INTERAÇÃO ENTRE NÍVEL FLUVIAL E CONDICIONANTES METEOROLÓGICAS NA ZONA COSTEIRA – ESTUDO DE CASO NO BAIXO CURSO DO RIO ITAJAÍ-AÇÚ

Bento Almeida Gonzaga [1], Janete Josina de Abreu [2] e Jean Marcel de Almeida Espinoza [3]

[1]Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Geociências, Campus João David Ferreira Lima, s/n - Trindade - CEP 88.040-900 - Florianópolis/SC - Brasil. Centro de Filosofia e Ciências Humanas - Bloco F (3º andar) e profbentoag@gmail.com ; [2]Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Geociências, Campus João David Ferreira Lima, s/n - Trindade - CEP 88.040-900 - Florianópolis/SC - Brasil. Centro de Filosofia e Ciências Humanas - Bloco F (3º andar) e janete.abreu@ufsc.br ; [3]Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Caçador, Av. Fahdo Thomé, 3000 - Champagnat, Caçador - SC, 89500-000 e jean.espinoza@ifsc.edu.br

RESUMO

As inundações fluviais geram risco e grandes desastres que afetam áreas urbanas em todo o mundo, causadas por eventos extremos, cada vez mais frequentes e intensos nas últimas décadas, associados às mudanças climáticas. Neste estudo, baseado principalmente no método de Decomposição de Valores Singulares (SVD), avaliou-se a contribuição das variáveis meteorológicas e meteo-oceanográficas (precipitação, vento, pressão atmosférica reduzida ao nível do mar - SLP) para as oscilações do nível fluvial no baixo curso do rio Itajaí-Açú durante o período de 1989 e 2005 e, consequentemente, para os cenários de inundação local. Os resultados obtidos apontam a atuação dos ventos de quadrante sul, que provocam sobrelevação do nível do mar na costa regional, como o fator preponderante para as oscilações fluviométricas positivas e o aumento do nível de inundações na área de estudo, indicando o papel das interações entre escoamento fluvial e processos meteo-oceanográficos nas áreas costeiras sujeitas a inundações fluviais.

Palavras-chave *— Fluxo Fluvial, Nível do Mar, Inundações, Gestão de Riscos e Desastres.*

ABSTRACT

River floods are source of major natural disasters that affect urban areas around the world, caused by extreme events that have become more frequent and intense in recent decades, due to climate change. In this study, based mainly on the Singular Values Decomposition (SVD) method, was evaluated the contribution of meteorological and meteo-oceanographic variables (Precipitation, Winds and Sea Level Pressure - SLP) for fluviometric level oscillations in the low course of the Itajaí-Açú river between 1989 and 2005 and, consequently, for local flood scenarios. The results indicate the action of south quadrant winds, which cause sea level increase on the regional coast, as the preponderant factor for positive fluviometric oscillations and increase in the level of floods in the study area, indicating the role of interactions between fluvial flow and meteo-oceanographic processes in coastal areas subject to river flooding.

Key words *— Fluvial Flow, Sea Level, Floodings, Disaster Risk Management.*

1. INTRODUÇÃO

Os impactos das mudanças climáticas e as ações antrópicas sobre os recursos naturais, principalmente como consequência do processo de urbanização, têm intensificado as alterações nos fluxos de energia e no ciclo da água nos ambientes naturais [1]. Esses impactos causam efeitos nas características físicas de ecossistemas aquáticos, bem como sobre a dinâmica dos rios, modificando seus ciclos de cheias e seus tempos de retorno, que descrevem os padrões de extravasamento desses corpos d'água [1].

Na zona costeira, esses impactos das mudanças climáticas afetam significativamente a dinâmica hidrológica e a suscetibilidade a inundações no baixo curso dos rios, onde o escoamento dos canais fluviais está sujeito a oscilações positivas do nível do mar, decorrentes da atuação da maré astronômica e meteorológica, durante a atuação de eventos extremos. A ocorrência de maré positiva resulta em sobreelevação do nível do mar, aumentando o nível de inundação fluvial na zona costeira e alterando, consequentemente, a classificação do nível de perigo [2] e de risco para nessas áreas.

Os efeitos do escoamento de vazões fluviais em áreas sujeitas à maré e os impactos do regime hidrológico sobre os sistemas de drenagem de áreas costeiras são ainda pouco estudados [3].

