



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

APROVEITAMENTO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS
COMO ESTRATÉGIA PARA ADAPTAÇÃO DE CIDADES
COSTEIRAS AOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS
SOBRE O RISCO DE INUNDAÇÕES FLUVIAIS

FRANZ RANGEL DA SILVA

SALVADOR

2019

**APROVEITAMENTO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS
COMO ESTRATÉGIA PARA ADAPTAÇÃO DE CIDADES
COSTEIRAS AOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS
SOBRE O RISCO DE INUNDAÇÕES FLUVIAIS**

Franz Rangel da Silva

Orientador: Prof. Dr. José Maria Landim Dominguez

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rangel da Silva, Franz

Aproveitamento de serviços ecossistêmicos como estratégia para adaptação de cidades costeiras aos efeitos das mudanças climáticas sobre o risco de inundações fluviais / Franz Rangel da Silva. -- Salvador, 2019.

38 f.

Orientador: José Maria Landim Dominguez.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geologia) -- Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, 2019.

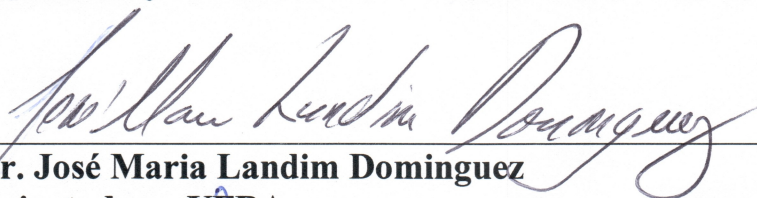
1. Inundação fluvial. 2. Adaptação baseada em ecossistemas. 3. Mudanças climáticas. 4. Zona costeira de baixa altitude. 5. Modelagem numérica. I. Dominguez, José Maria Landim. II. Título.

FRANZ RANGEL DA SILVA

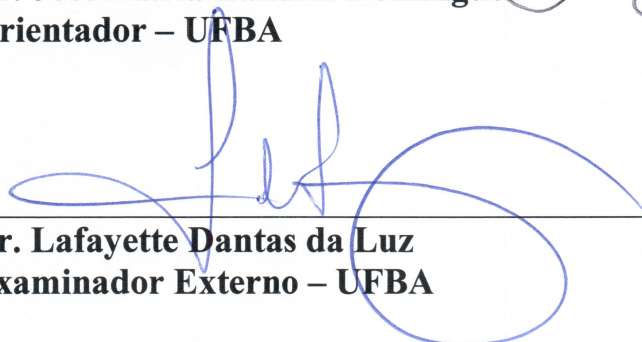
**“APROVEITAMENTO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS
COMO ESTRATÉGIA PARA ADAPTAÇÃO DE CIDADES
COSTEIRAS AOS EFEITOS DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS SOBRE O RISCO DE INUNDAÇÕES
FLUVIAIS”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia na área de concentração em Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar, em 07/05/2019.

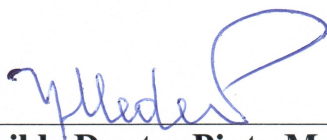
DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:



Dr. José Maria Landim Dominguez
Orientador – UFBA



Dr. Lafayette Dantas da Luz
Examinador Externo – UFBA



Dra. Yvonilde Dantas Pinto Medeiros
Examinadora Externa – UFBA

Salvador – BA
2019

Aos meus pais, com muito carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Elvira Flávia pelo apoio incondicional sem o qual esse trabalho não seria possível, a Maria Cândida e Helena pelos sorrisos que amenizaram os dias mais difíceis, a José Maria Landim Dominguez por aceitar a tarefa de orientar a pesquisa, a Ulysses Fontes Lima pelo incentivo, a Hydros Engenharia e Planejamento pelo apoio e infraestrutura fornecidos e a Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia pela disponibilização de dados e informações técnicas.

RESUMO

As planícies costeiras são paisagens de relevo plano, normalmente recortadas por canais fluviais com escoamento influenciado pelo regime de marés. Há expectativa de que, nesses ambientes, os efeitos das mudanças climáticas sobre os extremos de precipitação e o nível do mar, associados ao adensamento e expansão das ocupações urbanas ao longo da zona costeira de baixa altitude (ZCBA), causem o aumento da frequência de desastres naturais de origem hidrológica, bem como, dos prejuízos decorrentes de inundações fluviais, exigindo a adaptação das cidades costeiras. Esta pesquisa trata da relevância dos serviços ecossistêmicos como meio de controle do risco de inundações fluviais agravado pelos efeitos das mudanças climáticas em cidades litorâneas, adotando uma abordagem multivariada que retrata a contribuição dos processos hidrológicos e costeiros envolvidos. Ao comparar os riscos de inundações fluviais estimados para diferentes cenários projetados conforme as tendências climáticas e padrões de cobertura do solo da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e conjugadas (BHJC), situada na cidade do Salvador, capital do Estado da Bahia, Brasil, foi possível: (i) deduzir a repercussão das mudanças climáticas sobre o comportamento hidrológico e hidráulico de cheias naturais em áreas litorâneas; e (ii) avaliar o impacto da perda de ecossistemas sobre o risco de inundações fluviais em uma planície costeira urbanizada. Ao longo do século 21, as mudanças climáticas poderão aumentar o risco de inundações fluviais na ZCBA da BHJC em cerca de 21% – crescimento de aproximadamente R\$ 910.000 no dano anual esperado, entre os anos de 2010 e 2100 –, sendo a intensificação dos extremos de precipitação, a principal responsável por esse crescimento. No final do século 21, a perda de ecossistemas naturais poderá implicar incrementos no risco de inundações fluviais que correspondem a 31% (supressão de florestas) ou 120% (supressão de terras úmidas) do aumento decorrente das mudanças climáticas. A perda de parte dos benefícios proporcionados pelas florestas é compensada pelas terras úmidas e bacias hidráulicas posicionadas à jusante, o que reduz o impacto da supressão das matas sobre o risco de inundações na ZCBA. Destaca-se também que o aumento dos prejuízos causado pela supressão de florestas ou de terras úmidas será mais expressivo nas inundações de maior frequência. O aproveitamento de serviços ecossistêmicos é uma estratégia que assume relevada importância para a gestão da drenagem e manejo das águas pluviais em cidades costeiras, no entanto, a efetividade dos ecossistemas no controle das cheias naturais varia de acordo com as características das chuvas, sendo possível observar comportamentos distintos – maior ou menor impacto na produção ou propagação do escoamento superficial – durante eventos de mesma frequência, mas que apresentam durações ou distribuições temporais díspares. Para compensar o efeito das características das chuvas sobre o funcionamento da infraestrutura verde, a concepção da infraestrutura de cidades litorâneas deve prever a associação de serviços ecossistêmicos com soluções convencionais de engenharia voltadas, principalmente, para a proteção de assentamentos urbanos posicionados nas planícies costeiras, e o posicionamento adequado dos ecossistemas dentro da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Inundação fluvial; Adaptação baseada em ecossistemas; Mudanças climáticas; Zona costeira de baixa altitude; Modelagem numérica.

ABSTRACT

The coastal plains are flat relief landscapes, usually intersected by fluvial channels with flow influenced by the tidal regime. It is expected that in these environments, the effects of climate change on precipitation extremes and sea level, associated with the increase and expansion of urban occupancies along the low-elevation coastal zone (LECZ), will increase the frequency of natural disasters of hydrological origin, as well as the damage caused by river floods, requiring the adaptation of coastal cities. This research deals with the relevance of ecosystem services as a means of controlling the risk of river floods aggravated by the effects of climate change in coastal cities, adopting a multivariate approach that portrays the contribution of the hydrological and coastal processes involved. By comparing the estimated fluvial flood risks for different scenarios projected according to the climatic trends and soil cover patterns of the Jaguaribe river basin and conjugated (JRBC), located in the city of Salvador, capital of the State of Bahia, Brazil, it was possible : (i) to deduce the impact of climate change on the hydrological and hydraulic behavior of natural floods in coastal areas; and (ii) to assess the impact of ecosystem loss on the risk of river flooding on an urbanized coastal plain. Throughout the 21st century, climate change could increase the risk of fluvial flooding in LECZ of the JRBC by about 21% - growth of approximately R\$ 910,000 in expected annual damage between 2010 and 2100 - with intensification of precipitation extremes, the main factor responsible for this growth. By the end of the 21st century, the loss of natural ecosystems could mean increases in the risk of flooding corresponding to 31% (forest suppression) or 120% (suppression of wetlands) of the increase resulting from climate change. The loss of some of the benefits provided by forests is offset by wetlands and downstream water basins, which reduces the impact of forest suppression on the risk of flooding in the LECZ. It is also stressed that the increase in damage caused by the suppression of forests or wetlands will be more significant in the more frequent floods. The use of ecosystem services is a strategy that assumes importance for the management of storm water drainage and management in coastal cities, however, the effectiveness of ecosystems in the control of natural floods varies according to the characteristics of the rains, and it is possible to observe different behaviors - greater or lesser impact on the production or propagation of surface run - during events of the same frequency, but with different durations or time distributions. In order to compensate for the effect of rainfall characteristics on the operation of green infrastructure, the design of the coastal city infrastructure should provide for the association of ecosystem services with conventional engineering solutions mainly aimed at protecting urban settlements located in the coastal plains, and the proper positioning of ecosystems within the river basin.

Keywords: River flooding; Ecosystem-based adaptation; Climate change; Low-elevation coastal zone; Numerical modeling.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL.....	09
CAPÍTULO 2 - APROVEITAMENTO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS COMO ESTRATÉGIA PARA ADAPTAÇÃO DE CIDADES COSTEIRAS AOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O RISCO DE INUNDAÇÕES FLUVIAIS.....	12
CAPÍTULO 3 - CONCLUSÕES.....	28
ANEXO A - REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS.....	29
ANEXO B - COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO.....	38

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

As planícies costeiras são paisagens de relevo plano, normalmente recortadas por canais fluviais com escoamento influenciado pelo regime de marés. Nesses ambientes, as preamares favorecem o efeito de remanso (CHOW, 1959), o qual, mesmo durante cheias de maior frequência, cria condições hidráulicas favoráveis ao extravasamento das calhas fluviais. Quando os terrenos à montante são ocupados por assentamentos urbanos, a redução das taxas de infiltração pluvial e o aumento da velocidade de propagação do escoamento superficial direto – consequências da impermeabilização das superfícies e da construção de obras para fins de esgotamento pluvial –, contribuem para a intensificação das cheias, o que somado às particularidades naturais supracitadas, favorece a ocorrência de inundações. Nesse contexto, a elevação do nível do mar, fenômeno decorrente, principalmente, da expansão térmica das águas oceânicas, do derretimento de massas de gelo continentais e da transferência de água doce entre os oceanos e os reservatórios nos continentes (CAZENAVE; COZANNET, 2014), associada à intensificação dos extremos de precipitação pluvial promovida por processos atmosféricos termodinâmicos e dinâmicos (PFAHL; O’GORMAN; FISCHER, 2017), podem intensificar o efeito de remanso e a produção de escoamento superficial direto, repercutindo na frequência e magnitude das inundações fluviais em áreas costeiras (IKEUCHI et al., 2015).

Ao longo do século 20, o nível médio global do mar apresentou crescimento de $1,7 \pm 0,2$ mm/ano (CHURCH; WHITE, 2011). Nas últimas décadas, a taxa de subida aumentou sensivelmente de $2,2 \pm 0,3$ mm/ano, em 1993, para $3,3 \pm 0,3$ mm/ano, em 2014 (CHEN et al., 2017). A elevação do nível do mar observada ao longo do último século e anos recentes, é decorrente do aquecimento do sistema climático e deverá perdurar ainda por vários séculos, mesmo após a eventual estabilização da temperatura global (MEEHL et al., 2012), contribuindo para o aumento dos eventos de inundação em áreas costeiras.

O aquecimento do sistema climático também se reflete nos extremos de precipitação, fenômenos que interferem diretamente no regime de cheias naturais. Estudos baseados em séries históricas e simulações numéricas, apresentam evidências da intensificação de extremos de precipitação como resposta ao aquecimento global. Fischer e Knutti (2015) mostraram, a partir dos resultados de simulações numéricas, que, sob o aquecimento atual de $0,85^\circ\text{C}$, cerca de 18% da probabilidade de excedência dos extremos de precipitação diária moderados pode ser atribuída ao aquecimento da temperatura observado desde o período pré-industrial, o qual, por

sua vez, resulta, principalmente, das atividades humanas. Caso o aumento da temperatura alcance 2°C , os referidos autores sugerem que a influência humana sobre a frequência dos extremos de precipitação pode aumentar até aproximadamente 40%. Westra, Alexander e Zwiers (2013) analisaram séries históricas de precipitações máximas anuais registradas em 8.326 estações de monitoramento terrestre e constataram tendências de crescimento significativas em 2/3 dessas estações, com extremos variando conforme a temperatura média global a uma taxa entre $5,9\%/K^{-1}$ e $7,7\%/K^{-1}$.

A intensificação das inundações induzida pelos efeitos das mudanças climáticas (elevação do nível do mar e/ou aumento na frequência de extremos de precipitação), associada à grande e crescente concentração de habitantes e de ativos econômicos nas zonas costeiras de baixa altitude (elevação < 10 m) (GÜNERALP; GÜNERALP; LIU, 2015; HALLEGATTE et al., 2013; NEUMANN et al., 2015), implicará o aumento da probabilidade de desastres naturais de origem hidrológica, bem como, dos prejuízos decorrentes de inundações de maior frequência, cujos valores acumulados podem ultrapassar as perdas e danos econômicos e financeiros causados por eventos extremos (MOFTAKHARI et al., 2017), exigindo a adaptação dos assentamentos urbanos costeiras às mudanças causadas pelo aquecimento do clima, de modo a assegurar a sustentabilidade das atividades humanas nas áreas costeiras (HALLEGATTE et al., 2013).

O processo de adaptação às mudanças climáticas compreende ações sobre os sistemas naturais ou humanos em resposta às condições do clima, atuais ou esperadas, ou seus efeitos, a fim de reduzir danos ou potencializar benefícios (IPCC, 2014). O aproveitamento de serviços ecossistêmicos é uma estratégia de adaptação que integra a gestão de recursos naturais e a infraestrutura de serviços públicos, mediante ações de conservação, manejo e restauração de ecossistemas naturais com atuação sobre o clima ou seus efeitos (IACOB et al., 2014; MUNANG et al., 2013). As soluções de drenagem e manejo pluvial baseadas nas funções hidrológico-hidráulicas de ecossistemas naturais atendem ao conceito de Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável, que surgiu como resposta aos efeitos adversos da urbanização sobre a quantidade e qualidade das águas urbanas (ZHOU, 2014). Além dos impactos na produção e propagação do escoamento superficial direto (IACOB et al., 2014), principais funções segundo a perspectiva de controle de inundações, a infraestrutura verde pode proporcionar benefícios transversais de suprimento, regulação, cultura e suporte (BARTH; DÖLL, 2016; COLLOFF

et al., 2016; MITSCH; BERNAL; HERNANDEZ, 2015), que também contribuem para o aumento da resiliência dos ambientes urbanos face aos diferentes impactos impostos pelas mudanças climáticas. A estratégia de adaptação baseada em ecossistemas integra o processo de adaptação às mudanças climáticas ao manejo de áreas naturais, apresentando maior atratividade para a gestão urbana, quando comparada à infraestrutura cinza, face ao seu caráter multifuncional, que produz benefícios ao longo de todo o ano, diferente das soluções convencionais de drenagem e manejo pluvial que resumem as suas funcionalidades aos períodos de chuva (CHARLESWORTH, 2010).

Esta dissertação trata da relevância dos serviços ecossistêmicos como meio de controle do risco de inundações fluviais agravado pelos efeitos das mudanças climáticas em cidades litorâneas, adotando uma abordagem multivariada que retrata a contribuição dos processos hidrológicos e costeiros envolvidos. Ao comparar os riscos de inundações fluviais estimados para diferentes cenários, foi possível: (i) deduzir a repercussão das mudanças climáticas sobre o comportamento hidrológico e hidráulico de cheias naturais em áreas litorâneas; e (ii) avaliar o impacto da perda de ecossistemas naturais sobre o risco de inundações fluviais em uma planície costeira urbanizada. A partir desses resultados foi quantificada a parcela do valor correspondente aos serviços que poderão ser prestados por ecossistemas naturais no controle de inundações fluviais em áreas costeiras no final do século 21, e identificados aspectos relevantes para o planejamento de estratégias de adaptação baseadas em ecossistemas.

