

## INFLUÊNCIA DOS VENTOS SOBRE A ESTRUTURA DA COLUNA DA ÁGUA DO ESTUÁRIO DO RIO PAPAQUARA (ILHA DE SC)

Ana Maria Vasconcelos de Freitas (\*), Claudinei José Rodrigues, Gabriela Souza Gomes, Graciany Matias Pereira, Alessandra Larissa D Oliveira Fonseca

\* Universidade Federal de Santa Catarina, PPG-Perícia Ambiental, Laboratório de Oceanografia Química, Biogeoquímica. [anamariafreitas.bio@gmail.com](mailto:anamariafreitas.bio@gmail.com)

### RESUMO

Os estuários são ambientes altamente dinâmicos e interagem com a zona costeira em um fluxo contínuo de materiais, encontrando-se sob severa pressão antrópica e ambiental. Um grande aumento na concentração de nutrientes, proveniente dos diferentes usos pode favorecer a eutrofização e gerar efeito crônico e deletério a biota aquática. A transferência de materiais é principalmente forçada pela drenagem continental e pela influência marinha. Os ventos remotos ao longo da costa causam mudanças no nível do mar, devido ao transporte de Ekman, podendo causar flutuações na boca do estuário, variando conforme frequência, intensidade e direção do vento. Os ventos do quadrante norte, afastam as águas em direção ao oceano e aumentam a influência continental, já os do quadrante sul são os mais intensos e estão associados aos eventos de maré meteorológica no sul do Brasil, aumentando a influência marinha e o tempo de residência da água continental. O presente estudo tem por objetivo avaliar a dinâmica física da coluna da água do estuário do rio Papaquara sob diferentes condições de vento (do quadrante norte e sul). Os resultados demonstram que os dias com predomínio de ventos do quadrante sul apresentaram um aumento significativo na salinidade ( $1.3 \pm 0.6$ ) e área da seção transversal ( $14.8 \pm 1.6 \text{ m}^2$ ), favorecendo um aumento do tempo de residência da água ( $9.9 \pm 6.5$  horas). Sob o vento N, a salinidade foi de  $0.7 \pm 0.2$ , a área da seção transversal e o tempo de residência foram de  $9.8 \pm 1.5 \text{ m}^2$  e  $5.6 \pm 0.8$  horas, respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rio Papaquara, Estuário, Ventos, Estrutura da Coluna da Água

### INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os nutrientes e contaminantes relacionados com o crescimento populacional, aumentaram as entradas de materiais, elevando seus níveis naturais e trazendo substâncias tóxicas para o meio aquático (BRICKER, 2008). A manutenção do equilíbrio ecológico destes ambientes depende do balanço entre a quantidade de matéria orgânica e de nutrientes dissolvidos que entram no sistema e sua capacidade de diluir e de exportar estes materiais para o mar aberto (NIXON ET AL., 1996).

