

PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA DE CHEIA EM TRECHO DE RIO SOB

INFLUÊNCIA DE MARÉ – O Caso do rio Santo Antônio no NE do Brasil

Denis D. COSTA¹; Thiago Alberto da S. PEREIRA²; Luis Gustav de M. REIS³; Carlos Ruberto FRAGOSO JR⁴.

RESUMO

Bacias hidrográficas tropicais no geral são bastante susceptíveis as variações hidrológicas, com períodos secos que podem se prolongar por meses ou anos. Porém inundações também é um problema significativo, principalmente devido ao período chuvoso ser intenso e concentrado em 3-4 meses. Neste contexto, a bacia do rio Santo Antônio no NE do Brasil apresenta características semelhantes e vem sofrendo de forma sistemática efeitos de eventos hidrológicos críticos de máximos, que em inúmeras vezes provocam prejuízos de vários aspectos, motivados basicamente por: i. resposta rápida da bacia aos eventos hidrológicos, ii. morfologia da região que favorece ao aparecimento de manchas de inundações e iii. ocupação desordenada da população nas calhas de inundações do rio. Além disso, o rio Santo Antônio na área desse estudo está sob o controle de maré com a formação de um estuário em sua foz, o que pode gerar retardos na propagação de uma onda de cheia ao longo do canal com efeitos mais intensos na inundações. Assim, através da aplicação de estudos hidrológicos, levantamentos topográficos e simulação hidráulica, o estudo visou entender o comportamento do nível d'água neste rio para a passagem de uma onda de cheia em diferentes tempos de recorrência, combinando com eventos de marés, possibilitando o zoneamento de áreas críticas para minimizar impactos socioeconômicos locais. Como principais conclusões destacam-se: O rio Santo Antônio durante uma maré de Sизіgia tem seu gradiente hidráulico invertido numa extensão de até 20km, o que provoca a entrada de água em seu canal, diminuindo a capacidade de escoamento, porém o efeito combinado de maré e cheia são amortecidos devido haver largas planícies de inundações em seu estuário, o que traz como alerta a necessidade do zoneamento destas áreas como proteção, para que sejam delimitadas e preservadas sem edificações.

¹ Doutorando; Water Resources Engineering – Lund University; John Ericsson Lund, Sweden; denis.duda_costa@tvrl.lth.se, Telefone: +46 722805154

² Mestre e Professor Auxiliar; Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Alagoas; Campus do Sertão Santiago 57309-005 Delmiro Gouveia, Brasil; thiago_alb@hotmail.com, Telefone: +55 96309008

³ Consultor na área de Recursos Hídricos; Gama Engenharia e Recursos Hídricos; Av. João Davino 186 Maceió, Brasil; luis.gustavo@gamaengenharia.com.br, Telefone: +55 99214352.

⁴ Doutor e Professor Adjunto; Centro de Tecnologia - Universidade Federal de Alagoas; Campus A.C. Simões 57072-900 Maceió, Brasil; crfj@hotmail.com, Telefone: +55 99977935.

Palavras-chave: estudos hidrológicos; influência de maré; inundações; simulação hidráulica.

1. INTRODUÇÃO

Áreas marginais a rios são historicamente regiões difusoras da ocupação de sociedades ao redor do mundo. Porém estas áreas são bastantes suscetíveis aos riscos oriundos das condições de variabilidade no regime hidrológico local (Peduzzi *et al.*, 2009; Islam *et al.*, 2013).

Dentre os riscos mais relevantes, as inundações aparecem como as causadoras dos maiores danos, sejam econômicos ou sociais, podendo ser ainda mais agravado em razão das interferências humanas e do grau de ocupação de áreas irregulares, como os leitos de rios, sobretudo com o crescimento das cidades em países em desenvolvimento após a década de 1970, em virtude da falta de planejamento para o uso e ocupação do solo (Ferraz *et al.*, 1998). De acordo com o *Internacional Strategy os Disaster Reduction* e citado por Tucci (2009), estatísticas mundiais somam que metade dos desastres naturais estão relacionados à inundações, e que as perdas para um período entre 1994 a 2003 ultrapassaram a quantia dos US\$ 66 bilhões.