A pesquisa foi fundamentada nos resultados de modelagens numéricas de cheias naturais produzidas em diferentes cenários projetados conforme as tendências climáticas e padrões de cobertura do solo observados na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e conjugadas (BHJC), situada na cidade do Salvador, capital do Estado da Bahia, Brasil. A BHJC encerra diferentes ecossistemas (remanescentes da Mata Atlântica e terras úmidas) que prestam serviços fundamentais para a redução da frequência e magnitude das inundações no seu baixo curso, quais sejam: redução do volume escoado superficialmente, amortecimento de cheias e retardamento de ondas de cheia (BAHIA, 2013). No entanto, a pressão imobiliária e a ampliação da infraestrutura cinza podem comprometer a preservação desses ambientes e a sustentabilidade urbana na planície costeira, especialmente, no cenário futuro, quando a intensificação dos extremos de precipitação e a subida do nível do mar poderão agravar as inundações na zona costeira de baixa altitude.

A pesquisa realizada avaliou parte dos prejuízos urbanos decorrentes da eventual perda de ecossistemas naturais existentes na BHJC, mediante a quantificação do aumento dos danos potenciais que será causado pela supressão da Mata Atlântica ou das terras úmidas no cenário futuro. Os resultados obtidos

são fundamentais para: (i) medir a funcionalidade da infraestrutura verde no contexto urbano do município de Salvador; e (ii) criar referências para a elaboração de diretrizes para o desenvolvimento urbano sustentável e a concepção de projetos para o controle de inundações pautados no aumento da resiliência urbana aos efeitos das mudanças do clima.

O artigo resultante da pesquisa foi organizado de modo a atender as exigências para publicação na RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, revista oficial da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). A RBRH tem como objetivos: (i) a publicação de pesquisas originais e inéditas, com inquestionáveis contribuições científicas e técnicas nos diversos campos de recursos hídricos; e (ii) proporcionar um fórum de troca de conhecimento entre a comunidade interdisciplinar atuante na área de recursos hídricos. No quadriênio 2013-2016, o Qualis Periódicos classificou a RBRH ISSN 2318-0331 como de nível B2 para a área das Geociências.

Referências

- BAHIA. Secretaria de Desenvolvimento Urbano. Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia. Revisão e readequação do anteprojeto dos canais Jaguaribe e Mangabeira, Anteprojeto de Engenharia. Salvador: [s.n.], 2013.
- BARTH, N. C.; DÖLL, P. Assessing the ecosystem service flood protection of a riparian forest by applying a cascade approach. *Ecosystem Services*, v. 21, p. 39-52, out. 2016.
- CAZENAVE, A.; COZANNET, G. LE. Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, v. 2, n. 2, p. 15-34, fev. 2014.
- CHARLESWORTH, S. M. A review of the adaptation and mitigation of global climate change using sustainable drainage in cities. *Journal of Water and Climate Change*, v. 1, n. 3, p. 165-180, set. 2010.
- CHEN, X.; ZHANG, X.; CHURCH, J. A.; WATSON, C. S.; KING, M. A.; MONSELESAN, D.; LEGRESY, B.; HARIG, C. The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993-2014. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 7, p. 492-495, jul. 2017.
- CHOW, V.T. *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- CHURCH, J. A.; WHITE, N. J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, v. 32, n. 4-5, p. 585-602, set. 2011.
- COLLOFF, M. J.; LAVOREL, S.; WISE, R. M.; DUNLOP, M.; OVERTON, I. C.; WILLIAMS, K. J. Adaptation services of floodplains and wetlands under transformational climate change. *Ecological*

Applications, v. 26, n. 4, p. 1003-1017, jun. 2016.

FISCHER, E. M.; KNUTTI, R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, v. 5, n. 6, p. 560-564, jun. 2015.

GÜNERALP, B.; GÜNERALP, I.; LIU, Y. Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards. *Global Environmental Change*, v. 31, p. 217–225, mar. 2015.

HALLEGATTE, S.; GREEN, C.; NICHOLLS, R. J.; CORFEE-MORLOT, J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 9, p. 802-806, set. 2013.

IACOB, O.; ROWAN, J. S.; BROWN, I.; ELLIS, C. Evaluating wider benefits of natural flood management strategies: an ecosystem-based adaptation perspective. *Hydrology Research*, v. 45, n. 6, p. 774-787, dez. 2014.

IKEUCHI, H.; HIRABAYASHI, Y.; YAMAZAKI, D.; KIGUCHI, M.; KOIRALA, S.; NAGANO, T.; KOTERA, A.; KANAE, S. Modeling complex flow dynamics of fluvial floods exacerbated by sea level rise in the Ganges–Brahmaputra–Meghna Delta. *Environmental Research Letters*, v. 10, n. 12, p. 124011, dez. 2015.

IPCC. *Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report: Volume 1: Global and Sectoral Aspects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

MEEHL, G. A.; HU, A.; TEBALDI, C.; ARBLASTER, J. M.; WASHINGTON, W. M.; TENG, H.; SANDERSON, B. M.; AULT, T.; STRAND, W. G.; WHITE III, J. B. Relative outcomes of climate change mitigation related to global temperature versus sea-level rise. *Nature Climate Change*, v. 2, n. 8, p. 576-580, ago. 2012.

MITTSCH, W. J.; BERNAL, B.; HERNANDEZ, M. E. Ecosystem services of wetlands. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, v. 11, n. 1, p. 1-4, fev. 2015.

MOFTAKHARI, H. R.; AGHAKOUCHAK, A.; SANDERS, B. F.; MATTHEW, R. A. Cumulative hazard: The case of nuisance flooding. *Earth's Future*, v. 5, n. 2, p. 214-223, fev. 2017.

MUNANG, R.; THIAW, I.; ALVERSON, K.; MUMBA, M.; LIU, J.; RIVINGTON, M. *Climate change and Ecosystem-based Adaptation: A new*

pragmatic approach to buffering climate change impacts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 5, n. 1, p. 67-71, mar. 2013.

NEUMANN, B.; VAFEIDIS, A. T.; ZIMMERMANN, J.; NICHOLLS, R. J. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLOS ONE*, v. 10, n. 3, p. n/a-n/a, mar. 2015.

PFAHL, S.; O'GORMAN, P. A.; FISCHER, E. M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 6, p. 423-427, jun. 2017.

WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V.; ZWIERS, F. W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, v. 26, n. 11, p. 3904-3918, jun. 2013.

ZHOU, Q. A. Review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water*, v. 6, n. 4, p. 976-992, abr. 2014.

CAPÍTULO 2

APROVEITAMENTO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS COMO ESTRATÉGIA PARA ADAPTAÇÃO DE CIDADES COSTEIRAS AOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O RISCO DE INUNDAÇÕES FLUVIAIS

RESUMO

Este artigo trata da relevância dos serviços ecossistêmicos como meio de controle do risco de inundações fluviais agravado pelos efeitos das mudanças climáticas em cidades litorâneas, adotando uma abordagem multivariada que retrata a contribuição dos processos hidrológicos e costeiros envolvidos. Ao comparar os riscos de inundações fluviais na zona costeira de baixa altitude, estimados para diferentes cenários de uma bacia urbana da cidade do Salvador, Brasil, foi observado que: (i) ao longo do século 21, as mudanças climáticas poderão aumentar o risco de inundações fluviais em cerca de 21%, sendo a intensificação dos extremos de precipitação, a principal responsável por esse crescimento; e (ii) no final do século 21, a perda de ecossistemas naturais poderá implicar incrementos no risco de inundações fluviais que correspondem a 31% (supressão de florestas) ou 120% (supressão de terras úmidas) do aumento decorrente das mudanças climáticas. Apesar da importância das florestas e terras úmidas na redução de danos causados por inundações fluviais, a efetividade dos serviços ecossistêmicos relacionados ao controle das cheias naturais em planícies costeiras, exige a associação da infraestrutura verde com soluções convencionais de engenharia e o posicionamento adequado dos ecossistemas dentro da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Inundação fluvial; Adaptação baseada em ecossistemas; Mudanças climáticas; Zona costeira de baixa altitude; Modelagem numérica.

ABSTRACT

This article deals with the relevance of ecosystem services as a means of controlling the river flood risk aggravated by the effects of climate change in coastal cities, adopting a multivariate approach that portrays the contribution of the hydrological and coastal processes involved. When comparing the river flood risk in the low-elevation coastal zone, estimated for different scenarios of an urban basin in the city of Salvador, Brazil, it was observed that: (i) throughout the 21st century, climate change may increase the risk by about 21%, with precipitation extremes intensifying, the main reason for this growth; and (ii) by the end of the 21st century, the loss of natural ecosystems may imply increases in the risk corresponding to 31% (forest suppression) or 120% (removal of wetlands) from the increase due to climate change. Despite the importance of forests and wetlands in reducing flood damage, the effectiveness of ecosystem services related to natural flood control in coastal plains requires the association of green infrastructure with conventional engineering solutions and the proper positioning of ecosystems within of the river basin.

Keywords: River flooding; Ecosystem-based adaptation; Climate change; Low-elevation coastal zone; Numerical modeling.

INTRODUÇÃO

As planícies costeiras são paisagens de relevo plano, normalmente recortadas por canais fluviais com escoamento influenciado pelo regime de marés. Nesses ambientes, as preamares favorecem o efeito de remanso (CHOW, 1959), o qual, mesmo durante cheias de maior frequência, cria condições hidráulicas favoráveis ao extravasamento das calhas fluviais. Quando os terrenos à montante são ocupados por assentamentos urbanos, a redução das taxas de infiltração pluvial e o aumento da velocidade de propagação do escoamento superficial direto – consequências da impermeabilização das superfícies e da construção de obras para fins de esgotamento pluvial –, contribuem para a intensificação das cheias, o que somado às particularidades naturais supracitadas, favorece a ocorrência de inundações. Nesse contexto, a elevação do nível do mar, fenômeno decorrente, principalmente, da expansão térmica das águas oceânicas, do derretimento de massas de gelo continentais e da transferência de água doce entre os oceanos e os reservatórios nos continentes (CAZENAVE; COZANNET, 2014), associada à intensificação dos extremos de precipitação pluvial promovida por processos atmosféricos termodinâmicos e dinâmicos (PFAHL; O’GORMAN; FISCHER, 2017), podem intensificar o efeito de remanso e a produção de escoamento superficial direto, repercutindo na frequência e magnitude das inundações fluviais em áreas costeiras (IKEUCHI et al., 2015).

Ao longo do século 20, o nível médio global do mar apresentou crescimento de $1,7 \pm 0,2$ mm/ano (CHURCH; WHITE, 2011). Nas últimas décadas, a taxa de subida aumentou sensivelmente de $2,2 \pm 0,3$ mm/ano, em 1993, para $3,3 \pm 0,3$ mm/ano, em 2014 (CHEN et al., 2017). A elevação do nível do mar observada ao longo do último século e anos recentes, é decorrente do aquecimento do sistema climático e deverá perdurar ainda por vários séculos, mesmo após a eventual estabilização da temperatura global (MEEHL et al., 2012), contribuindo para o aumento dos eventos de inundação em áreas costeiras.

O aquecimento do sistema climático também se reflete nos extremos de precipitação, fenômenos que interferem diretamente no regime de cheias naturais. Estudos baseados em séries históricas e simulações numéricas, apresentam evidências da intensificação de extremos de precipitação como resposta ao aquecimento global. Fischer e Knutti (2015) mostraram, a partir dos resultados de simulações numéricas, que, sob o aquecimento atual de $0,85^\circ\text{C}$, cerca de 18% da probabilidade de excedência dos extremos de precipitação diária moderados pode ser atribuída ao aquecimento da temperatura observado desde o período pré-industrial, o qual, por sua vez, resulta, principalmente, das atividades humanas. Caso o aumento da temperatura alcance 2°C , os referidos autores sugerem que a influência humana sobre a frequência dos extremos de precipitação pode aumentar até aproximadamente 40%. Westra, Alexander e Zwiers (2013) analisaram séries históricas de precipitações máximas anuais registradas em 8.326 estações de monitoramento terrestre e constataram tendências de crescimento significativas em 2/3 dessas estações, com extremos variando conforme a temperatura média global a uma taxa entre $5,9\%K^{-1}$ e $7,7\%K^{-1}$.

A intensificação das inundações induzida pelos efeitos das mudanças climáticas (elevação do nível do mar e/ou aumento na frequência de extremos de precipitação), associada à grande e crescente concentração de habitantes e de ativos econômicos nas zonas costeiras de baixa altitude (elevação < 10 m) (GÜNERALP; GÜNERALP; LIU, 2015; HALLEGATTE et al., 2013; NEUMANN et al., 2015), implicará o aumento da probabilidade de desastres naturais de origem hidrológica, bem como, dos prejuízos decorrentes de inundações de maior frequência, cujos valores acumulados podem ultrapassar as perdas e danos econômicos e financeiros causados por eventos extremos (MOFTAKHARI et al., 2017), exigindo a adaptação dos assentamentos urbanos costeiras às mudanças causadas pelo aquecimento do clima, de modo a assegurar a sustentabilidade das atividades humanas nas áreas costeiras (HALLEGATTE et al., 2013).

O processo de adaptação às mudanças climáticas compreende ações sobre os sistemas naturais ou humanos em resposta às condições do clima, atuais ou esperadas, ou seus efeitos, a fim de reduzir danos ou potencializar benefícios (IPCC, 2014). O aproveitamento de serviços ecossistêmicos é uma estratégia de adaptação que integra a gestão de recursos naturais e a infraestrutura de serviços públicos, mediante ações de conservação, manejo e restauração de ecossistemas naturais com atuação sobre o clima ou seus efeitos (IACOB et al., 2014; MUNANG et al., 2013). As soluções de drenagem e manejo pluvial baseadas nas funções hidrológico-hidráulicas de ecossistemas naturais atendem ao conceito de Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável, que surgiu como resposta aos efeitos adversos da urbanização sobre a quantidade e qualidade das águas urbanas (ZHOU, 2014). Além dos impactos na produção e propagação do escoamento superficial direto (IACOB et al., 2014), principais funções segundo a perspectiva de controle de inundações, a infraestrutura verde pode proporcionar benefícios transversais de suprimento, regulação, cultura e suporte (BARTH; DÖLL, 2016; COLLOFF et al., 2016; MITSCH; BERNAL; HERNANDEZ, 2015), que também contribuem para o aumento da resiliência dos ambientes urbanos face aos diferentes impactos impostos pelas mudanças climáticas. A estratégia de adaptação baseada em ecossistemas integra o processo de adaptação às mudanças climáticas ao manejo de ambientes naturais, apresentando maior atratividade para a gestão urbana, quando comparada à infraestrutura cinza, face ao seu caráter multifuncional, que produz benefícios ao longo de todo o ano, diferente das soluções convencionais de drenagem e manejo pluvial que resumem as suas funcionalidades aos períodos de chuva (CHARLESWORTH, 2010).

A avaliação do efeito das mudanças climáticas, assim como das estratégias de adaptação baseadas em ecossistemas, sobre as inundações fluviais em áreas litorâneas é um problema que se enquadra no espectro de aplicações da análise de riscos em recursos hídricos. A análise de risco é uma ferramenta amplamente utilizada na avaliação de estratégias e intervenções hídricas e tem como objetivo entender os aspectos essenciais para a caracterização do risco hidrológico (DE MOEL et al., 2015), quais sejam: perigos e consequências.

O conceito de perigo engloba todo evento que induz uma situação potencial de dano ou perda. No contexto do risco de inundações, a avaliação desse aspecto

do risco envolve a elaboração de prognósticos hidrológico-hidráulicos que relacionam as variáveis características de enchentes (velocidade do escoamento, profundidade da submersão, área inundável etc.) e a probabilidade de ocorrência desses eventos em determinado período de tempo. As inundações em áreas costeiras são fenômenos complexos fortemente influenciados pelas características ambientais da bacia hidrográfica (relevo, drenagem, solo, cobertura etc.) e das variações do nível do mar (SVENSSON; JONES, 2004). Esses fatores intervenientes apresentam, na maioria dos casos, caráter não-estacionário, cujo prognóstico é cercado de incertezas relacionadas às diferentes possibilidades de atuação antrópica sobre o meio, à variabilidade sazonal e interanual dos condicionantes naturais e aos efeitos do aquecimento do sistema climático (KUNDZEWICZ et al., 2014). No estudo do perigo de inundações em áreas urbanas, as incertezas inerentes aos fenômenos envolvidos são incorporadas ao processo de análise mediante a modelagem numérica de cheias em diferentes cenários prospectivos. Esses cenários projetam os parâmetros que caracterizam o estado da bacia hidrográfica e as variáveis naturais de interesse (extremos climáticos, nível do mar etc.), de acordo com hipóteses específicas para a evolução urbana e a dinâmica ambiental. A modelagem numérica é uma técnica aplicada na simulação de extremos climáticos, para fins de representação do comportamento hidrológico-hidráulico de determinada bacia hidrográfica e previsão das respostas hidrológicas sob diferentes cenários prospectivos (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015). Por isso, o processo de modelagem assume relevada importância na elaboração de estudos destinados a avaliar os efeitos de mudanças nos condicionantes climáticos, oceânicos e interiores sobre fenômenos relacionados ao ciclo das águas.