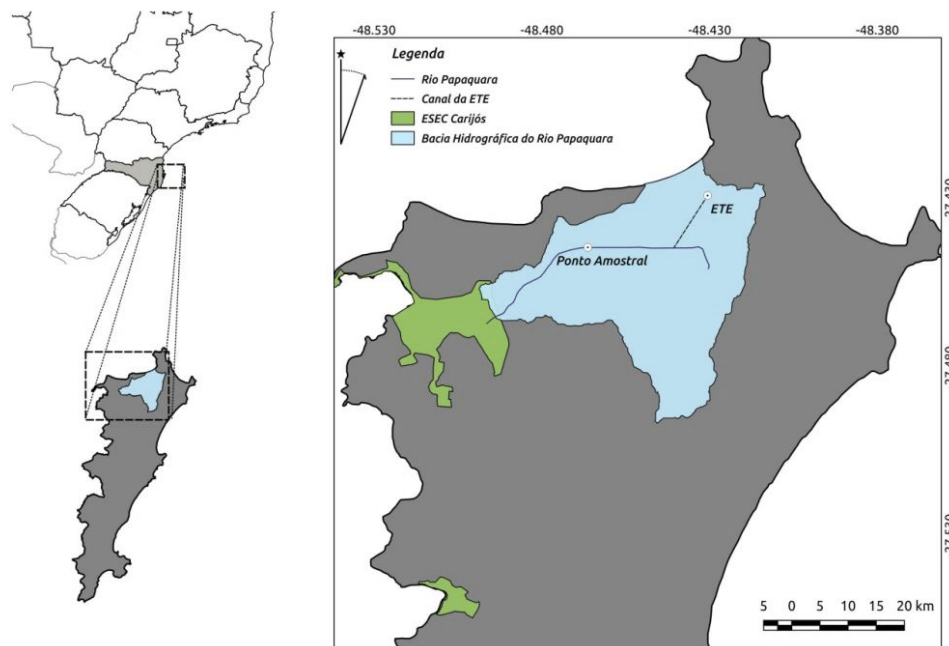
Em muitos estuários, o movimento das marés é um fator chave para a circulação local. No entanto, a circulação residual que modula o transporte de contaminantes e outros traçados passivos é principalmente forçada pela descarga de água doce dos principais afluentes e também pelo estresse local do vento (VAZ & DIAS, 2014). Os ventos remotos ao longo da costa causam mudanças no nível do mar, devido ao transporte de Ekman, afetando várias centenas de quilômetros da costa e gerando as marés meteorológicas. As marés meteorológicas podem causar flutuações na boca do estuário, influenciando as trocas de água entre o continente e o oceano, variando conforme frequência, intensidade e direção do evento do vento (SALAZAR & TAPIA, 2016). No sul do Brasil, os ventos do quadrante norte (N) são os mais frequentes e afastam as águas em direção ao oceano, aumentando a influência continental, já os do quadrante sul (S) são os mais intensos, favorecem o aumento do nível do mar e a influência marítima, gerando as ressacas na costa (PARISE ET AL., 2009). Um maior avanço marítimo no estuário, favorece o aumento do tempo de residência da água continental e possibilita que processos biogeoquímicos tenham mais tempo para ocorrerem (NIXON ET AL., 1996; DETTMANN, 2001), no entanto, em condições de excesso de nutrientes a produção primária pode elevar-se (JUSTIC ET AL., 1995; RABALAIS ET AL., 1996) gerando risco de eutrofização no sistema.

### OBJETIVO

O presente estudo tem por objetivo avaliar a dinâmica física da coluna da água do estuário do rio Papaquara sob diferentes condições de vento (do quadrante norte e sul).

### METODOLOGIA

As amostragens foram realizadas em uma seção transversal do estuário do rio Papaquara, localizado no norte da Ilha de SC (Florianópolis, SC), ao longo de um ciclo de maré de sizígia (DHN 2017), sob condição de ventos N (n=3) e de S (n=3).



**Figura 1- Mapa da bacia hidrográfica do rio Papaquara, com a localização o ponto amostral. Destaca-se a localização da ETE Canasvieiras e da unidade de conservação ESEC Carijós.**

Os parâmetros físicos da coluna da água (área da seção transversal, vazão, temperatura e salinidade) foram avaliados a cada hora em quatro pontos ao longo da seção transversal do rio. As amostragem ocorreram entre 9 de maio de 2017 a 24 de setembro de 2017. A área da seção transversal do local de estudo foi medida e calculada previamente ao início das coletas e atualizada a cada hora. No mesmo instante eram realizadas as medições *in situ* de salinidade e temperatura por um perfilador CTD (Sontek, modelo YSI CastAway) e medições de velocidade e fluxo da corrente utilizando um Medidor de Corrente Magnética Indutiva (OTT, modelo MF Pro).