No Brasil, as inundações têm provocado diversos danos e mortes, como em casos recentes ocorridos em Santa Catarina no vale do rio Itajaí-Açu em 2008, na região serrana do Rio de Janeiro em 2010, ou nos estados de Alagoas e Pernambuco com diversas bacias hidrográficas afetadas em 2010. Um levantamento realizado pela Confederação Nacional dos Municípios em 2010, afirma ter havido no Brasil mais de 3400 eventos relacionados a chuva como inundações, enchentes e deslizamentos entre 2003 e 2010, apontando ainda a região Nordeste (NE) como a mais vulnerável, possivelmente em razão de ter um regime de precipitação concentrado em 3 ou 4 meses, aliado a deficiência em infraestrutura e ações governamentais preventivas.

O Estado de Alagoas no NE do Brasil tem um histórico de inundações ocorridas em diversas bacias. Fragoso *et al.* (2010) relata ao menos 7 grandes catástrofes ocorridas nos rios Mundaú e Paraíba, somente em 2010 foram atingidos mais de 95 municípios, afetando mais de 300 mil pessoas e deixando mais 157 mil desabrigos/desalojados (SECRETARIA NACIONAL DE DEFESA CIVIL, 2010). A bacia do rio Santo Antônio também tem sofrido de forma sistemática com eventos hidrológicos de máximas, provocando prejuízos de vários aspectos para a região, os motivos são basicamente: i. altos índices pluviométricos no período chuvoso, ii. morfologia da região que favorece ao aparecimento de manchas de inundação e iii. Ocupação desordenada da população ao longo da calha maior do rio. Para o evento crítico de 2010 a precipitação máxima de 1 dia registrada superou os 180 mm, onde as inundações causaram destruições de residências, estradas e pontes, sendo o município de São Luiz do Quitunde um dos mais atingidos, por se encontrar na parte baixa da bacia com largas e extensas áreas alagáveis e onde o rio está sob o efeito das condições de maré.

Diante do cenário apresentado, a porposta do trabalho foi de se obter uma compreensão de como se dá o processo de inundações na bacia do rio Santo Antônio, aplicando para isso estudos hidrológicos para eventos extremos de máximos para diferentes tempos de retorno e modelagem hidráulica para caracterização da capacidade de escoamento por parte das seções transversais do rio em uma passagem de onda de cheia, além da influência que

condições de maré à jusante podem exercer nesse processo, permitindo o zoneamento de áreas de riscos.

2. ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Santo Antônio está localizada na parte litorânea norte do Estado de Alagoas, na região Nordeste do Brasil, e possui uma área de aproximadamente 930 Km². Esta bacia tem como seus principais corpos d'água o rio Santo Antônio e o rio Jitituba. O rio Santo Antônio banha a cidade de São Luiz do Quitunde e desagua, após receber o rio Jitituba, no oceano Atlântico, formando um estuário na cidade de Barra de Santo Antônio (Figura 1).