O estudo das consequências potenciais de determinada inundação trata da vulnerabilidade e da exposição dos elementos sob ameaça. A vulnerabilidade indica a propensão de um elemento a ser afetado, enquanto que a exposição define a quantidade e o tipo de elementos (habitantes, edificações, infraestrutura urbana, sítios arqueológicos etc.) que podem ser atingidos por determinado evento.

A análise integrada dos aspectos característicos do risco pode ser realizada segundo diferentes abordagens, conforme a tipologia dos elementos expostos. Dentre as possíveis abordagens do risco, ressalta-se, para fins de planejamento e gestão de medidas para controle de inundações em áreas urbanas, a quantificação dos prejuízos econômicos decorrentes de enchentes expressa pelo dano anual esperado (ARNELL, 1989). O processo de avaliação do dano anual esperado causado por enchentes é baseado na inter-relação de funções de caráter hidrológico (função vazão-probabilidade), hidráulico (função profundidade-vazão) e econômico (função profundidade-danos). Do acoplamento dessas funções é deduzida a curva dano-probabilidade, a qual relaciona a probabilidade de ocorrência de enchentes e os prejuízos econômicos correspondentes e, mediante processo de integração matemática, possibilita avaliar o dano anual esperado correspondente a determinado cenário objeto de análise (USACE, 1996).

A ocorrência e a magnitude de inundações fluviais em planícies costeiras podem resultar de um evento natural extremo ou, mais frequentemente, da combinação de

eventos distintos não necessariamente extremos (LEONARD et al., 2014). Essa complexidade não é tratada na abordagem univariada dos riscos naturais, a qual pode conduzir a resultados que desconsideram a sinergia ou o efeito compensatório decorrente da simultaneidade de eventos distintos. Portanto, a avaliação do risco de inundações fluviais em planícies costeiras é um problema que exige tratamento multivariado baseado, por exemplo, na Análise de Frequência de Eventos Coincidentes (USACE, 1993), procedimento que possibilita inferir o risco a partir do regime de inundações resultantes da combinação de determinados eventos de preamar e de cheia.

O estudo apresentado neste artigo trata da relevância dos serviços ecossistêmicos como meio de controle do risco de inundações fluviais agravado pelos efeitos das mudanças climáticas em cidades litorâneas, adotando uma abordagem multivariada que retrata a contribuição dos processos hidrológicos e costeiros envolvidos. Ao comparar os riscos de inundações fluviais estimados para diferentes cenários, foi possível: (i) deduzir a repercussão das mudanças climáticas e o efeito de ecossistemas sobre o comportamento hidrológico e hidráulico de cheias naturais em área litorânea; e (ii) avaliar o impacto do aquecimento climático e da perda de ecossistemas naturais sobre o risco de inundações fluviais em uma planície costeira urbanizada.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e conjugadas (BHJC), localizadas do município de Salvador, capital do estado da Bahia, Brasil (Figura 1). A BHJC compreende uma superfície de 56 km², o que corresponde a, aproximadamente, 20% do território soteropolitano. Trata-se de uma região hidrográfica caracterizada, principalmente, pela complexidade e variabilidade espacial dos fatores ambientais que atuam na gênese das cheias.

A bacia hidrográfica em análise se encontra inserida no domínio de clima tropical litorâneo, onde as variáveis climáticas são fortemente influenciadas pelas massas de ar úmido provenientes do Oceano Atlântico e pela Zona de Convergência Intertropical. O clima local é caracterizado pelas temperaturas elevadas durante o ano todo, com pequena queda nos meses de inverno, e pela concentração de chuvas entre o final do verão e o inverno (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Na costa atlântica de Salvador, região onde está localizada a foz do rio Jaguaribe, o regime de marés é semi-diurno e do tipo meso-marés. Nessa região a amplitude máxima da maré alcança 2,7 m (marés equinociais) e a maré astronômica explica, aproximadamente, 97,5% da variância da altura das marés, especialmente durante o inverno (CIRANO; LESSA, 2007).

A paisagem local foi esculpida sobre três principais domínios geológicos (SALVADOR, 2004): (i) Depósitos Sedimentares Inconsolidados Quaternários; (ii) Depósitos de Cobertura Sedimentar Continental Terciária; e (iii) Embasamento Cristalino.

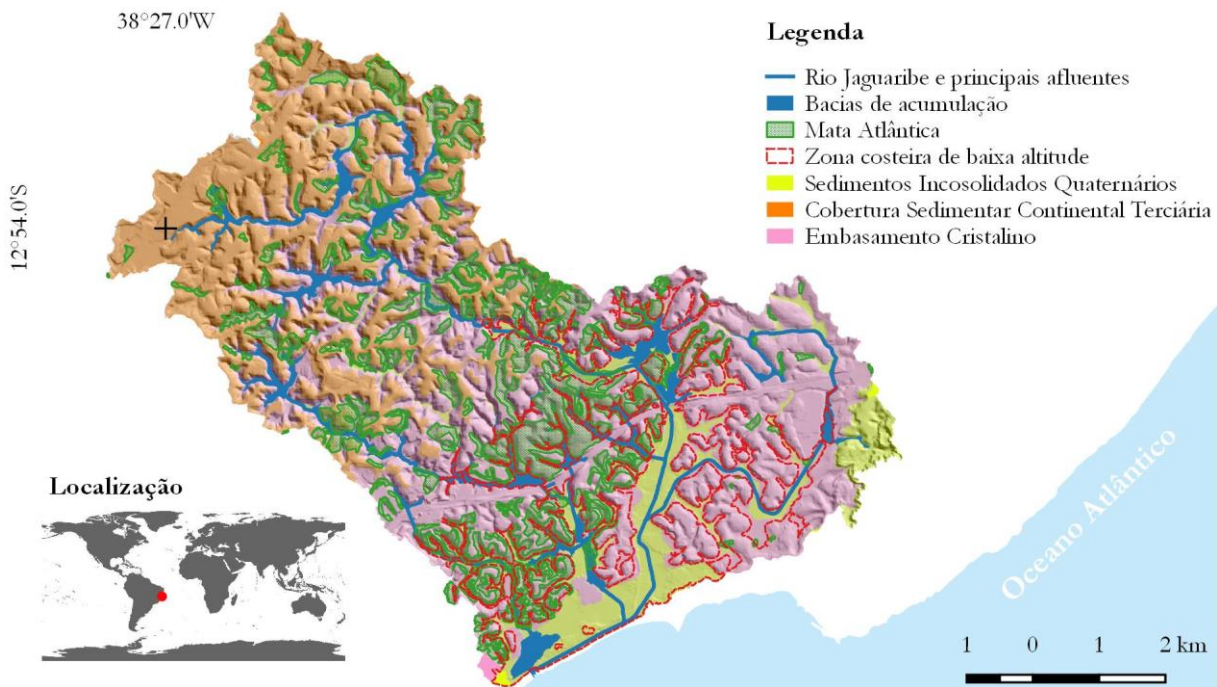


Figura 1. Bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e Conjugadas (BHJC), Salvador, Bahia, Brasil.

Os Depósitos Sedimentares Inconsolidados Quaternários compreendem áreas de acumulação fluvial, marinha e eólica, as quais formam planícies, terraços, praias e dunas fixadas ou não por vegetação (SALVADOR, 2004). São ambientes, em sua maior parte, susceptíveis a inundações fluviais ou submersões pelas marés, exceto as dunas e terraços, os quais, por conta da permeabilidade natural, da espessura e da posição topográfica dos depósitos, favorecem a infiltração das águas pluviais. As unidades geológicas que compõem esse domínio ficam situadas nos fundos de vale e ao longo da planície costeira, abrangendo 14% da BHJC, dos quais 4% correspondem às dunas e terraços.

Situados nos terrenos com altura superior a 60 metros, os Depósitos de Cobertura Sedimentar Continental Terciária perfazem 29% da área de estudo. Esses depósitos, denominados de Formação Barreiras, compreendem materiais inconsolidados, constituídos por arenitos conglomeráticos, esbranquiçados e amarelados, seguidos de arenitos de textura muito grossa à média, com intercalações de argila de espessuras reduzidas (SALVADOR, 2004). A posição topográfica (cabeceiras em topos planos ou abaulados) e as características texturais dos sedimentos que compõem esse domínio criam, em terrenos com cobertura natural, condições favoráveis à infiltração pluvial.

O Embasamento Cristalino compreende 57% da BHJC. Nesse domínio o substrato é composto por associações de granodioritos, tonalitos, granulitos-gnaisses, metabasaltos e antifibrolitos recobertos por um manto de intemperismo espesso (10 a 20m) de cor amarelada-amarronzada e de composição areno-argilosa, argilo-siltosa ou argilo-arenosa (SALVADOR, 2004). Nessas áreas, o escoamento superficial difuso e concentrado é mais atuante durante as chuvas de maior intensidade, o que associado a gradientes topográficos mais elevados, tornam esse domínio o principal responsável pela produção de escoamento superficial direto na área de estudo durante os períodos de cheia.

A área de estudo está inserida no Bioma Mata Atlântica, sendo sua formação original a Floresta Ombrófila Densa. Atualmente, esse bioma encontra-se reduzido e bastante fragmentado dentro da BHJC, sendo formado por vegetação secundária nos três estágios sucessionais – predominando vegetação no estágio médio de regeneração – que totaliza 9,46 km² de superfície ocupada, valor correspondente a 23% dos remanescentes da Mata Atlântica distribuídos na parte continental do município de Salvador (BAHIA, 2013). As florestas favorecem as perdas hídricas por evapotranspiração e infiltração, contribuindo para a redução do volume do escoamento superficial e o aumento das taxas de recarga hídrica subterrânea. As superfícies recobertas por árvores também oferecem maior resistência ao escoamento, o que reduz a velocidade dos fluxos superficiais e promove o aumento do tempo entre o centro de massa das chuvas e o pico das ondas de cheia correspondentes. Portanto, a Mata Atlântica caracteriza-se como ecossistema natural com funções que atenuam as ondas de cheia mediante (i) a redução dos excedentes hídricos superficiais e (ii) o retardamento da resposta hidrológica da bacia.

No interior da BHJC, a ocupação urbana se desenvolveu nos terrenos altos associados a topos de morros esculpidos sobre a Formação Barreiras ou o Embasamento Cristalino. A malha viária implantada de modo a conectar os terrenos altos, promoveu o seccionamento dos vales por terraplenos rodoviários drenados por obras-de-arte corrente (bueiros). Esse padrão de crescimento urbano favoreceu o desenvolvimento de terrenos alagadiços e a manutenção de lagoas e charcos naturais distribuídos ao longo dos vales. Essas áreas sujeitas a submersão temporária, quando não ocupadas por assentamentos urbanos, formam ecossistemas que atuam no amortecimento dos hidrogramas de cheia, ou seja, reduzem as vazões máximas instantâneas produzidas durante as tormentas que incidem sobre a bacia hidrográfica. Esses ambientes, naturais ou antropizados, funcionam como

reservatórios de detenção que acumulam temporariamente parte dos volumes hídricos afluentes produzidos durante as tormentas, podendo resultar, a depender da magnitude da cheia e do porte da bacia de acumulação, nos seguintes benefícios, dentre outros: (i) redução dos problemas de inundações em áreas situadas à jusante, mantendo as vazões efluentes dentro da faixa de valores admitidos pela calha fluvial; e (ii) redução dos custos de implantação de canais de macrodrenagem, por conta da redução das vazões transferidas para os condutos posicionados à jusante, o que diminui o porte das obras e a necessidade de remanejamento de populações ribeirinhas assentadas nos terrenos mais baixos.

A zona costeira de baixa altitude (ZCBA), conjunto de terrenos contínuos conectados com a linha de costa e posicionados em altitudes inferiores a 10 m, é a área mais sensível aos efeitos da elevação do nível do mar (GÜNERALP; GÜNERALP; LIU, 2015). Na área de estudo, a ZCBA compreende 15% de toda a superfície. Trata-se de área com baixo gradiente topográfico e escoamento fluvial condicionado ao regime de marés, marcada pela vocação natural para inundação das várzeas. Nela, as calhas fluviais recortam extensa planície, onde se concentram áreas residenciais consolidadas e em expansão, compreendendo populações dos diferentes estratos sociais, incluindo ocupações planejadas e espontâneas. Em 2010, a população residente nessa região era de 28.381 habitantes, que correspondia a cerca de 7% da população total da BHJC na época (IBGE, 2016b).

Nos assentamentos planejados, predominam condomínios residenciais com edificações de alto padrão construtivo. Construída nas décadas de 80 e 90, dentro do leito maior do rio Jaguaribe, a malha viária que atende essas áreas foi implantada em cotas próximas à da seção de margem plena dos canais atuais. O crescimento da ocupação urbana nos terrenos à montante, associado à redução da capacidade de escoamento da calha fluvial, implicou no aumento dos níveis d'água durante as cheias de maior frequência, potencializando o risco de inundação dos terrenos contíguos. Deve-se destacar que a eficiência hidráulica dos canais é comprometida por conta da redução da seção de escoamento, em decorrência do processo de assoreamento e/ou acúmulo de macrófitas, e do aumento da rugosidade proporcionado pelo crescimento da vegetação nas margens do rio.

As ocupações espontâneas caracterizam-se pela presença de invasões, parcelamentos clandestinos e edificações de médio a baixo padrão construtivo. São comuns nessas áreas, construções que avançam a calha do leito menor, obstruindo a seção hidráulica e/ou dificultando o acesso de máquinas para a execução de serviços relativos à limpeza e/desobstrução dos canais.

Ante o exposto, verifica-se que a BHJC compreende áreas de expansão e adensamento urbano, marcadas pela diversidade físico-ambiental e pela presença de ecossistemas naturais de grande relevância para a sustentabilidade urbana, especialmente, no que tange à mitigação dos efeitos adversos das cheias. Ressalta-se que, a intensificação do processo de urbanização nessa região representa ameaça aos ecossistemas naturais, cuja preservação pode ser fundamental para a adaptação urbana aos impactos das mudanças climáticas na cidade do Salvador.

Análises de frequência e tendência do regime de chuvas intensas

As análises de frequência e tendência do regime de chuvas intensas compreenderam a aplicação de métodos estatísticos e hidrológicos sobre amostras pluviométricas registradas na área de estudo. Essas avaliações resultaram em prognósticos na forma de hietogramas sintéticos com determinadas probabilidades de excedência, representativos dos regimes de chuvas intensas dos períodos 1981 – 2010 (Cenário Referencial) e 2071 – 2100 (Cenário Prospectivo).

As análises foram realizadas com base em série histórica de chuvas diárias máximas anuais do período 1911 - 2010. A amostra utilizada resultou do preenchimento de falhas e homogeneização, pelo método do Vetor Regional (HIEZ, 1977), de séries de chuvas diárias máximas mensais disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, mantido pela Agência Nacional de Águas (vide Tabela 1). A amostra de máximas anuais da série homogeneizada correspondente à Estação 1338007 foi selecionada como referência para as inferências estatísticas.

Tabela 1. Dados sobre as séries utilizadas nas análises de frequência e tendência do regime de chuvas intensas.

Estação	Nome	Registros	Intervalo
1238001	Cobre	253	1949 - 1971
1238008	Itapagipe	266	1925 - 1963
1238045	Areal	234	1944 - 1963
1238107	Pitangueiras	191	1942 - 1963
1338003	Salvador	616	1911 - 1985
1338005	Ondina (DNOCS)	222	1943 - 1964
1338007	Ondina (INMET)	1.176	1904 - 2017

Observação: Estações localizadas na área continental do município de Salvador.