Os dados meteorológicos, precipitação diária (mm), velocidade (m.s) e direção do vento (graus) do período amostrado foram gentilmente cedidos pela EPAGRI, que tem uma estação meteorológica na BH do rio Papaquara. O tempo de residência no estuário foi definido como o volume de água do estuário dividido pela taxa de vazão do rio, conforme equação 1 (WOLANSKI, 2007, adaptado), a partir dos dados de área da seção e vazão do trecho analisado.

$$T = \left( \frac{Vol}{Q_f} \right) \quad \text{equação (1)}$$

Onde: T: Tempo de residência em segundos  
 Vol: Volume do estuário em m<sup>3</sup>;  
 Q<sub>f</sub>: Vazão fluvial em m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>;

Aplicou-se a análise de variância (ANOVA) *one-way*, gerada pelo Programa R, pacote GAD, versão 3.1.2. ([www.r-project.org/](http://www.r-project.org/)), para averiguar se houve diferenças significativas (p<0,05 ou 5%) entre as variáveis meteorológicas (precipitação, velocidade e direção do vento) nos períodos amostrados (sob influência dos ventos N e S) e avaliar se de fato as amostragens foram feitas de forma representativa a estas condições. Os dados meteorológicos dos quinze dias anteriores até o dia da amostragem foram aplicados ao teste após testar o princípio da homocedasticidade das variâncias. A ANOVA também foi aplicada para averiguar diferenças significativas entre as variáveis físicas da coluna da água nos períodos amostrados. Variâncias que não apresentaram homocedasticidade aplicou-se o teste não paramétrico Kruskal-Wallis, com o auxílio do Programa R, versão 3.1.2. ([www.r-project.org/](http://www.r-project.org/)), com nível de significância (p<0,05 ou 5%), o Programa R também foi utilizado para a análise de correlação simples de Pearson para verificar correlações significativas (p<0,05 ou 5%) entre as variáveis.

A similaridade, ou dissimilaridade, no conjunto de variáveis físicas da coluna da água entre os períodos amostrados foi avaliada pela análise de coordenadas principais (PCoA) e testada pelo ANOSIM *one-way*. Estas análises foram geradas a partir da matriz de distância Euclidiana, gerada com dados normalizados e aplicando 999 permutações. Essas análises foram realizadas pelo software PRIMER 6®.

## RESULTADOS

Os períodos amostrais (ventos do quadrante N e S) apresentaram diferença significativa para velocidade e direção dos ventos (Tabela 1). As maiores médias de intensidades de ventos foram registradas nas coletas com predominância de ventos do quadrante S, atingindo médias acima de  $5.7(\pm 2.8)$  km.h<sup>-1</sup>. A diferença apresentada dos dados meteorológicos de velocidade e direção dos ventos entre os dois períodos foi importante para demonstrar que as amostragens foram feitas de forma representativa a estas condições.

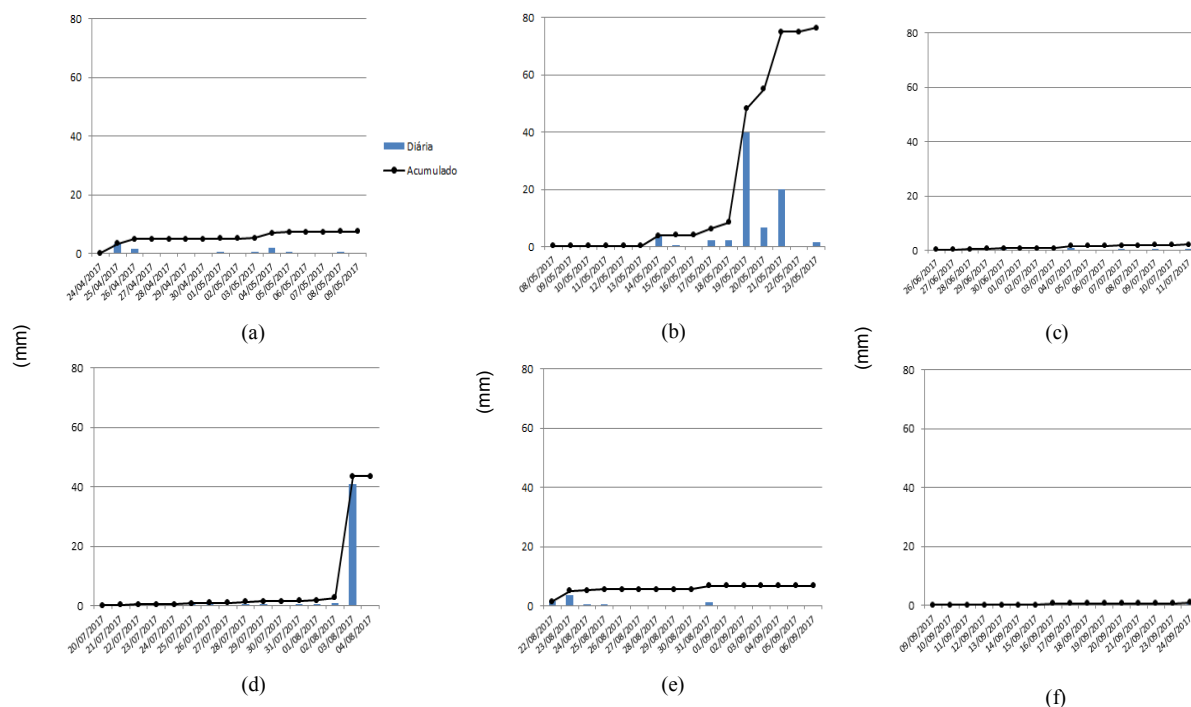
**Tabela 1- Resultados obtidos no teste ANOVA entre os períodos de vento norte (N) e sul (S) para velocidade (m.s<sup>-1</sup>) e direção (graus) do vento. GL(grau de liberdade); SQ(Soma dos quadrados médios); QM (quadrados médios); F e p-valor<0.05.**