Nesse sentido, o presente trabalho buscou entender a contribuição dos fatores meteorológicos, com destaque para, além da precipitação, o impacto de variáveis meteo-oceanográficas, tais como ventos e pressão atmosfética reduzida ao nível do mar (SLP) e suas interações com o fluxo fluvial, nas oscilações do nível fluviométrico local e nos cenários de inundação no baixo curso do rio Itajaí-Açu.

A bacia hidrográfica do Itajaí-Açu, apresenta um histórico de inundações, com registros oficiais desde o século XIX. Somente para o período entre 1950 e 2010 a região

apresentou 66 registros oficiais de inundações caracterizadas como desastres naturais, representando 43% do total de ocorrências similares registradas em Santa Catarina nesse período [4]. Neste estudo, o foco foi o baixo curso do rio Itajaí-Açu, na intersecção dos municípios de Itajaí e Navegantes, principalmente pela concentração populacional e pela importância econômica da região, que abriga o segundo maior complexo portuário em movimentação de contêineres da América Latina, estando atrás apenas do Porto de Santos/SP.

O estuário do rio Itajaí-Açu é submetido a um regime de micromarés de tipo misto com predominância semi-diurna, com altura média de maré na desembocadura fluvial da ordem de 0,8 m, com mínimas de 0,3 m durante os períodos de quadratura e 1,2 m nos períodos de maré de sizígia [5]. A costa regional está sujeita igualmente à ocorrência de marés meteorológicas positivas, associadas à passagem de frentes frias na região. Nesse contexto, a sobrelevação do nível da água na costa pode atingir até 1m em relação ao nível da maré astronômica [6].

O baixo curso do rio Itajaí-Açu é formado por planície iniciando na altura de Blumenau, cerca de 70km da linha de costa, apresentando declividades baixas, da ordem de 0,03% [5]. A área de planície próxima à desembocadura fluvial abriga grande parte da zona urbana dos municípios de Itajaí e de Navegantes, e estão expostas ao risco de inundação fluvial.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para determinar a influência de cada variável meteorológica, com destaque para a atuação dos ventos e da SLP sobre a dinâmica do nível fluviométrico no baixo curso do rio Itajaí-Açu, foi empregado o método de Decomposição de Valores Singulares (SVD) para os dados compreendendo o período de 1989 a 2005. Este é um método de análise multivariada utilizado para mensurar a contribuição de variáveis de interesse à variabilidade temporal e espacial de campos geofísicos. Os resultados da aplicação do método apontam onde as variabilidades das variáveis e do campo de interesse estão fortemente relacionadas [7].

A implementação do método envolve uma fatoração da matriz M em três matrizes U, Σ e V* conforme Equação 1:

$$M = U \times \Sigma \times V^* \qquad \textit{Eq. 1}$$

onde U é uma matriz unitária composta pelos valores unitários a esquerda de M, ou seja, são autofunções de MxM*; Σ é uma matriz diagonal composta pelos valores singulares, que são as raízes quadradas dos autovalores não nulos de M*xM ou MxM* e V* é uma matriz unitária, conjugada transposta de V, que contém os valores singulares a direita de M, ou seja, as autofunções de M*xM.

O SVD é uma metodologia consolidada para análises de dados meteorológicos, devido à complexidade da dinâmica que compreende esse tipo de pesquisa, tendo sido utilizada pela primeira vez para dados meteorológicos por Prohaska na década de 1970 [8], com o objetivo de analisar a interrelação entre dados de temperatura e pressão. Com essa consideração o método SVD foi aplicado no presente trabalho para determinar possíveis interrelações entre um conjunto de dados de nível fluviométrico (campo geofísico) e dados meteorológicos de vento, precipitação e SLP para o período de análise.

Complementarmente, também foi plotada a direção predominante dos ventos locais para o período em análise, permitindo conferir o quadrante de maior contribuição para a ocorrência de marés meteorológicas positivas na costa regional.

