTA, R. 2009. **Estudo sobre a variabilidade sazonal e da estrutura vertical das correntes costeiras da plataforma interna, ao largo de Rio Grande – RS**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em

Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande, RS, Brasil.

COSTA, R. e MÖLLER, O. O. Jr. 2011. Estudo da estrutura e da variabilidade das correntes na área da plataforma interna ao largo de Rio Grande (RS, Brasil), no sudoeste do Atlântico Sul, durante a primavera-verão de 2006-2007. **Revista da Gestão Costeira Integrada** 11(3):273-281.

DAVIS Jr, R. A., & FITZGERALD, D. M. 2009. **Beaches and coasts**. Ed. John Wiley & Sons. 432 pp.

D'AQUINO, C. D. A. 2004. **Calibração e aplicação do modelo numérico Genesis nas praias de Tramandaí e Imbé-RS**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil. 110p.

DA MOTTA, L. M., TOLDO Jr, E. E., ALMEIDA, L. E. B. & NUNES, J. C. 2015. Sandy sediment budget of the midcoast of Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Marine Research**, 73, 49-69.

DILLENBURG, S. R., ESTEVES, L. S., & TOMAZELLI, L. J. 2004. A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 76(3), 611-623.

ESTEVES, L. S.; WILLIAMS, J. J.; LISNIOWSKI, M. A.; PEROTTO, H. 2005. Caracterização do perfil vertical da concentração de sedimentos transportados na zona de surfe. In: X Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - Abequa. **Anais...** Guarapari/ES.

FACHIN, S. 1998. **Caracterização do Perfil de Equilíbrio da Antepraia na Costa do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado em Geociências, 105 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

FIGUEIREDO Jr., A.G. 1980. Response of water column to strong wind forcing, southern Brazilian inner shelf: implications for sand ridge formation.

Marine Geology, 35: 367-376.

FIORE, M. M. E.; D'ONOFRIO, E. E.; POUSA, J. L. 2009. Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. **Continental Shelf Research**, 29(14), 1643-1649.

FENG, J., STORCH H., JIANG, W. e WEISSE R. 2015. Assessing changes in extreme sea levels along the coast of China. **J. Geophys. Res. Oceans**, 120, 8039–8051, doi: 10.1002/2015JC011336.

FONTOURA, J. A. S. 2004. **Quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não coesivos na zona de surfe da costa do Rio Grande do Sul (aplicação à praia do Cassino e adjacências dos molhes leste e oeste)**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 298p.

GAMARO, P. E. 2012. **Medidores Acústicos Doppler de Vazão**. Foz do Iguaçu. Ed. Itaipu Binacional, 164 p.

GERMANI, Y. F., FIGUEIREDO, S. A., CALLIARI, L. J., & TAGLIANI, C. R. A. 2015. Vulnerabilidade costeira e perda de ambientes devido à elevação do nível do mar no litoral sul do Rio Grande do Sul. *Revista de Gestão Costeira Integrada*-**Journal of Integrated Coastal Zone Management**, 15(1).

JUNG, G. B., 2010. **Estrutura e propagação de correntes longitudinais na Praia de Tramandaí - RS**. Dissertação de Mestrado em Geociências, 54 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

JUNG, G. B. & TOLDO, E. E. 2011. Longshore current vertical profile on a dissipative beach. **Revista Brasileira de Geofísica** 29(4): 691-702.

JUNG, G. B. & TOLDO, E. E. 2012. Análise qualitativa da direção da corrente longitudinal entre 2004 e 2008 na Praia de Tramandaí, RS, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 13(1).

HARTMANN, C., 1996. **Dinâmica, Distribuição e Composição do Material em Suspensão na Região Sul da Laguna dos Patos, RS**. Tese de Doutorado. UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

LÉLIS, R. J., & CALLIARI, L. J. 2003. Variabilidade da linha de costa oceânica adjacente às principais desembocaduras do Rio Grande do Sul, Brasil. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - Abequa. **Anais...** Recife/PE.

LENTZ, S. J., & FEWINGS, M. R. 2012. The wind-and wave-driven inner-shelf circulation. **Annual review of marine science**, 4, 317-343.