Diferença entre velocidade do vento por período amostral						
Estatística		N		Tratamento		
Média		4.4667		S		
Desvio padrão		2.5478		2.3705		
Causa de variação	GL	SQ	QM	F	p-valor	
Tratamento	1	35.042	35.042	5.7866	0.01	
Resíduo	22	133.223	6.056			
Total	23	168.265				

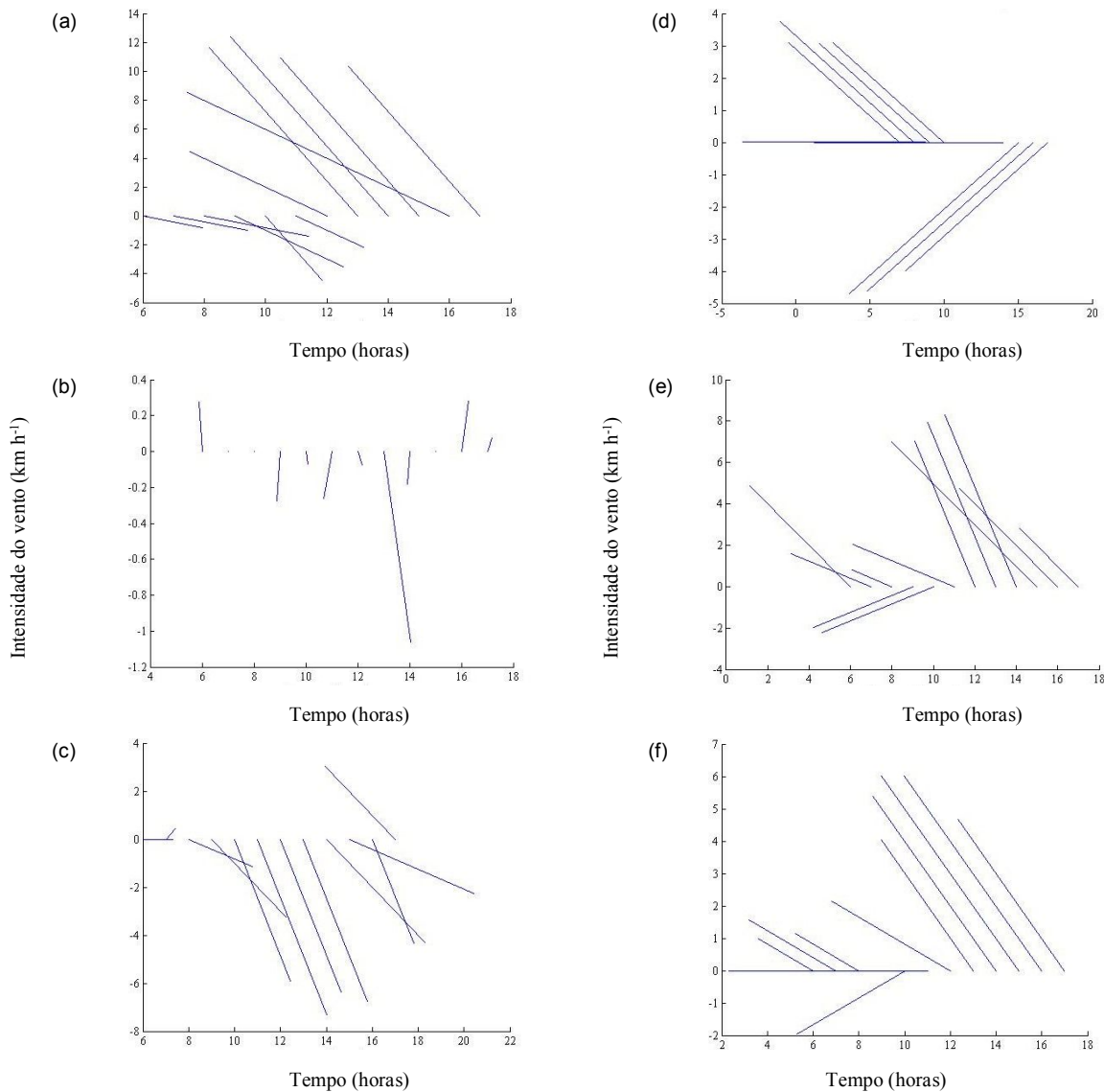
Diferença entre direção do vento por período amostral						
Estatística		N		Tratamento		
Média		148.9333		S		
Desvio padrão		47.4729		57.6212		
Causa de variação	GL	SQ	QM	F	p-valor	
Tratamento	1	10280	10279.6	3.6885	0.05	
Resíduo	22	61313	2786.9			
Total	23	71593				