Para a analálise proposta, utilizou-se como referência local de oscilação fluviométrica os dados da estação fluviométrica nº 83870000 –, localizada no município de Ilhota, situado a cerca de 35km da linha de costa, e adiquiridos no portal Hidroweb da ANA (Agência Nacional das Águas). Os registros diários de cota fluvimétrica obtidos contemplam uma série temporal de 17 anos, entre 1 de Janeiro de 1989 até 31 de Dezembro de 2005. As variáveis meteorológicas foram obtidas a partir do banco de dados online da NOAA/NASA (NCEP/NCAR Reanalysis 1), que fornece medições diárias através da compilação de dados de sensores de satélites, bóias oceanográficas, estações de terra e modelagem de interpolação. Junto a essa base de dados, adquiriu-se para o mesmo período as componentes zonal e meridional do vento (U-wind e V-wind), precipitação e os dados de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (SLP).

Com os dados organizados em uma planilha foi necessária uma padronização dos mesmos, pois cada variável física analisada encontrava-se em uma escala diferente. Para deixar todas as variáveis na mesma escala, realizou-se a normalização dos dados, que conforme [9], consiste em transformar esses parâmetros em vetores com o tamanho unitário, de zero a um. Esse procedimento se faz necessário para permitir a análise estatística dos dados.

Os dados disponíveis para a pesquisa apresentam algumas lacunas. Para os anos de 1989 e 1991, os registros brutos relativos, respectivamente, aos meses de abril e feveriero, apresentam o status de cota real (medida), mas, na série de dados consistidos, estão classificados como dados estimados. Para os anos de 1992 e 1993 a série de dados disponíveis apresenta muitos vazios (dados brutos não registrados). Já para ano 2000 a série dos dados brutos apresentou lacunas nos registros matinais e vespertinos, apresentando apenas as médias diárias. Apesar das lacunas apontadas, devido a escasez de informações disponibilizadas para a região, os dados obtidos foram considerados como consistentes para análise realizada.

A disponibilidade de dados consistentes que permitam produzir análises mais profundas a respeito das condicionantes meteorológicos que possam influenciar o nível fluviométrico e os cenários de inundação fluvial na zona costeira é fundamental para a gestão de riscos e desastres. Nesse sentido, salienta-se, no contexto da pesquisa efetuada,

a indisponibilidade ao público de registros da estação fluviométrica nº 83920000 do Porto de Itajaí, listada no portal Hidroweb, mesmo após contato com as instituições responsáveis pela coleta e publicização dos dados. Na mesma linha, não estão disponíveis ao público dados de monitoramento de nível fluviométrico em 2 pontos no baixo curso do rio Itajaí-Açú, de estações mantidas pela Defesa Civil Municipal de Itajaí (estações DC01 e DC02). Essa situação dificulta e limita o desenvolvimento de novos estudos e as contribuições para a gestão local de riscos e desastres.

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos com base na Decomposição de Valores Singulares (SVD) apontaram, dentre as variáveis meteorológicas consideradas, uma maior contribuição dos ventos para a dinâmica de oscilações do nível fluviométrico no baixo curso do rio Itajaí-Açu, com a direção dos ventos respondendo por 54,35% do sinal e a intensidade dos ventos por 18,87% (Figura 1). A contribuição global da atuação dos ventos representou, portanto, 73,22% da curva de oscilação fluviométrica registrada durante o período analisado. Secundariamente a influência da Pressão Reduzida ao Nível do Mar (SLP) contribuiu com 17,5%, do sinal, enquanto as precipitações responderam por cerca de 9% da oscilação fluviométrica registrada na área de estudo entre 1989 e 2005.

Os fatores meteo-oceanográficos analisados, relacionados à atuação dos ventos e da SLP na costa regional, representaram 90,88% do sinal do nível fluviométrico registrado. Ambos fatores exercem influência direta nas oscilações do nível do mar na costa [10] e os resultados obtidos denotam a importância da maré meteorológica para as oscilações do nível fluviométrico no baixo curso do rio Itajaí-Açu.

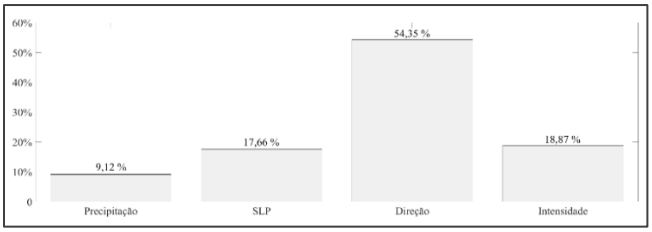

Figura 1. Percentual de contribuição das variáveis meteorológicas analisadas sobre a oscilação fluvial local.