LIMA, S. F., ALMEIDA, L. E., & TOLDO JR, E. L. Í. R. I. O. 2001. Estimativa da capacidade de transporte longitudinal de sedimentos a partir de dados de ondas para a costa do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, 28(2), 99-107.

LISNIEWSKI, M. A. 2006. **Variação granulométrica nos sedimentos em suspensão transportados longitudinalmente na zona de surfe da praia do Cassino – RS**. Monografia de Graduação, FURG, Rio Grande, 99 p.

MA, T. T. M., 2003. **Quantificação do transporte longitudinal a partir de dados de concentração de sedimentos em suspensão, Tramandaí-RS**. Dissertação de Mestrado em Geociências, 72 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

MAWDSLEY, R. J., HAIGH, I. D., & WELLS, N. C. 2014. Global changes in mean tidal high water, low water and range. **Journal of Coastal Research**, 70(sp1), 343-348.

MIRANDA, L. B., CASTRO, B. M., KJERVE, B. 2002. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. 413 p. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (Edusp).

MELO F^o., E. 2017. **Maré Meteorológica na Costa Brasileira**. Tese Professor Titular, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 328 p, Abril 2017.

MÖLLER, O. O., CASTAING, P., FERNANDES, E. H. L. & LAZURE, P. 2007. Tidal frequency dynamics of a southern Brazil coastal lagoon: choking and short period forced oscillations. **Estuaries and Coasts**, 30, 311-320.

MOTTA, V. F. 1964. **Resultados de algumas medições de transporte litorâneo em modelo costeiro esquemático**. Folhetim n. F1257. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. 46p.

MOTTA, V. F. 1967. **Estudo em modelo reduzido para a regularização da embocadura lagunar de Tramandaí/RS**. Rio de Janeiro: S. N. 69p.

MOTTA, L. M., TOLDO, E. E. Jr., ALMEIDA, L. E., NUNES, J. C. 2009. **Medidas das variações das taxas de deriva litorânea na praia de Tramandaí**. Trabalho apresentado no Salão de Iniciação Científica da UFRGS, 2009.

MOTTA, L. M., TOLDO, E. E., ALMEIDA, L. E., & NUNES, J. C. 2015. Sandy sediment budget of the midcoast of Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Marine Research**, 73(3-4), 49-69.

NAKANO, K., 2006. **Projeto Orla: implementação em territórios com urbanização consolidada**. Coordenação de Kazuo Nakano. São Paulo: Instituto Polis; Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 80 p.

NEVES FILHO, S.C. 1992. **Varição da Maré Meteorológica no Litoral Sudeste do Brasil: 1965-1986**. Tese de Mestrado. Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

NICOLODI, J. L.; TOLDO Jr., E. E.; GRUBER, N. L. S. 2000. **Análise da Direcionalidade das Correntes Litorâneas no Litoral Norte do Rio Grande do Sul**. In: XIII Semana Nacional de Oceanografia, Itajaí, SC. p.461 – 463.

NORTEK. 2013. **Comprehensive Manual**. Nortek As. 138 p.

PARISE, C. K., CALLIARI, L. J. AND KRUSCHE, N. 2009. Storm Surges and Beach Erosion in Southern Brazil: Atmospheric Conditions and Shore Erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, 57 (3): 175-188.

PAULA, D. P. de; MORAIS, J.O.; FERREIRA, Ó.; DIAS, J.A. 2015. Análise histórica das ressacas do mar no litoral de Fortaleza (Ceará, Brasil): origem, características e impactos. In: Davis Pereira de Paula & J. Alveirinho Dias (orgs.), *Ressacas do Mar / Temporais e Gestão Costeira*, pp.173-201, Editora Premium, Fortaleza, CE, Brasil. ISBN: 978-85-7924-440-7.

PIOLA, A. R., MATANO, R. P., PALMA, E., MÖLLER, O. O., CAMPOS, E. J. 2005. The influence of the Plata river discharge on the western South Atlantic Shelf. **Geophys. Res. Lett** 32: 10-29.

PITOMBEIRA, E. S. 1975. **Estimativa do volume anual de transporte litorâneo na costa do Rio Grande do Sul**. Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Centro de Hidrologia Aplicada, Porto Alegre, Brasil, 98p.