As precipitações pluviométricas acumuladas nos quinze dias que antecederam as amostragens variaram entre 2.2 (terceiro dia) e 76.4mm (segundo dia) do período de vento N e 1.0 (terceiro dia) e 43.6mm (primeiro dia) do período de vento S (Figura 2), não apresentando diferença significativa entre os dois períodos.



**Figura 2. Precipitação (mm) diária e acumulada dos 15 dias que antecederam cada amostragem, na região do rio Papaquara, no período de ventos do quadrante N (a, b e) e do quadrante S (d,e,f). Amostragem de 09/05 a 24/09/2017.**

A intensidade do vento no período sob predominância de ventos do quadrante N manteve-se fraca ( $4.2 \pm 4.0 \text{ km.h}^{-1}$ ), com maiores intensidades no terceiro dia (máxima de  $7.9 \text{ km h}^{-1}$ ). No entanto, no primeiro dia deste mesmo período (09/05/2017), o vento mudou de direção no meio do ciclo de maré, atingindo até  $13.4 \text{ km h}^{-1}$  sentido sudeste às 12hs. No período sob predominância de ventos do quadrante sul, os ventos foram de  $7.4 \pm 2.8 \text{ km.h}^{-1}$ , com a maior intensidade na amostragem do dia 04/08/2017 (de  $12.9 \text{ km h}^{-1}$ ) e menor em 24/09/2017 (de  $2.6 \text{ km h}^{-1}$ ).