As probabilidades de excedência das chuvas diárias máximas foram inferidas mediante a função de quantis da distribuição de Gumbel para máximos, com parâmetros de posição (β) e de escala (α) estimados pelo método dos Momentos. O modelo distributivo e as relações adotadas na estimativa dos seus parâmetros são expressos pelas seguintes equações (NAGHETTINI; PINTO, 2007):

$$x(P) = \beta - \alpha \ln[-\ln(1 - P)] \quad (1)$$

$$\beta = \bar{X} - 0,45s_x \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{s_x}{1,283} \quad (3)$$

Nas quais, P é a probabilidade de excedência do evento $x(P)$, enquanto que \bar{X} e s_x denotam, respectivamente, a média e o desvio padrão da amostra.

Na análise de frequências realizada para o Cenário Referencial, o modelo distributivo foi ajustado aos dados do

bloco da série de chuvas máximas anuais correspondente ao intervalo 1981 - 2010.

Para o Cenário Prospectivo (2071 - 2100), os parâmetros de posição e escala da função de quantis foram projetados com base no seguinte modelo de regressão harmônica:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + a_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + a_3 t \quad (4)$$

Sendo, a_0 , a_1 , a_2 , a_3 e T os parâmetros do modelo harmônico ajustados pelo método dos Mínimos Quadrados, ou seja, mediante a minimização do somatório dos quadrados das diferenças entre os dados observados e os valores estimados com base no modelo. A variável explicativa t corresponde ao tempo medido em anos

A análise de regressão foi realizada com base nas amostras de parâmetros resultantes da aplicação do método dos Momentos (Equações 2 e 3) em blocos da série de chuvas máximas anuais correspondentes a intervalos consecutivos com extensão de 30 anos. No modelo harmônico adotado, a variável explicativa corresponde ao ano final do intervalo de 3 décadas.

As funções de quantis representativas do Cenário Referencial e do Cenário Prospectivo foram empregadas na estimativa das chuvas com duração de 1 dia e probabilidades de excedência iguais a 1%, 2%, 4%, 10% e 50%. Esses eventos foram convertidos para chuvas com duração de 2 horas por meio da função de desagregação proposta por Silveira, (2000), ajustada às relações altura-duração-frequência representativas da cidade do Salvador (CETESB, 1986). As precipitações com duração de 2 horas foram desagregadas em blocos de 1 minuto, com alturas distribuídas no tempo, de acordo com modelo de Huff 1º Quartil (HUFF, 1967) – chuvas com a duração (2 horas) e a distribuição temporal (Huff 1º Quartil) selecionadas são normalmente utilizadas em projetos de drenagem e manejo das águas pluviais de bacias urbanas com área inferior a 100 km² (SÃO PAULO, 2012).

Análises de permanência e tendência de subida do nível do mar local

As análises de permanência e tendência de subida do nível do mar local trataram da dedução e projeção da curva de permanência do nível relativo do mar, relação que define o percentual de tempo que o nível do mar é capaz de igualar ou exceder determinada altitude. Nessas análises foram empregadas séries históricas resultantes do monitoramento sistemático do nível do mar local e da modelagem numérica da superfície do mar na região onde está inserida a área de estudo (Tabela 2).

Tabela 2. Dados sobre as séries utilizadas nas análises de permanência e tendência de subida do nível do mar local.

Fonte	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Intervalo
IBGE	5 minutos	Local	2010
CSIRO	30 dias	Global, 1º	1950 - 2012

Para a avaliação da variabilidade atual e da tendência de subida do nível do mar local foram adotados

como Cenário Referencial e Cenário Prospectivo, os anos de 2010 e 2100, respectivamente.

Na elaboração da curva de permanência do Cenário Referencial, foi empregada a série de níveis do mar registrada no ano de 2010, pela estação maregráfica EMSAL (GLOSS ID: 334), estação operada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada na baía de Todos-os-Santos, em área protegida na Capitania dos Portos da Bahia. De modo a incorporar os resultados da análise de permanência ao modelo hidrológico-hidráulico, os registros de níveis com referência local foram convertidos para o datum vertical de Imbituba-SC, com base nas constantes disponíveis na ficha de correlação de níveis da estação selecionada (IBGE, 2016a).

A curva de permanência do Cenário Prospectivo (2100) foi projetada mediante a aplicação da taxa de subida do nível do mar (NMM) inferida para a região onde está inserida a área de estudo, sobre os resultados da análise de permanência do Cenário Referencial. A taxa de subida do NMM foi estimada a partir de dados resultantes de modelo de regressão quadrática do tipo:

$$f(t) = m_0 + m_1 t + m_2 t^2 \quad (5)$$

No qual, m_0 , m_1 e m_2 são os parâmetros do modelo quadrático inferidos pelo método dos Mínimos Quadrados. A variável explicativa t corresponde ao ano no qual o NMM foi observado ou estimado pelo modelo.

Nessa análise de regressão foram utilizados dados históricos de alturas da superfície do mar disponibilizados pelo Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) (CHURCH et al., 2016). Trata-se de uma grade numérica de escala quase global (65°S to 65°N), com resolução espaço-temporal de 1° × 1° × 1 mês e sinal sazonal removido, que inclui a correção inversa do barômetro e a correção do ajuste isostático glacial feita para os dados de marégrafos. As alturas da superfície do mar foram reconstruídas por pesquisadores do CSIRO para o período de 1950 a 2001, como descrito por Church et al. (2004), e atualizadas para o ano de 2012, de acordo com Church e White (2011).

Modelagem hidrológico-hidráulica de cheias

A avaliação do risco de inundações pressupõe o conhecimento do comportamento hidráulico das enchentes locais, principalmente das cotas da superfície de escoamento, as quais podem ser obtidas mediante o monitoramento sistemático de vazões ou da modelagem numérica dos processos hidrológicos e hidráulicos envolvidos na formação das ondas de cheia natural. A BHJC não dispõe de estações fluviométricas com registros sistemáticos, o que impossibilita o emprego da análise de frequência de cheias locais e justifica as avaliações por modelagem numérica. Além disso, as simulações numéricas possibilitam projetar as respostas dos sistemas hidrológicos em cenários prospectivos (alteração no padrão de cobertura do solo, mudança no regime de chuvas, implementação de estratégias para controle de inundações etc.), ação necessária em estudos sobre os efeitos das mudanças climáticas, mas que encontra limitações dentro de uma abordagem fundamentada em séries históricas.

Neste estudo o Storm Water Management Model (SWMM), versão 5.0 implementada no pacote

computacional Autodesk Storm and Sanitary Analysis 2018, foi utilizado como plataforma de simulação numérica de cheias naturais. No processo de modelagem foram considerados os três principais fenômenos relacionados à formação de cheias em bacias urbanas de pequeno porte, onde a contribuição do escoamento de base não é relevante para a formação das ondas de cheia, quais sejam: (i) produção do volume escoado superficialmente; (ii) propagação do escoamento superficial nos interflúvios; e (iii) propagação do escoamento superficial ao longo de canais e reservatórios.

O espaço geográfico objeto de estudo foi discretizado em duas malhas compostas por elementos que sintetizam os processos de produção e propagação das águas superficiais. A malha produzida para a simulação dos processos de produção e propagação do escoamento superficial nos interflúvios, denominada de malha de sub-bacias, apresenta estrutura modular formada por 1.402 células quadradas de 4 hectares (200 m x 200 m). A malha linear utilizada na modelagem da propagação do escoamento superficial ao longo de canais e reservatórios, denominada de malha de drenagem, compreende 94 nós (27 reservatórios, 66 confluências, 01 exutório) e 125 links (74 condutos; 23 orifícios; 28 vertedores). Os parâmetros que descrevem as características físicas dos elementos que compõem as malhas de sub-bacias (área de drenagem, largura característica e declividade) e de drenagem (extensão, seções, cotas e declividades) foram estimados mediante a avaliação das linhas de fluxo superficial e do processamento de modelos numéricos do terreno baseados em dados topográficos resultantes de levantamentos aerofotogramétricos (ortofotos e restituição planialtimétrica, ambos na escala 1:2.000) e de levantamentos planialtimétricos cadastrais convencionais (escala 1:500) disponibilizados pela Companhia Baiana de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia.

No SWMM, as áreas de produção e propagação do escoamento superficial, as sub-bacias, são tratadas como reservatórios não-lineares, que recebem aportes da precipitação ou das áreas de produção adjacentes e reproduzem numericamente os processos de produção e propagação do escoamento superficial nos interflúvios (ROSSMAN; HUBER, 2016). O escoamento superficial é gerado quando a altura precipitada ou o volume afluente excede a capacidade de armazenamento nas depressões superficiais e de infiltração nos solos, sendo as vazões produzidas em cada intervalo de tempo estimadas pelo método de Manning com parâmetros de rugosidade ajustados ao escoamento superficial laminar. As sub-bacias são particionadas em duas subáreas, uma subárea permeável e outra subárea impermeável, com parâmetros hidrológicos (altura das depressões, d , e coeficiente de rugosidade, n) específicos. A Tabela 3 apresenta os valores adotados na parametrização hidrológica das parcelas permeável e impermeável das sub-bacias.

Tabela 3. Parâmetros adotados na modelagem hidrológica das subáreas permeável e impermeável.

Subárea	d (mm)	n
Permeável	5,0 (10,0)	0,40 (0,80)
Impermeável	2,5	0,100

Observação: Os valores entre parênteses foram adotados na parametrização das sub-bacias onde os terrenos são recobertos, predominantemente, por remanescentes da Mata Atlântica.

A fração de área impermeável total (AIT) de cada sub-bacia foi estimada com base na relação entre AIT e a densidade de domicílios expressa pela seguinte equação:

$$AIT = \frac{93,75}{1 + e^{1,22 - 0,115 \times DD}} \quad (6)$$

Na qual, AIT (%) é a fração de área impermeável total e DD (domicílios/hectare) é a densidade de domicílios ocupados da área de interesse. Essa relação explica 73% da variância total dos dados observados (Figura 2) e foi inferida a partir da análise de regressão de dados censitários (IBGE, 2016b) e de resultados do mapeamento de áreas impermeáveis que retratam a situação observada em determinadas células da malha de sub-bacias no ano de 2010.

A efetividade hidráulica das áreas impermeáveis foi incorporada na modelagem mediante a avaliação do percentual de área impermeável diretamente conectada com a rede de drenagem (AIDC). Essa avaliação foi realizada por método indireto, empregando a equação proposta por Sahoo e Sreeja (2016):

$$AIDC = 0,0035 AIT^{2,17} \quad (7)$$

O valor de AIDC foi utilizado para estimar a fração da AIT que drena na direção da subárea permeável, sujeitando o volume produzido nessa parcela, aos processos de infiltração e armazenamento típicos da subárea permeável.

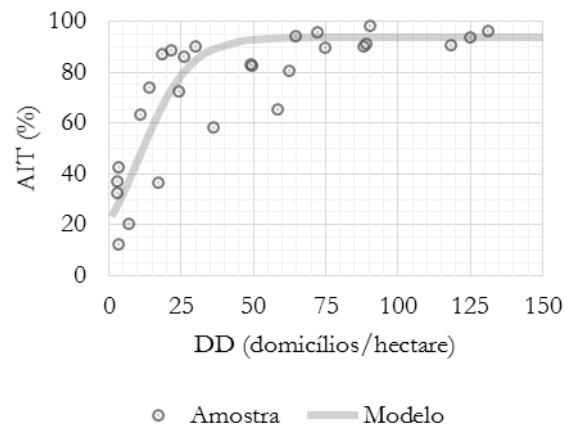


Figura 2. Relação entre a densidade de domicílios ocupados (DD) e a fração de área impermeável (AIT).

O processo de infiltração foi simulado pelo método de Green Ampt, modelo baseado na Lei de Darcy que assume a formação de uma frente de umedecimento, que se move para baixo a partir da superfície, separando o solo saturado (acima) do solo mais seco (abaixo) (ROSSMAN; HUBER, 2016). A condutividade hidráulica saturada (K_s), o potencial matricial na frente de umedecimento (Ψ_s) e o déficit inicial de umidade (θ_i), parâmetros do método de Green-Ampt inerentes às subáreas permeáveis, foram estimados de forma indireta mediante o uso de funções de pedotransferência (SAXTON; RAWLS, 2006; BRAKENSIEK; ENGLEMAN; RAWLS, 1981) e na descrição das características texturais e hidrológicas dos solos típicos dos

principais domínios geológicos presentes na BHJC (SALVADOR, 2014). A Tabela 4 apresenta os valores adotados na simulação do processo de infiltração das águas pluviais.

Para a modelagem da propagação do escoamento superficial ao longo de canais e reservatórios (malha de drenagem) foi selecionado o método da Onda Dinâmica (ROSSMAN, 2017). Nesse método, o SWMM resolve a forma completa das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento para o escoamento de superfície livre em regime não-permanente e gradualmente variado.

Tabela 4. Parâmetros adotados na modelagem do processo de infiltração das águas pluviais.

Solo	K_s (mm/hr)	Ψ_s (mm)	θ_i
Sedimentos fluviais e flúvio-marinhos	0,78	729,45	0,07
Sedimentos arenosos	114,05	142,9	0,37
Sedimentos da F. Barreiras	7,84	342,98	0,15
Solos Residuais do Cristalino	5,93	375,77	0,13

O procedimento descrito acima foi utilizado para simular enchentes naturais (vazões e superfície do escoamento fluvial) produzidas na BHJC em quatro cenários, que retratam os efeitos de ecossistemas naturais (Figura 3) sobre as inundações urbanas em diferentes contextos climáticos: (i) Cenário Referencial, representa a linha de base da pesquisa e retrata o efeito dos remanescentes da Mata Atlântica e das terras úmidas dos rios Jaguaribe e Trobogy sobre o risco de inundação no cenário climático referencial (2010); (ii) Cenário Prospectivo, retrata o efeito dos remanescentes da Mata Atlântica e das terras úmidas dos rios Jaguaribe e Trobogy sobre o risco de inundação no cenário climático prospectivo (2100); (iii) Cenário Prospectivo com Perda da Mata Atlântica, trata do efeito da supressão dos remanescentes da Mata Atlântica sobre o risco de inundação no cenário climático prospectivo (2100), mantendo os serviços prestados pelas terras úmidas dos rios Jaguaribe e Trobogy; e (iv) Cenário Prospectivo com Perda das Terras Úmidas, aborda as consequências da supressão das principais terras úmidas dos rios Jaguaribe e Trobogy sobre o risco de inundação no cenário climático prospectivo (2100), mantendo os serviços prestados pelos remanescentes da Mata Atlântica. De modo a destacar os efeitos das mudanças climáticas sobre o risco de inundações, o eventual impacto do crescimento urbano na BHJC sobre o ciclo das águas foi desconsiderado na construção dos cenários prospectivos, sendo, portanto, adotadas, em todos os cenários simulados, as taxas de impermeabilização do solo estimadas a partir de dados censitários do ano 2010.

Avaliação do dano anual esperado

A estimativa do dano anual esperado decorrente de inundações fluviais, indicador empregado na análise dos efeitos das mudanças climáticas e da performance dos serviços ecossistêmicos, resultou da integração numérica da função dano-probabilidade, relação que expressa a

probabilidade do dano máximo anual causado por uma inundação superar determinado valor monetário. As funções dano-probabilidade representativas dos regimes de inundação dos cenários avaliados, foram inferidas aplicando-se o método de Regressão Não-Linear (modelo logarítmico) nos dados resultantes da avaliação de danos causados por inundações com probabilidades de excedência fixadas com base nas análises de frequência do regime de chuvas intensas e de permanência do nível do mar.

Os danos causados por inundações foram computados mediante a análise da exposição e da vulnerabilidade de edificações residenciais às submersões causadas por eventos de cheia modelados numericamente. A avaliação da exposição às inundações consistiu na estimativa do total de áreas edificadas sujeitas a determinados níveis de submersão, por meio da integração dos resultados da modelagem hidrológico-hidráulica com os dados censitários da grade estatística 200 x 200 m (IBGE, 2016b). A modelagem numérica das cheias possibilitou o mapeamento das cotas máximas da superfície de inundação, as quais foram confrontadas com as cotas representativas das células que compõem a grade estatística, de modo a obter a profundidade máxima de submersão de cada célula durante os eventos simulados. No estudo foram consideradas apenas as células situadas na ZCBA, as quais foram classificadas conforme (i) a classe socioeconômica predominante e (ii) a área média das edificações, atributos deduzidos por meio da interpretação de dados censitários e de fotografias aéreas que retratam a situação local no ano de 2010. A vulnerabilidade das edificações sujeitas a inundações foi medida por meio de relações dano-profundidade – funções que relacionam o dano total (construção e conteúdo), expresso em reais por metro quadrado de área construída, e a profundidade de submersão à qual a edificação está exposta – elaboradas por Nascimento et al. (2007). Os valores monetários das funções originais (data base janeiro de 2000) foram atualizados para janeiro de 2018 com base no Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) calculado sistematicamente pelo IBGE.