A Figura 2 ilustra os resultados da análise da direção dos ventos locais, indicando para a região, o predomínio de ventos de quadrante Nordeste e Sul-Sudeste durante o período em análise.

Os ventos de quadrante nordeste predominam durante todo o ano, com aumento de importância dos ventos provenientes do quadrante sul durante o inverno e primavera, em função do aumento da ocorrência e intensidade de passagem de frentes frias na região [5].

Na costa regional os ventos de quadrante norte e sul resultam, respectivamente, na diminuição e no aumento do nível do mar na costa [5, 10].

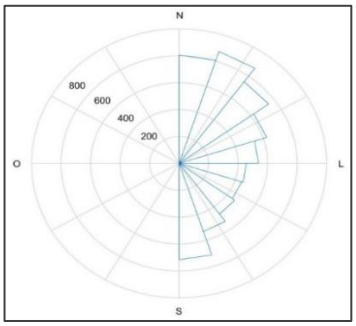

Figura 2. Distribuição da direção dos ventos no baixo curso do rio Itajaí-Açú entre Janeiro de 1989 e Dezembro de 2005.

Considerando o impacto dos ventos de quadrante sul na sobrelevação do nível do mar na costa regional, a Figura 3 apresenta a sobreposição da série histórica de oscilações do nível fluviométrico e de dias com registro de vento sul. Os resultados apontam para a correlação direta entre níveis fluviométricos altos e presença de ventos do quadrante sul na região, demostrando o impacto da ocorrência de maré meteorológica positiva para o aumento da do nível fluviométrico e de inundação fluvial na área de estudo.

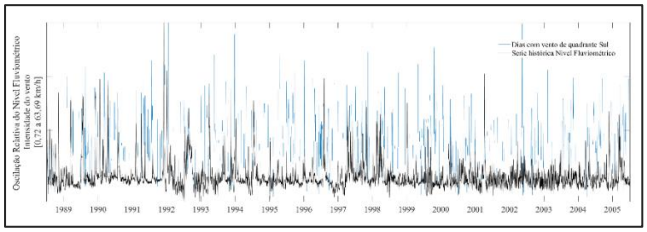

Figura 3. Sobreposição dos dados de oscilação relativa do nível fluviométrico (em azul claro) e ocorrência de ventos em quadrante Sul (em azul escuro) para o período de Janeiro de 1989 e Dezembro de 2005.

4. DISCUSSÃO

A análise efetuada apontou a importância da contribuição das diferentes variáveis meteorológicas e sobretudo meteo-oceanográficas para a dinâmica de oscilação do nível fluviométrico no baixo curso do rio Itajaí-Açu.

A oscilação da maré astronômica na costa é influenciada, principalmente, por forçantes meteorológicos locais e remotas, com destaque para a pressão atmosférica e a tensão de cisalhamento do vento, sendo que esta última é consideravelmente mais importante [5]. Conforme indicado anteriormente, a ação de ventos de quadrante sul contribui para o empilhamento da massa d'água na costa e ocorrência de maré meteorológica positiva na costa regional [5] [10]. Essa sobreelevação do nível do mar, decorrente da atuação de ventos de quadrante sul e da presença de um sistema de baixa pressão na superfície marítima, contribui para o barramento

do regime de escoamento fluvial, e, consequentemente, para o aumento do nível fluviométrico e de inundação local, que pode ser agravado em presença de marés de sizígia. Tais cenários resultam na ampliação da mancha de inundação no baixo curso do rio Itajaí-Açu durante os períodos de forte precipitação, gerando risco e possíveis desastres, com impactos significativos para a população local e infraestruturas.

Os resultados obtidos revelaram o papel do conhecimento da contribuição de cada variável meteorológica e meteo-oceanográfica sobre a dinâmica de oscilação do nível fluviométrico no baixo curso dos canais fluviais que deságuam na zona costeira. Apontaram ainda que as tendências comportamentais das variáveis meteo-oceanograficas representam indicadores valiosos para o monitoramente e alerta em áreas de planície no baixo curso fluvial, sujeitas ao risco de inundações. Também evidênciaram a necessidade de integrar, juntamente com a maré astronômica, as variáveis meteo-oceanográficas na simulação de manchas de inundação fluvial de diferentes tempos de retorno nas áreas de planície costeira. Tal perspectiva fornece subsídios ao aprimoramento dos sistemas de monitoramento e alerta e de outras iniciativas do poder público e demais atores sociais, para a prevenção e mitigação dos riscos de inundações nas áreas costeiras sob influência de interações entre fatores meteo-oceanográficos e escoamento fluvial.