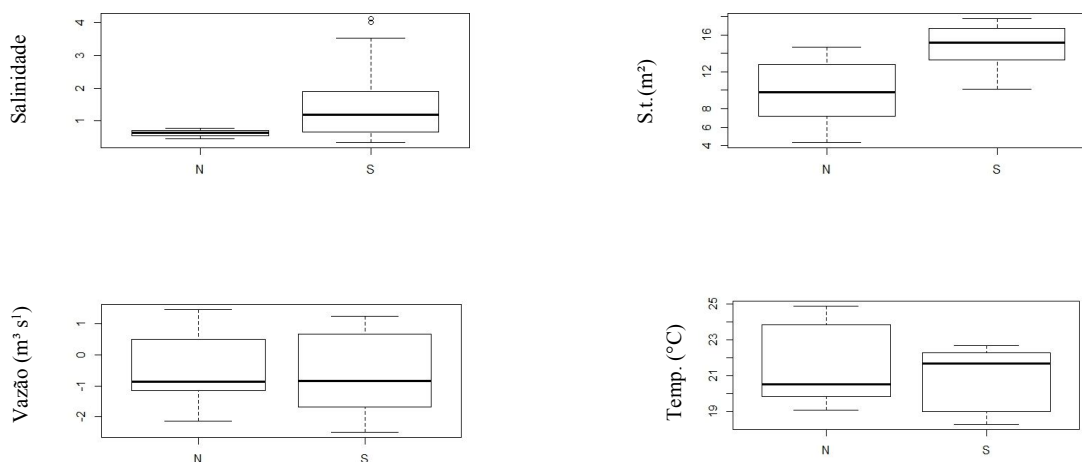


**Figura 3. Direção (em graus, posição das linhas) e velocidade ( $\text{km.h}^{-1}$ ) do vento em um ciclo de maré, na região do rio Papaquara, no período de ventos do quadrante N (a, b e) e do quadrante S (d,e,f). Amostragem de 09/05 a 24/09/2017.**

As variáveis salinidade e a área da seção transversal do trecho amostrado apresentaram diferença significativa entre os períodos de ventos do quadrante N e S, no entanto, o mesmo não foi verificado com a vazão e a temperatura (Tabela 2). Na avaliação de similaridade do conjunto de parâmetros físicos da coluna da água (área da seção transversal, vazão, salinidade e temperatura), o teste ANOSIM apresentou resultados significativos entre os períodos N x S (Tabela 3). A PCoA (Figura 5) mostrou graficamente a dissimilaridade, indicando que a salinidade apresentou 43.1% e a área da seção transversal 30.6% da variabilidade, representando as duas variáveis 73.7% da variação dos dados analisados. Os dias com predominância de ventos do quadrante sul apresentaram maiores valores para estas duas variáveis (Tabela 2; Figura 4), tal fato justifica-se devido o empilhamento marítimo forçado pelo transporte de Ekman, sendo que as duas variáveis correlacionaram-se positivamente ( $p=0.001$ ;  $N=36$ ).

**Tabela 2. Média  $\pm$ desvio padrão, valores mínimos – máximos e análise de variância de salinidade (Sal.), áreas da seção transversal (s.t.), vazão e temperatura (Temp.) do rio Papaquara, com predomínio de ventos do quadrante N (09/05; 23/05 e 11/07/2017) e do quadrante S (04/08; 06/09 e 24/09/2017), N=12, (ns) p-valor não significativo**

Variáveis	Vento N			Vento S			Análise de Variância
	09/05	23/05	11/07	04/08	06/09	24/09	
Sal.	0.8 ( $\pm$ 0.7)	0.6 ( $\pm$ 0.0)	0.6 ( $\pm$ 0.0)	1.2 ( $\pm$ 1.3)	1.2 ( $\pm$ 0.6)	0.6 ( $\pm$ 0.5)	Kruskal W. p-valor=0.001
s.t. (m <sup>2</sup> )	8.0 ( $\pm$ 3.4)	11.6 ( $\pm$ 2.3)	8.8 ( $\pm$ 2.6)	16.7 ( $\pm$ 1.4)	14.9 ( $\pm$ 2.2)	13.5 ( $\pm$ 2.0)	Anova p-valor=0.000
Vazão (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	-0.4 ( $\pm$ 0.8)	1.2 ( $\pm$ 1.0)	0.7 ( $\pm$ 1.0)	0.4 ( $\pm$ 1.0)	-0.4 ( $\pm$ 1.6)	0.9 ( $\pm$ 1.0)	Anova p-valor=ns
Temp. (°C)	24.6 ( $\pm$ 0.8)	19.8 ( $\pm$ 0.4)	20.8 ( $\pm$ 0.6)	18.8 ( $\pm$ 0.2)	21.7 ( $\pm$ 0.5)	22.3 ( $\pm$ 0.1)	Kruskal W. p-valor=ns
	22.2-24.9	19.1-20.3	19.6-21.6	18.3-19.1	20.7-22.4	22.1-22.7	