Na avaliação dos danos causados pelas cheias modeladas foi considerado o mesmo nível de exposição e vulnerabilidade na ZCBA deduzido para o ano de 2010, que corresponde à linha de base do presente estudo. Dessa forma, os resultados das análises realizadas desconsideram o eventual impacto da expansão e adensamento urbano na ZCBA sobre o aumento da exposição às inundações, e refletem, especificamente, os efeitos das mudanças climáticas e as consequências da perda de ecossistemas sobre o perigo de inundações.

Para estimar a probabilidade de excedência dos danos decorrentes das inundações características dos cenários modelados, foi utilizado o método de Análise de Frequência de Eventos Coincidentes (USACE, 1993), admitindo que as variáveis forçantes (chuvas intensas e níveis do mar) são independentes. Essa análise foi realizada com o suporte do aplicativo HEC-SSP, versão 2.1.1. Nesse estudo foram avaliados os danos causados por enchentes decorrentes das combinações de 5 eventos de chuva com duração de 2 horas (probabilidades de excedência iguais a 1%, 2%, 4%, 10% e 50%) e 5 níveis do mar (permanências iguais a 0,5%, 3,0%, 10,0%, 35,0% e 77,5%).

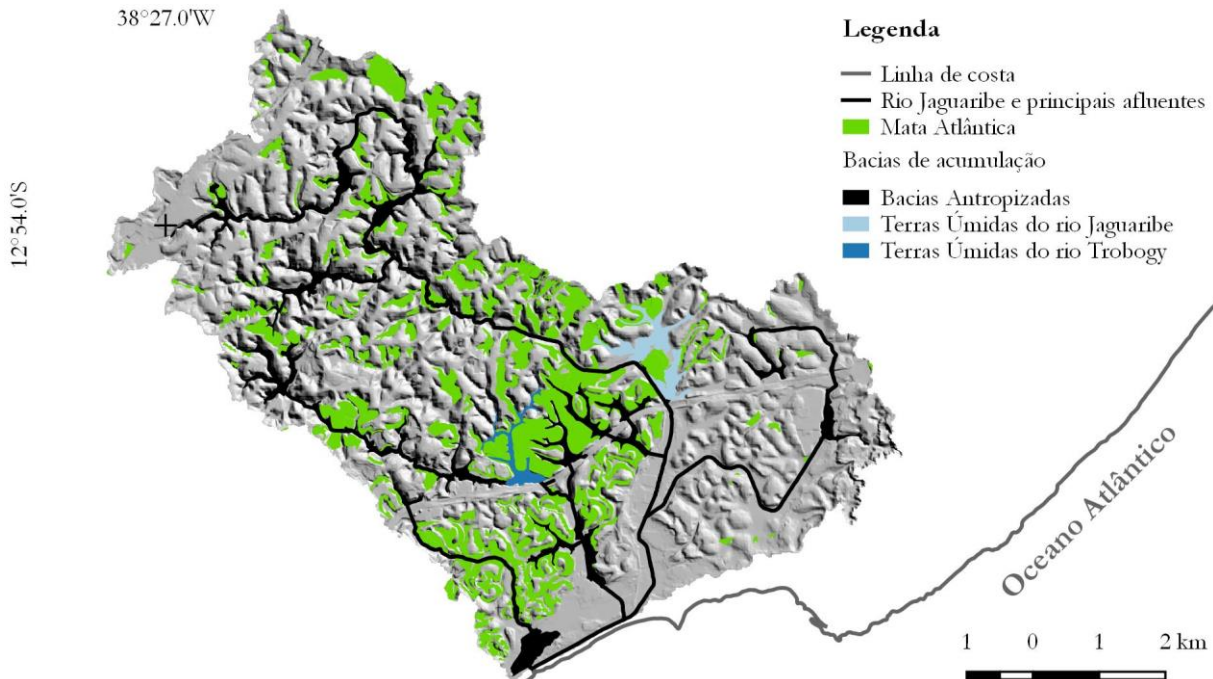


Figura 3. Ecossistemas naturais presentes na BHJC.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cenários climáticos e os impactos das mudanças do clima sobre o risco de inundações fluviais em áreas costeiras

A variação de longo termo dos extremos de precipitação foi avaliada com base nas séries temporais dos parâmetros de posição e escala ajustados a conjuntos de extremos registrados em períodos consecutivos de 30 anos. A série correspondente ao parâmetro de posição, apresenta boa aderência ao modelo harmônico com tendência de crescimento linear, o qual explica 84% da variação observada nos dados (Figura 4A). O comportamento temporal do parâmetro de escala também se ajusta ao modelo harmônico, o qual explica 81% da variação observada na série (Figura 4B), no entanto, diferente da série anterior, o componente que retrata a tendência é nulo. Esses resultados sugerem que a média dos extremos anuais foram mais sensíveis às variações climáticas ocorridas entre 1911 e 2010, em comparação com o desvio padrão, cuja variabilidade temporal apresenta componentes harmônicos estacionários.

Os modelos de regressão harmônicos possibilitaram projetar a distribuição de probabilidades de extremos anuais representativa do regime de chuvas intensas da BHJC no final do século 21. A Tabela 5 apresenta as alturas de chuvas com duração de duas horas e diferentes probabilidades de excedência anual. O aumento projetado para o volume precipitado durante chuvas com a mesma probabilidade, varia entre 12% e 4%, sendo maior nos eventos de maior frequência e menor magnitude. Os resultados obtidos indicam que chuvas com recorrência de 1 em 20 anos no período de 1981 a 2010, no futuro, período de 2071 a 2100, poderão ocorrer com frequência de 1 em 13,6 anos, variação dentro da faixa de valores previstos pelo IPCC (2012) – extremos de precipitação com frequência de 1 em 20 anos, no final do século 21, poderão apresentar

recorrências entre 1 em 5 anos e 1 em 15 anos. Na Tabela 6 são relacionados outros valores que demonstram as mudanças projetadas para a frequência dos extremos de precipitação na BHJC.

Tabela 5. Altura (mm) das chuvas máximas anuais com duração de 2 horas no Cenário Referencial (1981 - 2010) e no Cenário Prospectivo (2071 - 2100).

Probabilidade de Excedência Anual (%)	Altura da Chuva (mm)	
	Cenário Referencial	Cenário Prospectivo
1	114,6	118,8
2	104,9	109,6
4	95,2	100,3
10	82,0	87,7
50	55,8	62,7

Tabela 6. Variação de longo termo na frequência das chuvas com duração de 2 horas no Cenário Referencial (1981 - 2010) e no Cenário Prospectivo (2071 - 2100).

Altura da Chuva (mm)	Tempo de Recorrência	
	Cenário Referencial	Cenário Prospectivo
114,6	1 em 100 anos	1 em 73,0 anos
104,9	1 em 50 anos	1 em 35,3 anos
95,2	1 em 25 anos	1 em 17,2 anos
82,0	1 em 10 anos	1 em 6,7 anos
55,8	1 em 2 anos	1 em 1,5 anos

A série temporal de níveis médios anuais do mar na região onde está inserida a área de estudo, apresenta tendência de crescimento não linear, com 98% da sua variação explicada pelo modelo de regressão quadrático apresentado na Figura 5. De acordo com os resultados da análise de regressão, entre 1950 e 2010, o nível do mar subiu 2,10 mm/ano, valor próximo ao estimado (2,7 mm/ano) por Aubrey et al (1988) com base em registros maregráficos

da cidade do Salvador, Bahia, entre os anos de 1949 e 1968. Até o final do século 21, o nível do mar deverá subir cerca de 449 mm em relação ao ano de 2010, resultando numa taxa de 4,99 mm/ano, valor superior ao dobro da taxa observada na segunda metade do século 20.

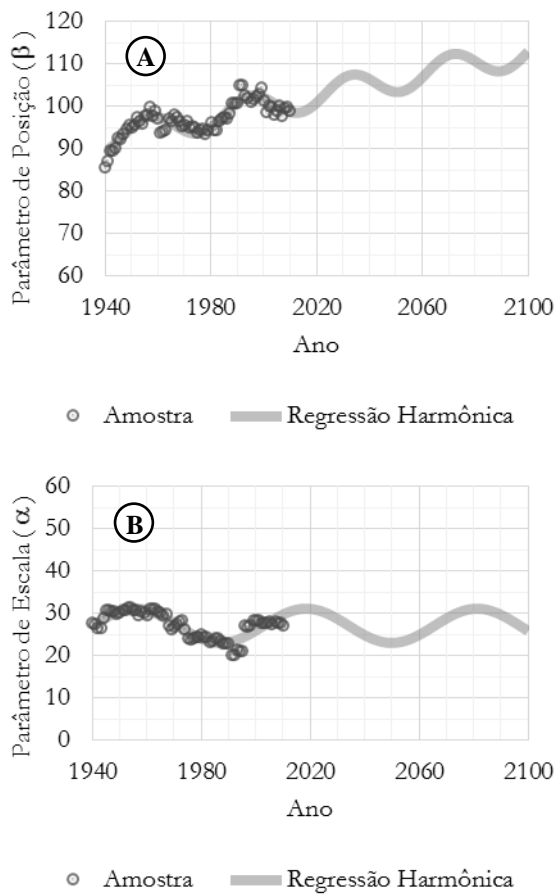


Figura 4. Curvas de regressão ajustadas às séries temporais dos parâmetros de posição (A) e escala (B) computados pelo método dos Momentos a partir de amostras de precipitações diárias máximas anuais registradas na região onde está inserida a área de estudo.

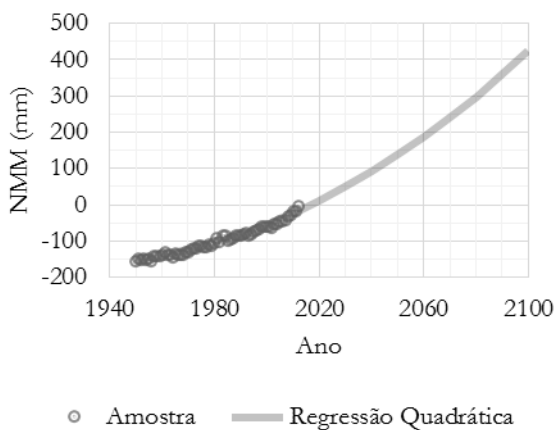


Figura 5. Curva de regressão ajustada à série temporal do nível médio do mar na região onde está inserida a área de estudo.

A taxa de subida do nível médio do mar projetada para o período entre 2010 e 2100 (4,99 mm/ano) foi utilizada como referência para a dedução da curva de permanência da elevação do nível do mar do Cenário Prospectivo. A Tabela 7 apresenta os valores das curvas de permanência da elevação do nível do mar nos anos de 2010 (Cenário Referencial) e 2100 (Cenário Prospectivo).

Tabela 7. Curva de permanência da elevação do nível do mar na área de estudo no Cenário Referencial (2010) e no Cenário prospectivo (2100).

Permanência (%)	Elevação do Nível do Mar (m)	
	Cenário Referencial	Cenário Prospectivo
77,5	-0,336	0,113
35,0	0,551	1,000
10,0	1,059	1,508
3,0	1,283	1,732
0,5	1,503	1,952

A estimativa dos danos decorrentes das inundações fluviais modeladas variou conforme a combinação de extremos de precipitação e elevações do nível do mar. Na Figura 6 são apresentadas superfícies que representam o espectro de danos possíveis dentro dos regimes de chuvas intensas e de marés característicos dos cenários climáticos avaliados. Os resultados demonstram que, nas condições observadas (Cenário Referencial) e projetadas (Cenário Prospectivo) para a BHJC, o risco de inundações fluviais na ZCBA é mais sensível às variações nos extremos de precipitação em comparação às mudanças na elevação do nível do mar. A ZCBA fica posicionada em uma zona de transição em termos hidráulicos, à montante da ZCBA o gradiente hidráulico nas calhas fluviais é dominado pelos agentes hidrológicos (vazões), enquanto que à jusante, os níveis são governados por processos costeiros (marés). Nesse contexto, durante a passagem de uma onda de cheia, a superfície do escoamento apresenta um gradiente crescente no sentido da foz, fenômeno conhecido como drawdown (LAMB et al., 2012), e, caso a elevação do nível do mar permaneça abaixo da altura do escoamento crítico (Número de Froude $< 1,0$), a descarga fluvial ocorre em condição livre, ou seja, os níveis d'água à jusante não interferem nas cotas do perfil hidráulico ao longo da zona de transição. Ainda que a elevação do nível do mar supere a altura do escoamento crítico, a interferência da maré sobre as cotas de inundação é pouco significativa, em comparação com o efeito da vazão produzida pela chuva.

As curvas dano-probabilidade resultantes do efeito combinado dos extremos de precipitação e das elevações do nível do mar sobre o regime de inundações nos diferentes cenários modelados são apresentadas na Figura 7. Os valores avaliados para o dano anual esperado no Cenário Referencial e no Cenário Prospectivo são R\$ 4.266.829,74 e R\$ 5.176.746,37, respectivamente. Esses resultados indicam que as mudanças climáticas poderão causar aumento de 21% (R\$ 909.916,63) no risco de inundações fluviais na ZCBA da BHJC. Deve-se destacar que o impacto das mudanças climáticas será mais significativo nos eventos de maior frequência (Figura 8).

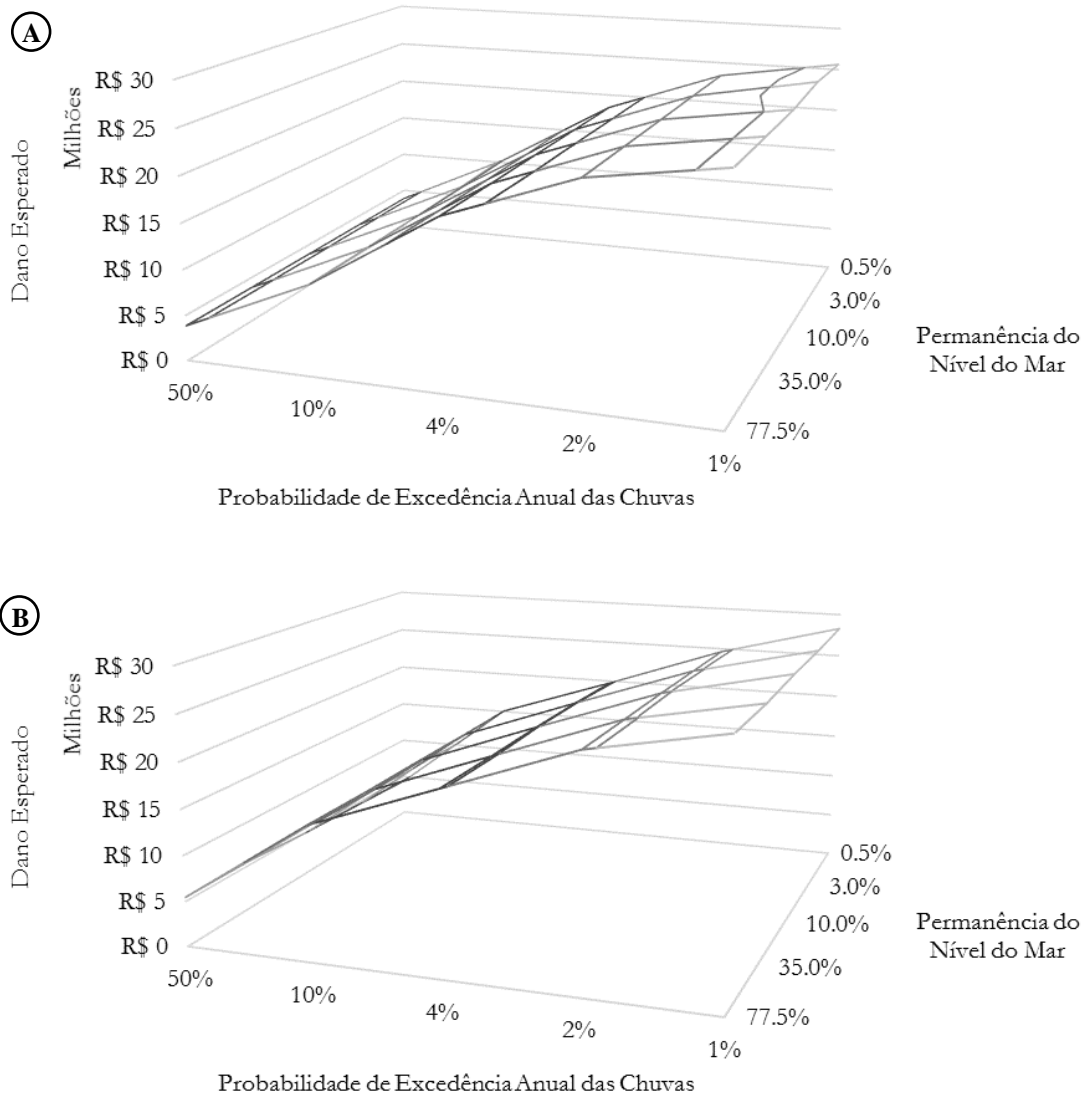


Figura 6. Variabilidade dos danos decorrentes de inundações fluviais na ZCBA em função dos extremos de precipitação e da elevação do nível do mar característicos do Cenário Referencial (A) e do Cenário Prospectivo (B).