5. CONCLUSÕES

A análise efetuada permitiu identificar a contribuição preponderante da atuação de ventos de quadrante sul para as oscilações positivas do nível fluviométrico e de inundação no baixo curso do rio Itajaí-Açu, decorrentes das interações entre escoamento fluvial e processos meteo-oceanográficos na costa regional.

Esses resultados apontam, para além dos indíces pluviométricos, a importância do monitoramento das variáveis méteo-oceanográficas, aliado ao contexto de maré astronômica, para a análise da suscetibilidade e de riscos a inundações no baixo curso fluvial nas áreas de planície na zona costeira, em apoio à gestão de de riscos e de desastres por inundações pelos órgãos competentes.

Os resultados obtidos também indicaram a aplicabilidade da metodologia empregada (SVD) na gestão de riscos de desastres naturais, conforme indicado por [11], permitindo aprofundar a compreensão da interação e contribuição de diferentes fatores ambientais nos cenários de risco relacionados à análise de dados hidrometeorológicos.

Destaca-se, entretanto, a necessidade de uma base de dados disponível mais adequada, espacialmente adensada e sistematicamente revisada pelos orgãos responsáveis, com ampla consistência dos registros, que permita o desenvolvimento e aprimoramento de estudos que possam contribuir para análise da suscetibilidade a inundações na zona costeira e para a gestão de riscos e desastres.

6. REFERÊNCIAS

[1] U. Nickus, K. Bishop, M. Erlandsson, C. D. Evans, M. Forsius, H. Laudon, D. M. Livingstone, D. Monteith, and H. Thies, Direct Impacts of Climate Change on Freshwater Ecosystems. *Climate Change Impacts On Freshwater Ecosystems*, 38-64 (pp), 2010.

[2] B. E. O. Monte, L. R. Monteiro, T. G. A. Tavares, J. A. Campos, F. M. Vanelli, A. L. L. Silveira, and J. A. Goldenfum. Índice de perigo aplicado a inundações com influência de maré. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2017.

[3] C. F. Neves, and D. Muehe. Vulnerabilidade, impactos e adaptação às mudanças do clima: a zona costeira. *Parcerias Estratégicas (Impresso)*, v. 27, p. 217-295, 2008.

[4] CEOPS/SC, *Centro de Operação do Sistema de Alerta*. Disponível em: < http://ceops.furb.br/index.php/sistema-de-alerta/picos-de-enchentes>. Acessado em 23/01/2022.

[5] C. A. F. Schettini**.** Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-açu, SC. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 1, p. 123-142, 2002.

[6] E. C. Trucollo. Marés meteorológicas e forçantes atmosféricas locais em São Francisco do Sul – SC. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. 100p. 1998.

[7] H. Björnsson, and S. A. Venegas. A *Manual for EOF and SVD analyses of Climatic Data. Center for Climate and Global Change Research*, 91: 112 – 134. 1997.

[8] C.S. Bretherton, C. Smith, and J.M. Wallace. An Intercomparison of Methods for Finding Coupled Patterns in Climate Data. *Journal of Climate*, 5: 541 – 560. 1992.

[9] F. C. Crespo. Caracterização das condições meteorológicas responsáveis pelo acúmulo e ablação de neve na geleira Union, Antártica. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanologia). Universidade Federal do Rio Grande, 2018.

[10] A. Vanz, L. H. Garbossa, L. G. Fernandes, M. Boll, R. V. de Souza, L. F. Vianna, and G. S. Rupp. Efeito de variáveis meteorológicas sobre o comportamento do Nível do mar na costa catarinense, Brasil. In: Congresso Sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras Dos Países De Expressão Portuguesa 8: 1-13. 2015.

[11] B. A. Gonzaga, T. de A. Espinoza, J. M. de A. Espinoza, D. C. L. Alves, M. da G. Albuquerque, and L. P. M. de Almeida. Estudo da dinâmica de oscilação do nível da Lagoa dos Patos nas margens do município do Rio Grande - RS. *BRASPOR*, V. 8., 2018, p. 256 - 258. 2018.