**Figura 4. Mediana, quartis, mínimo e máximo e outlier da Salinidade; Vazão (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), seção transversal (s.t. m<sup>2</sup>) e Temperatura (Temp., °C), nas amostragens sob condição de ventos do quadrante N e S, N=36.**

**Tabela 3. Resultados do teste de ANOSIM entre os parâmetros físicos da coluna da água no período de ventos do quadrante N e S no rio Papaquara**

Comparação de períodos	R-estatístico	p-valor	Nº de permutações
N x S	0.175	0.001	999

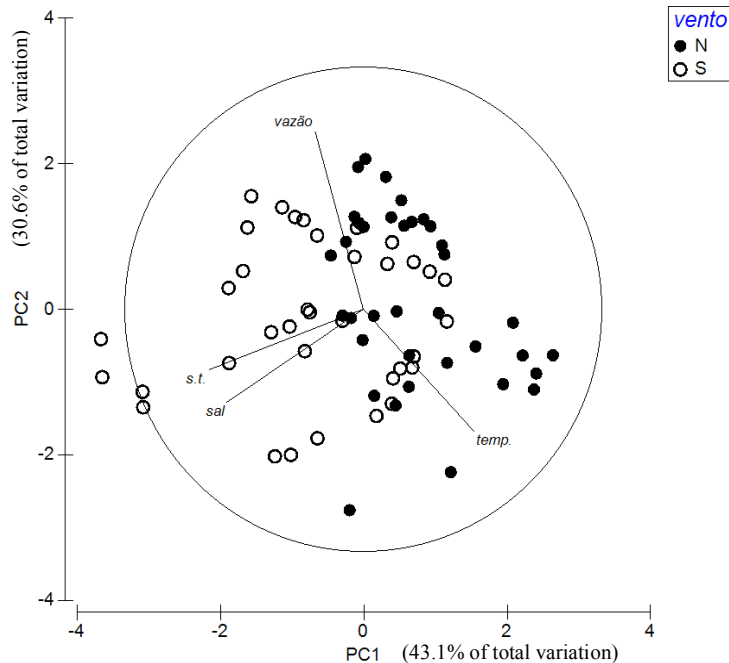
Os períodos de ventos N e S apresentaram diferença significativa para tempo de residência (Tabela 4). A variável mostrou-se mais elevada em dias com predomínio de ventos do quadrante sul. Sob ventos do quadrante S, o tempo de residência da água no estuário do rio Papaquara foi de 9.9 ( $\pm$ 6.5) horas, enquanto no período de ventos do quadrante N foi de 5.6 ( $\pm$ 0.8) horas.

**Tabela 4. Resultados obtidos no teste ANOVA entre os períodos de vento norte (N) e sul (S) para tempo de residência com (grau de liberdade) gl= 1 e (probabilidade) p<0.05. Nível de significância de 95%.**

Estatística	Diferença entre tempo de residência por período amostral				p-valor
	N		S		
Média	5.6		9.9		0.01
Desvio padrão	0.8		6.5		
Causa de variação	GL	SQ	QM	F	
Tratamento	1	727	726.7	5.479	
Resíduo	64	8488	132.6		
Total	65	9215			



Rodrigues (2016) analisou a mesma bacia hidrográfica e constatou que o aumento da salinidade implica numa maior pressão hidráulica do mar adjacente sobre o estuário do rio Papaquara, aumentando o tempo de residência da água. Esta condição gera zonas de estagnação de água em regiões interna do estuário, conseqüentemente, a degradação da qualidade da água, já que há fontes difusas (urbanização) e pontual (ETE Canasvieiras) de poluentes para o sistema (Rodrigues, 2016).