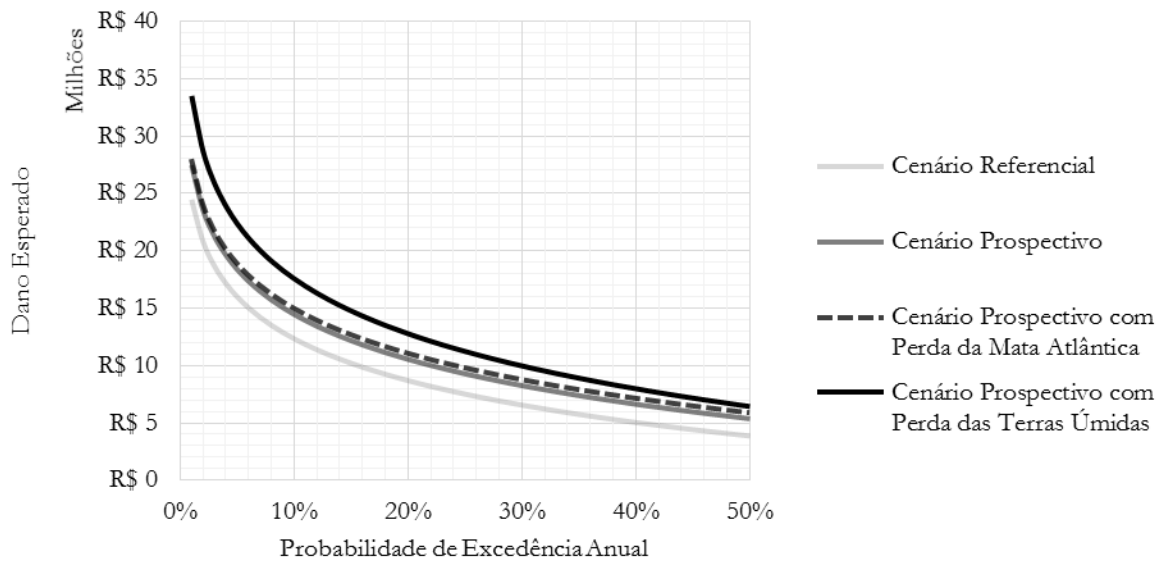


Figura 7. Curvas dano-probabilidade.

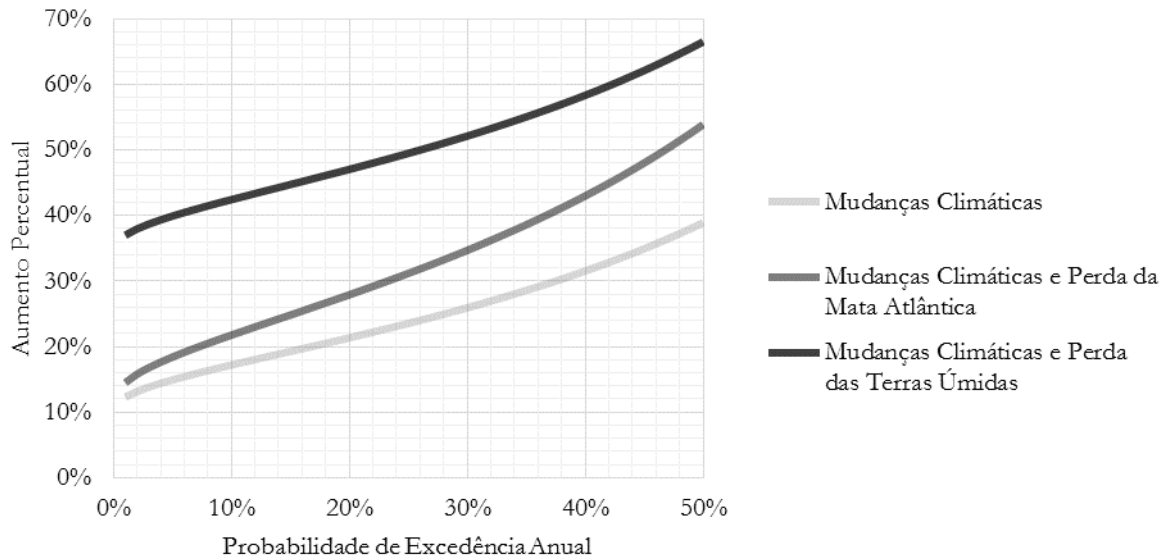


Figura 8. Variação do aumento percentual dos danos decorrentes de inundações fluviais em função da probabilidade de excedência anual.

Nota: Aumentos relativos aos danos estimados no Cenário Referencial.

Efeito da perda de ecossistemas naturais sobre o risco de inundação fluvial em áreas costeiras

O dano anual esperado no Cenário Prospectivo com Perda da Mata Atlântica foi avaliado em R\$ 5.455.908,99. Comparando esse valor com o dano anual esperado no Cenário Prospectivo (R\$ 5.176.746,37), a contribuição das mudanças climáticas é isolada e o incremento de R\$ 279.162,62 no prejuízo causado pelas inundações fluviais na ZCBA pode ser atribuído estritamente à perda do serviço ecossistêmico prestado pelos remanescentes da Mata Atlântica.

No Cenário Prospectivo com Perda das Terras Úmidas, o dano anual esperado foi estimado em R\$ 6.272.019,84. Assim, a eventual perda dos serviços prestados pelas terras úmidas no final do século 21, poderá induzir o aumento de R\$ 1.095.273,46 no prejuízo causado por inundações fluviais na ZCBA.

O efeito esperado das terras úmidas sobre o risco de inundações fluviais na ZCBA da BHJC é cerca de 4 vezes superior ao exercido pela Mata Atlântica. Algumas particularidades da BHJC podem ter influenciado nessa discrepância tão significativa: (i) as florestas atuam diretamente na redução dos volumes pluviais escoados superficialmente, no entanto a maior parte dos remanescentes da Mata Atlântica na BHJC, se encontra sobre terrenos do embasamento cristalino, em áreas onde as declividades das vertentes impõem restrições construtivas que limitam ou retardam a ocupação urbana formal, e reduz a eficiência do processo de infiltração em solos de permeabilidade normalmente superada pelas taxas de precipitação pluvial; (ii) parcela dos incrementos de volume superficial produzidos como consequência da supressão das florestas pode ser detida nas bacias de acumulação existentes, minimizando os prejuízos decorrentes da perda dos serviços prestados pelos remanescentes da Mata Atlântica. Ainda assim, é notória a maior influência das

terras úmidas, ecossistemas que atuam na propagação dos volumes escoados superficialmente, sobre o regime de inundações na ZCBA, especialmente ao se comparar as áreas ocupadas por esses ecossistemas (0,73 km²) com a superfície coberta por remanescentes da Mata Atlântica (9,46 km²).

O controle exercido pelos ecossistemas naturais, especialmente da Mata Atlântica, sobre o risco de inundações na ZCBA se mostra mais relevante nos eventos de maior frequência (Figura 8). Ao comparar as curvas dano-probabilidade do Cenário Referencial e do Cenário Prospectivo com Perda da Mata Atlântica, verifica-se que o aumento dos danos decorrentes da supressão da Mata Atlântica e das mudanças climáticas projetadas para o final do século 21 varia de 15% (1 em 100 anos) a 54% (1 em 2 anos), oscilação de 39%. No cenário futuro, a perda das terras úmidas situadas nos rios Jaguaribe e Trobogy implicará aumentos nos prejuízos causados por inundações na ZCBA entre 37% (1 em 100 anos) e 66% (1 em 2 anos), variação de 29%. Na medida que aumenta o tempo de recorrência dos eventos: (i) a intensidade das chuvas tende a superar, durante maior intervalo de tempo, o incremento da capacidade de infiltração dos terrenos proporcionado pelos remanescentes da Mata Atlântica; e (ii) os volumes escoados superficialmente se aproximam ou superam a capacidade de armazenamento nas terras úmidas, reduzindo o efeito de amortecimento das ondas de cheia. As limitações de ecossistemas naturais no controle de inundações de maior magnitude, também foram identificadas por Watson et al. (2016) ao quantificar os serviços de mitigação de inundações prestados por terras úmidas e planícies de inundação, e por Iacob et al. (2014) ao avaliar o impacto das ações de reflorestamento sobre o regime de cheias naturais. O efeito observado da magnitude das chuvas sobre a efetividade dos serviços ecossistêmicos relacionados ao controle de cheias naturais é aqui denominado de sensibilidade hidrológica.

Estudos realizados por Gao et al. (2018) demonstraram que a resposta hidrológica de ecossistemas naturais varia conforme o padrão temporal das chuvas. Portanto, a sensibilidade hidrológica dos ecossistemas também pode ser observada durante chuvas com o mesmo tempo de recorrência, desde que apresentem diferentes padrões temporais. Durante eventos de precipitação com maior duração, quando são produzidos volumes pluviais mais expressivos, a capacidade de abstração pluvial proporcionada pelas florestas pode ser reduzida pela saturação do solo e/ou preenchimento das depressões superficiais, antes da ocorrência do pico da tormenta, o que reduz a influência de ecossistemas como a Mata Atlântica sobre a formação dos volumes escoados superficialmente. O aumento do volume escoado superficialmente, nos eventos de maior duração, pode reduzir a capacidade de armazenamento das bacias hidráulicas antes da passagem do pico da onda de cheia, diminuindo o efeito de amortecimento de ecossistemas naturais como as terras úmidas.

Os resultados obtidos e as análises apresentadas sugerem que a funcionalidade hidrológica dos ecossistemas naturais está diretamente relacionada com o volume precipitado ao longo da tormenta, tornando a adaptação baseada em ecossistemas uma estratégia sensível às características das chuvas (volume precipitado e padrão temporal). Assim, a resposta hidrológica de um ecossistema natural poderá variar entre chuvas com o mesmo tempo de recorrência, mas com diferentes durações. Nesse contexto, as soluções para controle de inundações fluviais baseadas no aumento da velocidade de esgotamento hídrico, mediante a redução da resistência ao escoamento com obras de revestimento e/ou retificação de canais, destacam-se por promover o aumento da capacidade hidráulica de escoamento das calhas fluviais, independente das condições climáticas. Portanto, as medidas convencionais para drenagem urbana, infraestrutura cinza, podem ser utilizadas na ZCBA de modo a compensar a redução da eficiência dos serviços ecossistêmicos, infraestrutura verde, posicionados à montante, especialmente, durante os extremos de precipitação de maior duração.

CONCLUSÕES

O artigo trata do impacto das mudanças climáticas e da perda de ecossistemas naturais sobre o regime de inundações fluviais na ZCBA. No estudo foi empregada uma abordagem multivariada baseada na análise de frequências coincidentes e que incorpora o efeito da combinação de processos hidrológicos e costeiros, a partir dos resultados de modelagens numéricas e da quantificação dos danos causados por enchentes naturais em diferentes cenários climáticos.

Ao longo do século 21, as mudanças climáticas poderão aumentar o risco de inundações fluviais na ZCBA da BHJC em cerca de 21% – crescimento de R\$ 909.916,63 no dano anual esperado, entre os anos de 2010 e 2100 –, sendo a intensificação dos extremos de precipitação, a principal responsável por esse incremento. Essa projeção reflete apenas a contribuição de processos relacionados com o aquecimento do sistema global (extremos de precipitação e subida no nível do mar) e deve alcançar proporções maiores, caso seja incorporado na análise, o efeito da

expansão e adensamento urbano na ZCBA, o qual poderá contribuir para o crescimento do risco hidrológico, em razão do aumento da exposição às inundações fluviais.

No final do século 21, a perda de ecossistemas naturais poderá implicar incrementos no risco de inundações fluviais que correspondem a 31% (supressão da Mata Atlântica) ou 120% (supressão de terras úmidas) do aumento decorrente das mudanças climáticas. Destaca-se que o aumento dos prejuízos será mais expressivo nas inundações de maior frequência. Os serviços ecossistêmicos relativos ao controle de inundações fluviais são mais efetivos durante precipitações de menor intensidade e/ou de curta duração – característica aqui denominada de sensibilidade hidrológica –, por isso, a supressão de florestas ou terras úmidas causa maior impacto sobre os danos provocados por eventos de maior frequência.

A funcionalidade hidrológica dos ecossistemas naturais está diretamente relacionada aos volumes precipitados e sua distribuição temporal. A infraestrutura verde pode atuar de forma distinta durante chuvas com o mesmo tempo de recorrência, mas com diferentes durações, exigindo o uso de soluções que comportem os incrementos de vazão não controlados pelos ecossistemas naturais. Nesse contexto, os sistemas híbridos assumem relevada importância, pois possibilitam associar soluções de infraestrutura verde e cinza, aproveitando os benefícios proporcionados pelas duas abordagens para ampliar a capacidade e confiabilidade do sistema de controle de inundações.

Na perspectiva do controle de inundações fluviais em ambientes urbanos, os benefícios líquidos proporcionados pelos ecossistemas podem variar a depender do cenário climático futuro e do arranjo proposto para o sistema de drenagem e manejo das águas pluviais. A manutenção ou restauração de um ecossistema natural implica a apropriação de terrenos amplos que poderiam ser utilizados para gerar riquezas ou benefícios sociais a partir de diferentes usos urbanos, e há circunstâncias nas quais os efeitos hidrológicos dos ecossistemas naturais sobre o regime de inundações podem não ser percebidos nos terrenos mais baixos ou, a depender da disposição do sistema de canais e áreas de amortecimento de vazões, podem sincronizar ondas de cheia produzidas em diferentes afluentes, agravando as inundações nas áreas à jusante. Assim, a disposição adequada dos ecossistemas e obras de engenharia é decisiva para o sucesso da estratégia de adaptação.

Ante o exposto, os ecossistemas naturais podem prestar serviços relevantes para o controle do risco de inundações fluviais na ZCBA de bacias urbanas, o que torna a infraestrutura verde uma alternativa a ser considerada na concepção de sistemas de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, especialmente no contexto de planejamento voltado para o aumento da resiliência urbana segundo uma perspectiva holística dos impactos das mudanças climáticas. No entanto, a efetividade do aproveitamento de serviços ecossistêmicos na adaptação de cidades costeiras aos efeitos das mudanças climáticas sobre o risco de inundações fluviais, exige uma abordagem baseada: (i) no uso de sistemas híbridos que possibilitem a compensação da sensibilidade hidrológica dos ecossistemas, mediante a associação da infraestrutura verde com soluções convencionais de engenharia; e (ii) no posicionamento adequado dos ecossistemas dentro da bacia hidrográfica.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do inctAmbTropic – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Ambientes Marinhos Tropicais, CNPq/FAPESB Processos: 565054/2010-4, 8936/2011 e 465634/2014-1. O primeiro autor agradece à Hydros Engenharia e Planejamento pelo apoio e à Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia pelos dados e informações técnicas disponibilizados.