PBMC, 2016: **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do**

Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6.

PUGH, D. T. 1987. **Tides, Surges, And Mean Sea-Level**. Chippenham, Antony Rowe Ltd.

ROCHA, R. S., TOLDO Jr, E. E. & WESCHENFELDER, J. 2015. Delimitação do terreno de marinha: estudo de caso no litoral do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Cartografia**, 67, 1723-1731.

SCHOSSLER V., TOLDO E. E. Jr., & DANI, N. 2017. Morfodinâmica da desembocadura da Lagoa do Peixe, litoral sul do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, 44 (1): 25-39.

SIEGLE, E. e CALLIARI, L. J. 2008. High-Energy Events and Short-Term Changes in Superficial Beach Sediments. **Brazilian Journal of Oceanography**, 56 (2):149-152.

SILVA, A. F., TOLDO, E. E. Jr & WESCHENFELDER, J. 2017. Morfodinâmica da desembocadura da Lagoa de Tramandaí (RS, Brasil). **Pesquisas em Geociências**, 44 (1): 155-166.

SMALL, C. e NICHOLLS, R. J. 2003. A Global Analysis of Human Settlement in Coastal Zones. **Journal of Coastal Research** 19(3): 584-599.

SHORT, A. D. 1999. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. CHICHESTER: WILEY, 379P. ISBN 0-471-965707.

SPROVIERI, F. C. 2018. **Clima de Ondas, Potencial Energético e Transporte de Sedimentos no Litoral Norte do Rio Grande do Sul**. Tese, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil. 142 p.

STRAUCH, J. C.; CUCHIARA, D. C.; TOLDO, E. E. Jr.; ALMEIDA, L. E. B. 2009. O Padrão das Ondas de Verão e Outono no Litoral Sul e Norte do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 14-4: 29-37.

TOLDO, E. E.; DILLENBURG, S. R.; ALMEIDA, L. E. S. B.; TABAJARA, L. L.; MARTINS, R. e CUNHA, L. O. B. P. 1993. Parâmetros morfométricos da Praia de Imbé, RS. **Pesquisas**, 20 (1):27-32.

TOLDO Jr, E. E., & ALMEIDA, L. E. S. B. 2003. A linha d'água como indicadora da posição da linha de praia. In: IX CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO - Abequa. **Anais...** Recife/PE.

[a] TOLDO Jr., E. E., NICOLODI, J. L., ALMEIDA, L. E. S. B., CORRÊA, I. C. S. e ESTEVES, L. S. 2006. Coastal dunes and shoreface width as a function of Longshore transport. **Journal of Coastal Research**, SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium), 390 - 394. Itajaí, SC, Brazil, ISSN 0749-0208.

[b] TOLDO Jr., E. E., ALMEIDA, L. E. S. B., NICOLODI, J. L., ABSALONSEN, L. e GRUBER, N. S. L. 2006. O Controle da Deriva Litorânea no Desenvolvimento do Campo de Dunas e da Antepraia no Litoral Médio do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, 33 (2): 35-42.

Torres-Freyermuth A., Puleo J. A., DiCosmo N., Allende-Arandía M.E., Chardón-Maldonado P. et al. 2017. Nearshore circulation on a sea breeze dominated beach during intense wind events. **Continental Shelf Research**, 151, 40-52.

U. S. Army Coastal Engineering Research Center/CERC. 1984. **Shore Protection Manual**. Ed. 4. Vol (I). Washington, U. S. A. Government Print Office, 208p.

VALENTIM, S. S, BERNARDES, M. E. C., DOTTORI, M. e CORTEZI, M. 2013. Low-Frequency Physical Variations In The Coastal Zone Of Ubatuba, Northern Coast Of São Paulo State, Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, 61 (3):187-193.

VIANNA, H. D. & CALLIARI, L. J. 2015. Variabilidade do sistema praia-dunas frontais para o litoral norte do Rio Grande do Sul (Palmares do Sul a Torres, Brasil) com o auxílio do Light Detection and Ranging - Lidar. **Pesquisas em Geociências**, 42, 141-158.