**Figura 5. Análise de Coordenadas Principais (PCA) com variáveis físicas da água dos períodos de ventos do quadrante N e do quadrante S, amostragem em 2017, N=288. Legenda: Variáveis sal (salinidade), s.t. (seção transversal), vazão e temp. (temperatura).**

Elevada concentração de materiais não conservativos nos estuários, como os nutrientes fosfatados e nitrogenados, estimulam o crescimento de produtores primários e podem desencadear o processo de eutrofização (Cloern, 2001), o qual pode ser controlado pela capacidade do sistema em exportar tais materiais para o mar aberto. Assim, se o estuário tiver um longo tempo de residência da água haverá maior possibilidade destes nutrientes serem absorvidos pelos produtores primários, aumentando a suscetibilidade do sistema frente à eutrofização (Bricker et al., 2008). Estudos deste âmbito precisam considerar a dinâmica física do sistema e, no caso do rio Papaquara, a direção prevalescente do vento tem papel significativo pelo transporte de Ekman.

## CONCLUSÃO

Os ventos, pelo transporte de Ekman, promovem mudanças na dinâmica física do estuário do rio Papaquara. Os ventos do quadrante sul aumentaram a influência marítima no sistema, gerando marés meteorológicas e uma tendência no aumento do tempo de residência da água. Sob ventos do quadrante N, as salinidades medidas foram as menores, indicando a maior influência da água continental dentro do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANSARI, Abid A.; SARVAJEET, Gill S.; KHAN, Fareed A. Eutrophication: Threat to aquatic ecosystems. (143-170p) In: **Eutrophication: causes, consequences and control**. Editors: ANSARI, Abid A; LANZA, Guy R.; SARVAJEET, Gill S.; RAST, Walter. Springer 2011.
2. BRICKER, S.B. et al. **Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries: A decade of change**. Harmful Algae 8 (2008) 21-32.
3. CLOERN, J.E. **Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem**. Marine Ecology Progress Series. Vol. 210: 223-253, 2001.
4. DETTMANN, E. H., 2001. **Effect of water residence time on annual export and denitrification of nitrogen in estuaries: a model analysis**. Estuaries 24: 481-490.

5. Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). **Tabua de marés**. Disponível em:< <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/>>. Acesso em: 10 nov 2017.
6. JUSTIC, D. et al. **Changes in nutrition structure of river-dominated coastal water: stoichiometric nutrient balance and its consequences**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (1995) 40, 339-356.
7. NIXON, S.W. et al. **The fate of nitrogen and phosphorus at the land-sea margin of the North Atlantic Ocean**. *Biogeochemistry*. 35:141-180, S.P. 1996.
8. PARISE, C.K.; CALLIARI, L.J.; KRUSCHE, N. 2009. **Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion**. *Brazilian Journal of Oceanography*. 57(3): 175-188.
9. RABALAIS, N.N. et al. **Nutrient changes in the Mississippi river and system responses on the adjacent continental shelf**. *Estuaries*, Vol.19, No. 2, Jun., 1996.
10. RODRIGUES C. J. **Águas de Carijós: passado, presente, futuro e seus impactos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Biológicas. Programa de Pós Graduação em Perícias Criminais Ambientais. Florianópolis, 2016.
11. SALAZAR, R.C, TAPIA, I.M. **Influence of the Remote Forcing and Local Winds on the Barotropic Hydrodynamics of an Elongated Coastal Lagoon**. *Journal of Coastal Research*, 32(1):116-130, 2016.
12. SILVA, A. et. al. **Application of ecological indicators in coastal watershed under high pressure during summer period**. *RBRH* vol.21 no.3 Porto Alegre July/Sept. 2016.
13. VAZ, N., & DIAS, J. M. (2014). **Residual currents and transport pathways in the tagus estuary, portugal: The role of freshwater discharge and wind**. *Journal of Coastal Research*, *Si*(70), 610-615.
14. WOLANSKI, E. **Estuarine ecohydrology**. Netherlands, Elsevier .2007. 157p.