REFERÊNCIAS

- ARNELL, N. W. Expected Annual Damages and Uncertainties in Flood Frequency Estimation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 115, n. 1, p. 94-107, jan. 1989.
- AUBREY, D. G.; EMERY, K. O.; UCHUPI, E. Changing coastal levels of South America and the Caribbean region from tide-gauge records. *Tectonophysics*, v. 154, n. 3-4, p. 269-284, nov. 1988.
- Autodesk Storm and Sanitary Analysis. Versão 2018. [s.l.]. Autodesk.
- BAHIA. Ministério Público. Fundação José Silveira. Projeto Mata Atlântica Salvador. Diagnóstico do Bioma Mata Atlântica na Cidade de Salvador. [s.l.]: [s.n.], 2013. Disponível em: < <http://mpnuma.ba.gov.br>>. Acesso em: 18 fev. 2018.
- BARTH, N. C.; DÖLL, P. Assessing the ecosystem service flood protection of a riparian forest by applying a cascade approach. *Ecosystem Services*, v. 21, p. 39-52, out. 2016.
- CAZENAVE, A.; COZANNET, G. LE. Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, v. 2, n. 2, p. 15-34, fev. 2014.
- CETESB. Drenagem urbana: manual de projeto. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986.
- CHARLESWORTH, S. M. A review of the adaptation and mitigation of global climate change using sustainable drainage in cities. *Journal of Water and Climate Change*, v. 1, n. 3, p. 165-180, set. 2010.
- CHEN, X.; ZHANG, X.; CHURCH, J. A.; WATSON, C. S.; KING, M. A.; MONSELESAN, D.; LEGRESY, B.; HARIG, C. The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993-2014. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 7, p. 492-495, jul. 2017.
- CHOW, V.T. *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; COLEMAN, R.; LAMBECK, K.; MITROVICA, J. X. Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period. *Journal of Climate*, v. 17, n. 13, p. 2609–2625, jul. 2004.
- CHURCH, J. A.; WHITE, N. J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, v. 32, n. 4-5, p. 585-602, set. 2011.
- CIRANO, M.; LESSA, G. C. Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, n. 4, p. 363-387, dez. 2007.
- COLLOFF, M. J.; LAVOREL, S.; WISE, R. M.; DUNLOP, M.; OVERTON, I. C.; WILLIAMS, K. J. Adaptation services of floodplains and wetlands under transformational climate change. *Ecological Applications*, v. 26, n. 4, p. 1003-1017, jun. 2016.
- D. L. BRAKENSIEK; R. L. ENGLEMAN; W. J. RAWLS. Variation within Texture Classes of Soil Water Parameters. *Transactions of the ASAE*, v. 24, n. 2, p. 0335-0339, 1981.
- DE MOEL, H.; JONGMAN, B.; KREIBICH, H.; MERZ, B.; PENNING-ROWSELL, E.; WARD, P. J. Flood risk assessments at different spatial scales. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, v. 20, n. 6, p. 865–890, ago. 2015.
- FISCHER, E. M.; KNUTTI, R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, v. 5, n. 6, p. 560-564, jun. 2015.
- GAO, J.; KIRKBY, M.; HOLDEN, J. The effect of interactions between rainfall patterns and land-cover change on flood peaks in upland peatlands. *Journal of Hydrology*, v. 567, p. 546-559, dez. 2018.
- GÜNERALP, B.; GÜNERALP, I.; LIU, Y. Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards. *Global Environmental Change*, v. 31, p. 217–225, mar. 2015.
- HALLEGATTE, S.; GREEN, C.; NICHOLLS, R. J.; CORFEE-MORLOT, J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 9, p. 802-806, set. 2013.
- HEC-SSP: Hydrologic Engineering Center's Statistical Software Package. Versão 2.1.1 [s.l.]. USACE.
- HIEZ, G. L'homogénéité des données pluviométriques. *Cah. ORSTOM, Ser. Hydrol*, v. 14, n. 2, p. 129-172, 1977.
- HUFF, F. Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms. *Water Resources Research*, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, dez. 1967.
- IACOB, O.; ROWAN, J. S.; BROWN, I.; ELLIS, C. Evaluating wider benefits of natural flood management strategies: an ecosystem-based adaptation perspective. *Hydrology Research*, v. 45, n. 6, p. 774-787, dez. 2014.
- IBGE. Análise do nível médio do mar nas estações da rede maregráfica permanente para geodésia (RMPG),

- 2001/2015. Rio de Janeiro: IBGE, 2016a. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf.>. Acesso em: 9 set. 2016.
- IBGE. Grade Estatística. Rio de Janeiro: IBGE, 2016b. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/interativos/grade.html>. Acesso em: 29 set. 2016.
- IKEUCHI, H.; HIRABAYASHI, Y.; YAMAZAKI, D.; KIGUCHI, M.; KOIRALA, S.; NAGANO, T.; KOTERA, A.; KANAE, S. Modeling complex flow dynamics of fluvial floods exacerbated by sea level rise in the Ganges–Brahmaputra–Meghna Delta. *Environmental Research Letters*, v. 10, n. 12, p. 124011, dez. 2015.
- IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- IPCC. Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report: Volume 1: Global and Sectoral Aspects. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- KUNDZEWICZ, Z. W.; KANAE, S.; SENEVIRATNE, S. I.; HANDMER, J.; NICHOLLS, N.; PEDUZZI, P.; MECHLER, R.; BOUWER, L. M.; ARNELL, N.; MACH, K.; MUIR-WOOD, R.; BRAKENRIDGE, G. R.; KRON, W.; BENITO, G.; HONDA, Y.; TAKAHASHI, K.; SHERSTYUKOV, B. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, v. 59, n. 1, p. 1–28, jan. 2014.
- LAMB, M. P.; NITTROUER, J. A.; MOHRIG, D.; SHAW, J. Backwater and river plume controls on scour upstream of river mouths: Implications for fluvio-deltaic morphodynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 117, n. 1, p. n/a-n/a, mar. 2012.
- LEONARD, M.; WESTRA, S.; PHATAK, A.; LAMBERT, M.; VAN DEN HURK, B.; MCINNES, K.; RISBEY, J.; SCHUSTER, S.; JAKOB, D.; STAFFORD-SMITH, M. A compound event framework for understanding extreme impacts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 5, n. 1, p. 113-128, jan/fev. 2014.
- MEEHL, G. A.; HU, A.; TEBALDI, C.; ARBLASTER, J. M.; WASHINGTON, W. M.; TENG, H.; SANDERSON, B. M.; AULT, T.; STRAND, W. G.; WHITE III, J. B. Relative outcomes of climate change mitigation related to global temperature versus sea-level rise. *Nature Climate Change*, v. 2, n. 8, p. 576-580, ago. 2012.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- MITSCH, W. J.; BERNAL, B.; HERNANDEZ, M. E. Ecosystem services of wetlands. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, v. 11, n. 1, p. 1-4, fev. 2015.
- MOFTAKHARI, H. R.; AGHAKOUCHAK, A.; SANDERS, B. F.; MATTHEW, R. A. Cumulative hazard: The case of nuisance flooding. *Earth's Future*, v. 5, n. 2, p. 214-223, fev. 2017.
- MUNANG, R.; THIAW, I.; ALVERSON, K.; MUMBA, M.; LIU, J.; RIVINGTON, M. Climate change and Ecosystem-based Adaptation: A new pragmatic approach to buffering climate change impacts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 5, n. 1, p. 67-71, mar. 2013.
- NAGHETTINI, M. C.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- NASCIMENTO, N.; MACHADO, M. L.; BAPTISTA, M.; DE PAULA E SILVA, A. The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context. *Urban Water Journal*, v. 4, n. 3, p. 195–210, set. 2007.
- NEUMANN, B.; VAFEIDIS, A. T.; ZIMMERMANN, J.; NICHOLLS, R. J. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLOS ONE*, v. 10, n. 3, p. n/a-n/a, mar. 2015.
- PFAHL, S.; O'GORMAN, P. A.; FISCHER, E. M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 6, p. 423-427, jun. 2017.
- ROSSMAN, L. A. *Storm Water Management Model Reference Manual, Volume II – Hydraulics*. Cincinnati: USEPA, 2017. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm.>. Acesso em: 19 dez. 2017.
- ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. *Storm Water Management Model Reference Manual, Volume I – Hydrology (Revised)*. Cincinnati: USEPA, 2016. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm.>. Acesso em: 19 dez. 2017.
- SAHOO, S. N.; SREEJA, P. Determination of Effective Impervious Area for an Urban Indian Catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 21, n. 4, p. n/a-n/a, abr. 2016.
- SALVADOR. Secretaria Municipal do Saneamento, Habitação e Infraestrutura Urbana. Coordenadoria de Áreas de Risco Geológicas. Relatório Conclusivo do Diagnóstico das Áreas de Risco. Plano Diretor de Encosta do Município de Salvador. Salvador: [s.n.], 2004.
- SALVADORE, E.; BRONDERS, J.; BATELAAN, O. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, v. 529, n. 1, p. 62-81, out. 2015.
- SÃO PAULO. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: diretrizes para projetos. São Paulo: SMDU, 2012.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 5, p. 1569-1578, set. 2006.

SILVEIRA, A. L. L. DA. Equação para os coeficientes de desagregação de chuva. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 4, p. 143-147, out./dez. 2000.

SVENSSON, C.; JONES, D. A. Dependence between sea surge, river flow and precipitation in south and west Britain. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 8, n. 5, p. 973-992, out. 2004.

USACE. Hydrologic frequency analysis. Washington: USACE, 1993.

USACE. Risk-based analysis for flood damage reduction studies. Washington: USACE, 1996.

WATSON, K. B.; RICKETTS, T.; GALFORD, G.; POLASKY, S.; O'NIEL-DUNNE, J. Quantifying flood mitigation services: The economic value of Otter Creek wetlands and floodplains to Middlebury, VT. *Ecological Economics*, v. 130, p. 16-24, out. 2016.

WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V.; ZWIERS, F. W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, v. 26, n. 11, p. 3904-3918, jun. 2013.

ZHOU, Q. A. Review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water*, v. 6, n. 4, p. 976-992, abr. 2014.

CAPÍTULO 3

CONCLUSÕES

A dissertação trata do impacto das mudanças climáticas e da perda de ecossistemas naturais sobre o regime de inundações fluviais na zona costeira de baixa altitude (ZCBA). No estudo foi empregada uma abordagem multivariada baseada na análise de frequências coincidentes e que incorpora o efeito da combinação de processos hidrológicos e costeiros, a partir dos resultados de modelagens numéricas e da quantificação dos danos causados por enchentes naturais em diferentes cenários climáticos.

Ao longo do século 21, as mudanças climáticas poderão aumentar o risco de inundações fluviais na ZCBA da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e conjugadas (BHJC) em cerca de 21% – crescimento de R\$ 909.916,63 no dano anual esperado, entre os anos de 2010 e 2100 –, sendo a intensificação dos extremos de precipitação, a principal responsável por esse incremento. Essa projeção reflete apenas a contribuição de processos relacionados com o aquecimento do sistema global (extremos de precipitação e subida no nível do mar) e deve alcançar proporções maiores, caso seja incorporado na análise, o efeito da expansão e adensamento urbano na ZCBA, o qual deverá contribuir para o crescimento do risco hidrológico, em razão do aumento da exposição às inundações fluviais.

No final do século 21, a perda de ecossistemas naturais poderá implicar incrementos no risco de inundações fluviais que correspondem a 31% (supressão da Mata Atlântica) ou 120% (supressão de terras úmidas) do aumento decorrente das mudanças climáticas. Destaca-se que o aumento dos prejuízos será mais expressivo nas inundações de maior frequência. Os serviços ecossistêmicos relativos ao controle de inundações fluviais são mais efetivos durante precipitações de menor intensidade e/ou de curta duração – característica aqui denominada de sensibilidade hidrológica –, por isso, a supressão de florestas ou terras úmidas causa maior impacto sobre os danos provocados por eventos de maior frequência.

A funcionalidade hidrológica dos ecossistemas naturais está diretamente relacionada aos volumes precipitados. Por isso, os serviços ecossistêmicos podem atuar de forma distinta durante eventos com o mesmo tempo de recorrência, mas com diferentes durações, exigindo o uso de soluções que comportem os incrementos de vazão não controlados pelos ecossistemas naturais. Nesse contexto, os sistemas híbridos assumem relevada importância, pois possibilitam associar soluções de infraestrutura verde e cinza, aproveitando os benefícios proporcionados pelas duas abordagens para ampliar a capacidade e confiabilidade do sistema de controle de inundações.

Na perspectiva do controle de inundações fluviais em ambientes urbanos, os benefícios líquidos

proporcionados pelos ecossistemas podem variar a depender do cenário climático futuro e do arranjo proposto para o sistema de controle de inundações. A manutenção ou restauração de um ecossistema natural implica a apropriação de terrenos amplos que poderiam ser utilizados para gerar riquezas ou benefícios sociais a partir de diferentes usos urbanos, e há circunstâncias nas quais os efeitos hidrológicos dos ecossistemas naturais sobre o regime de inundações podem não ser percebidos nos terrenos mais baixos ou, a depender da disposição do sistema de canais e áreas de amortecimento de cheias, podem sincronizar ondas de cheia produzidas em diferentes afluentes, agravando as inundações nas áreas à jusante. Assim, a disposição dos ecossistemas e obras de engenharia é decisiva para o sucesso da estratégia de adaptação.

Ante o exposto, os ecossistemas naturais podem prestar serviços relevantes para o controle do risco de inundações fluviais na ZCBA de bacias urbanas, o que torna a infraestrutura verde uma alternativa a ser considerada na concepção de sistemas de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, especialmente no contexto de planejamento voltado para o aumento da resiliência urbana segundo uma perspectiva holística dos impactos das mudanças climáticas. No entanto, a efetividade do aproveitamento de serviços ecossistêmicos na adaptação de cidades costeiras aos efeitos das mudanças climáticas sobre o risco de inundações fluviais, exige uma abordagem baseada: (i) no uso de sistemas híbridos que possibilitem a compensação da sensibilidade hidrológica dos ecossistemas naturais, mediante a associação da infraestrutura verde com soluções convencionais de engenharia; e (ii) no posicionamento adequado dos ecossistemas naturais dentro da bacia hidrográfica.

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS



ISSN 2318-0331 *version
online*

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

- [Scope and Policy](#)
- [Form and preparation of manuscripts](#)
- [Send of the manuscripts](#)

Scope and Policy

The scope of the journal is to cover topics involving the following fields of knowledge: hydraulics, hydrology, relationship between water resources and environmental engineering, hydrometeorology, irrigation, drainage, qualitative and quantitative management of water, limnology, hydrogeology, erosion, sedimentation, environmental technologies, water resources economics, measurement and instrumentation in water resources.

Manuscripts can be submitted in Portuguese or English. Papers are published in English, and should contain Title, Abstract and Keywords in Portuguese. The translation of papers to English of accepted papers written in Portuguese is of the authors responsibility.

The manuscript should be sent by internet to the following address: <http://www.abrh.org.br/RBRH> according to the instructions for use, omitting the names of the authors and footnotes identifying them in the manuscript file. Besides the identification of the authors via the system, it is requested that (also via the system) the file be sent in Doc with the complete name and affiliation of the authors. This information will be used if the article is accepted for publication. The author must agree to the following conditions (via the system) when the manuscript is sent:

- 1) Commit to paying a deposit concerning for the fee charged per exceeding page, if any, after the review and final editing of the manuscript;

- 2) Take responsibility for the other authors, if any, as co-responsible for the technical and scientific content of the article, according to Article 5 of Brazilian Law N. 9610, regarding Copyright

Copyright

The authors are fully responsible for all statements published in the article. All the material published becomes the property of the RBRH, which then holds the copyright and will be available with free and unrestricted access at: ABRH (www.abrh.org.br/RBRH) and SciELO (www.scielo.br) or

other databases where the RBRH - Brazilian Journal of Water Resources is or eventually becomes indexed. Total or partial reproduction of the work is allowed since the original work is explicitly referred. If the manuscript is accepted for publication, a copyright transfer agreement form to RBRH/ABRH will be requested from the authors

The manuscripts subdivided into parts I, II, etc, must be registered separately, but will be submitted to the same reviewers. The manuscripts may contain figures in color (pictures, graphs, plots, and other), but the maximum permissible size of the complete file is 30Mb (Megabytes). Manuscripts that do not follow these guidelines will be returned to the authors to correct the problems. The classification of manuscripts sent as Scientific/Technical, and that Editors and/or Reviewers interpret as being in the style of a Technical Note should be altered, and they will be reevaluated if alterations are requested. If the authors do not agree with the change to the Technical Note, the manuscript will be rejected.