VILLWOCK, J. A. e TOMAZELLI, L. J. 1995. **Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. Notas Técnicas**, CECO-UFRGS, 8:1-45.

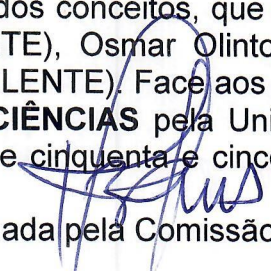
WAINER, I. J. 1963. **Relatório Técnico - Análise e Previsão das Alturas de Onda em Tramandaí**. UFRGS, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH. Porto Alegre. 30 p.

ZAVIALOV, P.; MÖLLER, O. O. Jr.; CAMPOS, E. 2002. First direct measurements of currents on the continental shelf of Southern Brazil. **Continental Shelf Research** 22: 1975–1986.

WILLIAMS, S. J. 2013. Sea-Level Rise Implications For Coastal Regions. **Journal of Coastal Research**, 63, 184-196.

WRIGHT, J., COLLING, A., PARK, D. (Eds.). 1999. **Waves, tides, and shallow-water processes** (Vol. 4). Gulf Professional Publishing.

ATA Nº 001/2019

As quatorze horas do dia dezesseis de janeiro de dois mil e dezanove no Anfiteatro do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica – CECO, no Campus do Vale, reuniu-se a Comissão Examinadora constituída pelos doutores: Felipe Mendonça Pimenta (Universidade de Santa Catarina - UFSC), Osmar Olinto Möller Júnior (Universidade Federal do Rio Grande - FURG) e Eduardo Puhl (IPH/UFRGS) para a defesa da tese intitulada: **“PADRÕES DE CIRCULAÇÃO COSTEIRA DO LITORAL NORTE DO RS”**, a que se submete **MAURO MICHELENA ANDRADE** depois de haver cumprido as exigências regulamentares do Programa. O Coordenador do Programa Prof. Dr. Rommulo Vieira Conceição fez a abertura da sessão e passou a presidência dos trabalhos ao Orientador Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr., conforme o previsto no artigo 69 do Regimento do Programa. O candidato fez a apresentação do seu trabalho e a seguir foi arguido pelos membros da Comissão Examinadora. Às dezessete horas e quarenta e cinco minutos a sessão foi suspensa por cinco minutos para julgamento e atribuição dos conceitos, que foram os seguintes: Felipe Mendonça Pimenta “A” (EXCELENTE), Osmar Olinto Möller Júnior “A” (EXCELENTE), e Eduardo Puhl “A” (EXCELENTE). Face aos conceitos foi conferido ao candidato o grau de **DOCTOR EM CIÊNCIAS** pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Às dezessete hora e cinquenta e cinco minutos a sessão foi encerrada, do que para constar, eu,  Roberto Martins Pereira, lavrei a presente Ata que é assinada pela Comissão Examinadora.


Prof. Dr. Felipe Mendonça Pimenta


Prof. Dr. Osmar Olinto Möller Júnior


Prof. Dr. Eduardo Puhl

Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.

(Presidente)



A Prof.^a Rommulo Vieira Conceição

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geociências

Porto Alegre, 16 de Janeiro de 2019

Parecer de Dissertação de Mestrado

Título: Padrões de Circulação Costeira do Litoral Norte do RS

Área de Concentração: Geologia Marinha

Autor: Mauro Michelena Andrade

Orientador: Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Junior

Examinador: Prof. Dr. Eduardo Puhl

Conceito: A (Excelente)

A presente Tese traz intensa investigação da circulação costeira no litoral do RS através da análise de uma longa série de dados de campo. O trabalho visa compreender as forçantes, as principais influências e correlações entre as mesmas, além de validar teorias sobre efeitos observados em trabalhos passados: importância da oscilação da maré astronômica e ressurgência/subsidência costeira.

O tema escolhido é de grande interesse regional, porém a compreensão da circulação deste tipo de ambiente costeiro, em geral, é uma lacuna a ser preenchida. Portanto, a escolha do tema é de grande relevância e traz grandes contribuições para a área do conhecimento. Isto se deve ao fato, principalmente, pela originalidade e qualidade das campanhas de campo realizadas. Além disso, os métodos utilizados para o processamento e análise dos dados obtidos foram realizados adequadamente de maneira a permitir a correta compreensão do sistema costeiro.