Processing and Peer Review system/ Criteria for refereeing

The manuscripts are sent to two reviewers for evaluation and should present a technical and scientific contribution to the community.

The manuscripts should be submitted through the RBRH's electronic system for manuscript submission at <http://www.editorialmanager.com/rbrh>, where the author responsible will be informed, as well as all the data for the identification of the co-authors. The manuscript received will be treated according to the procedures established by the Journal Editorial Board.

The manuscript-reviewing process in the RBRH is meticulous. Voluntary reviewers apply their knowledge and dedicate many hours of their precious time to ensure that the articles will be published within a defined period and will be appropriate for publication in the Journal.

Technical review: The papers will be evaluated first as to compliance with the rules of publication and documentation required to submit the manuscripts. If they are not in accordance with the instructions, they will be returned to the authors to adapt them to the scope of the journal. If the manuscript is not within the expected parameters, it will be returned to the corresponding author by the Chief Editor.

Pre-analysis: the manuscripts approved by the technical review will be submitted to the Associate Editors for appreciation regarding their adequacy to the scope of the journal. If the manuscript is not within the expected parameters it will be returned to the corresponding author by the Chief Editor.

Analysis of merit and content: the manuscripts approved by the Associate Editors will be evaluated for merit and scientific method by at least two ad-hoc reporters from units that are

not those from which the paper comes, besides the Chief Editor. The Chief Editor will decide whether the manuscript will be accepted. When the original has to be revised, the manuscript will be returned to the corresponding author for modification. A revised version with the changes made will be re-submitted by the authors and reevaluated by the Chief Editor, Associate Editors and reviewers as needed. The manuscripts that have been refused, but which could possibly be reformulated can return as a new paper, beginning another judgment process.

After approval regarding scientific merit, the papers will be submitted to a final review by an independent professional appointed by the journal. This service will be paid for by the author(s), and the necessary procedure, the value of the service and the form of payment of the professional will be sent to the corresponding author. If they are not adequate, the papers will be sent to the authors for revision.

The concepts issue in the papers published will be the exclusive responsibility of the authors and are not obliged to reflect the opinion of the Chief Editor or Editorial Board.

Editorial Board

The editorial board of the RBRH comprises the Chief Editor, Associate Editors and Executive Editor (Look at Editorial Board). The Executive Editor is the main person responsible for following the manuscript review process at the RBRH, inviting Reviewers and informing Authors, and thus helping the Associate Editors in the process. The Chief Editor, besides establishing guidelines for the RBRH is also involved in polemical cases and analyzing appeals by authors regarding the Editorial Decision.

Appeals against an Editorial Decision

The author(s) can appeal an Editorial Decision to reject a manuscript. This procedure should be performed via the system using the option "Send E-mail", for the rejected manuscript. The authors should supply elements that justify the appeal which will be analyzed by the Associate Editor and Chief Editor. If the appeal is accepted, the manuscript review process may be re-opened.

Submission Fee

For the values presented below, the corresponding author of the papers is considered for the classification at each category of the submission fee

- a. Submission fee for members: R\$120,00
- b. Submission fee for non-members: R\$300,00
- c. Discount for authors who have collaborated as RBRH reviewers in three or more reviews in 12 months: 50% of the amount of the fee corresponding to the category to which they belong.
- d. International authors (non-residents of Brazil) and work was completed at an **International**

Institution will be exempt from the submission fee until the end of 2017.

The payments should be performed by Credit Card or bank slip issued by the ABRH system.

The process of evaluation will begin only after the payment is identified by the ABRH system.

This process is automatic, and the author does not have to do anything.

The submission fee will not be returned if the manuscript is rejected for publication by the RBRH.

No processing charges (APCs) are applied after the manuscript is accepted.

RBRH adopts the "Crossref Similarity Check" system offered by SciELO for plagiarism identification.

Content

All content of the journal, except where identified, is licensed under a [Creative Commons](#) **CC-BY (CC BY 4.0)**.

The online journal is free and open access.

Form and preparation of manuscripts

File Format

The text should be compatible with the Microsoft Word editor format (Doc or Docx). The following guidelines should be obeyed:

*** Configuration of the page**

- Size of paper: A4 (210x297 mm);
- Columns: two columns of the same size, 8.1 cm wide and internal spacing 0.8 cm;
- Spacing between lines: simple;
- Figures or tables that exceed the width of a column should be inserted into a section at the end of the article or in an attached file:
- Equations must not exceed the width of a column (8.1 cm).
- Number the pages and do not use headers, footers or footnotes;
- Number the lines of each page;
- The name of the document that contains the article in a Word format should not contain parts or complete names of the principal author and/or co-authors
- Fonts: text and tables: 10- point Garamond font
 - titles of tables and figures; 9-point Garamond bold
 - other titles ; 11- point Garamond bold

- **Illustrations and tables**

- Width recommended for figures: 8.1 cm (one column in the Journal); maximum size: 17 x12 cm;
- The lines used in the figures and graphs should not be too fine and the texts and captions should not be too small or too big in relation to the figure size;
- Captions: cross hatched or grayscale, black and white photos; the articles can be printed in color if the author pays the additional printing costs;
- Try to create tables that will fit into one column of the Journal or, at most, half a page;
- The figures should be included in the text and sent in a separate file in TIFF, JPEG, PCX, GIF or BMP format, with a minimum resolution of 300 dpi.

- **Equations**

Whenever possible, prepare mathematical characters and equations using the Microsoft Equation available in all versions of Word from Microsoft Office, 2003. Users of Word 2007/2010 can send files in the Docx format and use the new equation editor available in these versions.

- **References**

- All references must be cited in the text and vice versa;
- Citations in the text should be in small letters and references in capital letters.

Scientific/Technical Article

This refers to the report on an original research, with a well defined hypothesis, favoring innovative topics. The texts should cover the items highlighted in capital letters and in bold, without a paragraph and without numbering, leaving two spaces (twice ENTER) after the previous item and one space (a single ENTER) to begin the text in the following order: title (English), name of authors; abstract, keywords; title (Portuguese), resumo and palavras chave. To make sure that peer analysis will be blind, the papers submitted should be presented without authors and footnotes.

TITLE: Centered; it should be clear and concise, allowing immediate identification of the article content, trying to avoid words such as: analysis, study and evaluation. The manuscripts should present the title in English and Portuguese, enabling the presentation of a bilingual summary.

AUTHORS: The number of authors should be the minimum possible, considering only people who actually participated in the article and are able to answer for it fully or in essential parts. The authors must present complete affiliation, indicating the institution, city, state and country. When necessary, the Editorial Board may request justifications to explain the presence of the authors in the paper, as well as present the indication of the contribution made by each author. The authors will be identified in the paper sent for evaluation. The editors will remove the authors' names before sending them to the reviewers, and the information will only be inserted into the articles after the paper is approved.

ABSTRACT: The text must begin on the second line after the item, it should be clear, concise and must explain the intended objective(s) seeking to justify their importance

(without including references), the main procedures adopted, the most significant results and conclusions, with a maximum of 12 lines. Below it, on the second line after the item, should appear the KEYWORDS (at most six trying not to repeat the words in the title), written in small caps and bold.

INTRODUCTION: This presents the topic to be discussed, its objectives and purposes, informing what methods were used, precise delimitation of the research in relation to the field of knowledge, periods covered, and other elements needed to situate the topic of the work, using recent bibliography (last 5 years) and, preferably periodicals.

MATERIAL AND METHODS: Depending on the nature of the work, a characterization of the experimental area must be inserted, clarifying the conditions under which the study was performed. When the methods are specifically known to be used, the reference alone will be enough, otherwise it is necessary to describe the procedures used and the adaptations made. Units of measure and symbols must follow the International System of Units.

RESULTS AND DISCUSSION: Illustrations (figures, charts and photographs, etc.) must be presented with sufficient size and details for the final composition, preferably in the same position in the text, and may be colored. Illustrations can have parts that are colored, and the caption below. They must be numbered successively with Arabic numerals. Tables: avoid long tables with superfluous data, adapt their sizes to the workspace of the paper and, as far as possible, place only horizontal continuous lines; their captions should be concise and self-explanatory, and should also present the title in English. Photographs can be colored. In the discussion compare the results with the data obtained in the bibliography.

CONCLUSIONS: They should be based only on the results of the study. Avoid repeating the results in a subsequent listing, seeking to compare what was obtained with the initial objectives established. The conclusions should be written making it easier to interpret the article without the need to consult other items of the same.

ACKNOWLEDGMENT(S): insert it (them) when necessary concisely, after the conclusions.

REFERENCES: The references should be placed in alphabetic order and in capital letters, and normalized according to standard NBR-6023 Aug.2000) of the ABNT (Brazilian Association of Technical Norms). All authors mentioned in the text and in tables, figures or illustrations should be referenced. Avoid citations of abstracts, unpublished papers and personal communications. It is suggested that at least 70% of the references be from the last 5 years and 70% from articles and periodicals.

CITATIONS: All citations in the text should be in the list of References. The citations in the text should appear in small letters and, when inserted between parentheses at the end of the paragraph, should be in capital letters. If there are other citations of the same author(s), in the same year (other publications), they will be identified by small letters (a, b, c), after the year of publication. When there are three or more authors only the first author will be cited in the text, followed by et al, without italics, but in the final bibliographic list, the other names should also appear. When making a citation the work consulted directly is identified: the author and/or the work cited in this is indicated as follows: SILVA(2010) *apud* Santos (2012). If there are any doubts, consult the NBR-6023 standard of ABNT. It is advisable that before drafting the manuscript, the authors take an article published in the last issue of the journal as a formatting base.

Technical Note

It must present technological advances without presenting a hypothesis. When it is a case study, the conclusions should present propositions. It should be written in

technical language, easy to understand, on an issue related to the fields of knowledge covered by the Journal, by author(s) showing experience on the subject matter, providing guidance for the different RBRH users. Only the presentation of articles that contribute to the subject is justified, not simply personal cases or cases with a limited interest. There is greater freedom of style than for scientific articles, and technical notes should mostly contain the following items: Title, Author(s), Abstract, Keywords, Introduction, Description of the Subject, Conclusions and References. The authors' identification will be included only after the article is accepted for publication. The articles must be written according to the same guidelines for Scientific Articles, with the following particularities;

The header of the first page should show the identification: TECHNICAL NOTE, in capital letters, underlined, bold, centered and spaced 1.1 cm from the top margin.

INTRODUCTION: should contain a brief history, explaining the importance, the current status of the subject based on a review of literature, clearly presenting the purpose of the article.

DESCRIPTION OF THE SUBJECT: with different titles that can be divided into sub-items, one should discuss the subject, pointing out the theoretical bases, presenting experiences and recommendations, discussing and critiquing situations, based as much as possible on bibliography and technical standards.

CONCLUSIONS: when appropriate, they should be written clearly and concisely, consistent with the goals set. It should not be a simple restatement simply presenting the other paragraphs of the article again.

EXAMPLES

CITATION IN THE TEXT

One author:

In paragraph Silva (2000) or

Between parentheses: (SILVA, 2000)

Two authors:

In paragraph Santos and Luz (2010) or

Between parentheses: (SANTOS; LUZ, 2010)

Three authors:

In paragraph: Ribeiro, Carmo and Castelo Branco (2000) or

Between parentheses: (RIBEIRO; CARMO; CASTELO BRANCO, 2000)

Four or more authors:

Melo et al. (2012) or

(MELO et al., 2012)

Documents by the same author, published the same year:

In paragraph: Brasil (2000a,b) or

Between parentheses: (BRASIL, 2000a,b)

CITATION OF CITATION

In paragraph Pereira et al.¹ (1947 *apud* REIS, NOBREGA, 2013, p.86)

Indicate the author cited in **footnote**, and the author consulted in the **list of references**

This type of citation should only be used in cases in which the original document has not been recovered (very old documents, data insufficient to locate the material, etc.).

REFERENCES

Include only the references cited in the text, in tables and illustrations that have already been published, organized in alphabetic order by surname of author (s) and in capital letters. Use the typographic resource of *italics* to highlight the title of the work.

At least 70% of the references should be from the last 5 years and 70% from articles in periodicals. If there is any doubt, consult the ABNT-NBR-6023 standard.

Examples:

ARTICLE IN A JOURNAL

FERREIRA, P. A.; GARCIA, G. O.; MATOS, A. T.; RUIZ, H. A.; BORGES JUNIOR, J. C. F. Transporte no solo de solutos presentes na água residuária de café conilon. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 28, n. 1, p. 29-35, jan./mar. 2006.

ARTICLE IN AN ON-LINE JOURNAL

VAZ, C. A. B.; SILVEIRA, G. L. O modelo PEIR e base SIG no diagnóstico da qualidade ambiental em sub-bacia hidrográfica urbana. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 19, n. 2, p. 281-298, abr./jun. 2014. Disponível em: http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/b1394cc48a760488bf0af84be5678b0f_b6cf0c395f9e0a65a73ccf7619e6e63b.pdf. Accessed on Feb 12, 2015-06-21

BOOK

Same author throughout the work

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – PAN-Brasil. Brasília. DF: Ministério do Meio Ambiente 2005.

Different authors in the work

RUIZ, H. A.; FERREIRA, P. A.; ROCHA, G. C.; BORGES JUNIOR, J. C. F. Transporte de solutos no solo. In: van LIER, Q. J. *Física do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. cap. 6, p. 213-240.

DISSERTATIONS/THESES

RENNER L.G. Geoquímica de soils basálticos da formação Serra Geral, Sul do Brasil, como base em rocha total e micro-análise de mineiras, 2010, 226 f. Thesis (Doctorate in Earth Sciences) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, 2010

ONLINE DISSERTATIONS/THESES

COSTA L. Contribuições para um modelo de gestão da água para a produção de bens e serviços a partir do conceito de pegada hídrica. 2014. 180 p, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014. Available at <HTTP://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3136/tde.29122014-170328/fr.php>. Accessed on Feb 12, 2015.

PAPER PRESENTED AT EVENT

BERLATO, M.A.; MARTINS, E.J.; CORDEIRO, A.P.A.; ODERICH, E.H. Tendência observada da precipitação pluvial anual e estacional do Estado do Rio Grande do Sul e relação com a temperatura da superfície do mar do Oceano Pacífico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju, SE, Anais...Campinas; Campinas: CBAGRO, 2007. CD-ROM

PAPER PRESENTED AT ONLINE EVENT

FECHINE, J.A.; GALVINCIO, J.D. Aplicação do teste de Menn-Kendall na análise de tendências climáticas em anos de El Niño - Bacia Hidrográfica do RIO Pontal – Estado de Pernambuco. In CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém. Anais... São José dos Campos; INPE, 2010. Available at HTTP://cbmet2010.web437.uni5.net/anais/artigos/42_65198.pdf. Accessed on Feb 12, 2015

Authors interested in submitting their manuscript to RBRH, should visit www.abrh.org.br/RBRH and follow the Instructions to Authors.

[[Home](#)] [[About this journal](#)] [[Editorial board](#)] [[Subscription](#)]



All the content of the journal, except where otherwise noted, is licensed under a [Creative Commons License](#)

Associação Brasileira de Recursos Hídricos

**Av. Bento Gonçalves, 9500
Porto Alegre, RS - Brasil
CEP: 91501-970
Tel./Fax: +55 (51) 3493 2233/(51) 3308 6652**



rbrh@abrh.org.br

ANEXO B – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO

RBRH, Brazilian Journal of Water Resources - Manuscript ID RBRH-2019-0091

RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos <onbehalf@manuscriptcentral.com>

Qua 03/07/2019 07:01

03-Jul-2019

Dear Mr. Rangel da Silva:

Your manuscript entitled "Aproveitamento de serviços ecossistêmicos como estratégia para adaptação de cidades costeiras aos efeitos das mudanças climáticas sobre o risco de inundações fluviais" has been successfully submitted online and is presently being given full consideration for publication in the RBRH, Brazilian Journal of Water Resources.

Your manuscript ID is RBRH-2019-0091.

Please mention the above manuscript ID in all future correspondence or when calling the office for questions. If there are any changes in your street address or e-mail address, please log in to ScholarOne Manuscripts at <https://mc04.manuscriptcentral.com/rbrh-scielo> and edit your user information as appropriate.

You can also view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging in to <https://mc04.manuscriptcentral.com/rbrh-scielo>.

Thank you for submitting your manuscript to the RBRH, Brazilian Journal of Water Resources.

Sincerely,

RBRH, Brazilian Journal of Water Resources Editorial Office