Quanto aos três artigos que compõe a Tese, os temas trabalhos estão concatenados de maneira a contribuir e verificar as hipóteses propostas. Seus resultados são apresentados de maneira didática e clara, permitindo dar suporte às conclusões sobre a circulação costeira na região. Finalmente, o modelo de circulação



Universidade Federal do Rio Grande Do Sul – UFRGS
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH
Departamento de Hidromecânica e Hidrologia – DHH



apresentado é concebido a partir de intensa análise de dados e validado de maneira adequada.

Gostaria de agradecer ao Prof. Elírio pelo convite e confiança no exame desta obra e desejar uma excelente carreira para o aluno Mauro Michelena Andrade.

Fico à disposição,

Abraço

Prof. Eduardo Puhl
Professor Adjunto DHH

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

"PADRÕES DE CIRCULAÇÃO COSTEIRA DO LITORAL NORTE DO RS"

Área de Concentração: Geologia Marinha

Autora: Mauro Michelena Andrade

Orientador: Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.

Examinador: Prof. Dr. Felipe Mendonça Pimenta

Data: 16/01/2019

Conceito: A (Excelente)

PARECER:

A presente tese vem abordar a dinâmica da plataforma continental interna e da zona de surf da costa do Rio Grande do Sul.

O trabalho está redigido no formato de 3 artigos de excelente qualidade, sendo 2 já aceites e publicados em revistas da área.

É um trabalho inovador pela extensão dos períodos observados e pelos processos estudados, em particular a circulação ao longo e através da costa na plataforma interna e a circulação dirigida pelas ondas (inédita).

O trabalho ~~verá~~ muito bem recebido pela comunidade científica dada a grande dificuldade técnica e logística de se realizar medições na zona costeira, principalmente de longo prazo.

Os dados renderão ainda muitos frutos em trabalhos acadêmicos, principalmente na aperfeiçoamento de modelos numéricos e analíticos.

A dissertação cumpre também seu papel ao demonstrar novas técnicas e a utilização de píers em programas de medição, sob baixo custo operacional e maior segurança.

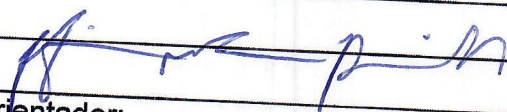
O autor e orientador estão de parabéns pelo desafio enfrentado e sucesso total das campanhas de medicações.

Sugiro somente uma reorganização da introdução geral, que pode ser mais fecunda (resumida) dada ênfase a estudos prévios no Brasil e ao uso inovador do pier de pesca nas medicações

Agradeço o convite, foi um prazer ler todo trabalho.

Com votos de sucesso em sua carreira,

Assinatura:



Data: 16/01/19

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título: PADRÕES DE CIRCULAÇÃO COSTEIRA DO LITORAL NORTE DO RS

Área de Concentração: Geologia Marinha

Autor: MAURO MICHELENA ANDRADE


Orientador: GILRIO TOLDO JÚNIOR

Examinador: OSMAR OLINTO MOLLER JÚNIOR

Data: 16/01/2019

Conceito: A

A TESE ESTÁ MUITO BEM ESTRUTURADA CONTENDO 3 ARTIGOS SENDO 2 JÁ PUBLICADOS E UM SUBMETIDO RECENTEMENTE. O TEXTO É FÁCIL DE LER E BEM OBJETIVO, POR VEZES NÃO VALORIZANDO TODA A DIFICULDADE DE SE OBTER UM CONJUNTO DE DADOS TÃO EXPRESSIVO E TÃO IMPORTANTE QUE PODERÁ AINDO RENDER UMA SÉRIE DE PUBLICAÇÕES. DEÉM DISSO, OS ARTIGOS ACEITOS APRESENTAM IMPORTANTES CONTRIBUIÇÕES PARA O CONHECIMENTO DA ÁREA. PELA ALTA QUALIDADE DO TRABALHO E DA APRESENTAÇÃO ATRIBUO O CONCEITO A.



OSMAR O. MOLLER JR.