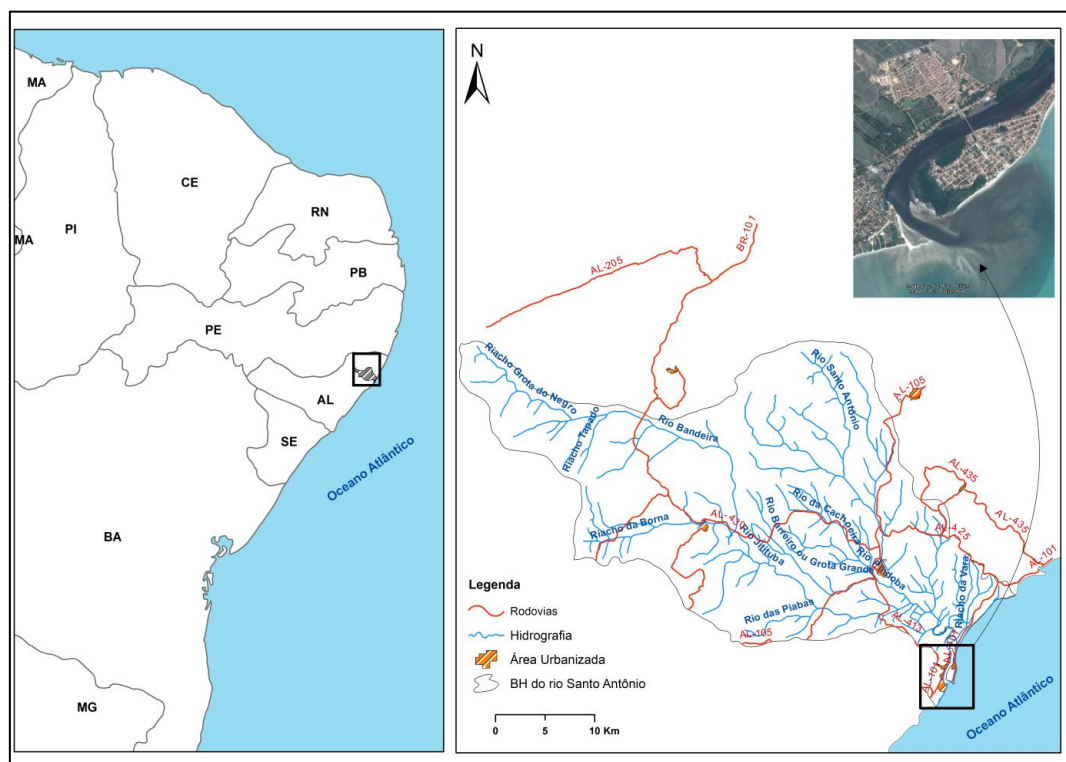


Figura 1. Mapa de localização da bacia do rio Santo Antônio.

Em relação a precipitação, a região apresenta valores médios anuais na ordem de 2.200 mm na parte litorânea, na região central da bacia têm-se índices pluviométricos entre 1.500 a 1.700 mm, já na parte alta da bacia têm-se valores de 2.000 mm anuais. Em relação à temporalidade das chuvas, verificou-se que o regime pluviométrico da bacia é caracterizado por um período húmido, entre os meses de maio a julho, onde se concentra cerca de 70% do valor da precipitação média anual. Pode-se encontrar neste período chuvoso, eventos com alta intensidade pluviométrica, como o ocorrido no dia 4 de Junho de 2010, que apresentou um total acumulado de 180 mm/dia. Figura 2 apresenta a temporalidade da chuva ao longo de um ano, além de mostrar a alta variabilidade da precipitação nesta área.

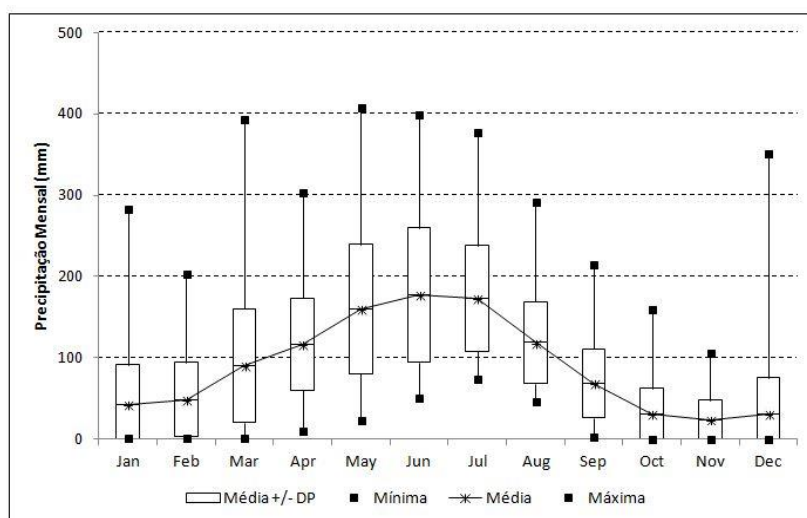


Figura 2. Variabilidade precipitação na área de estudo.

3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Os rios Jitituba e Santo Antônio são os principais cursos d'água da bacia do rio Santo Antônio, e ao longo do tempo vem sofrendo com inundações de magnitude à provocar prejuízos as cidades que os margeiam. O rio Jitituba banha a cidade de Flexeiras, e logo a jusante da cidade, na localidade de Conceição do Peixe há a formação de extensas áreas propícias a alagamentos (Figura 3).

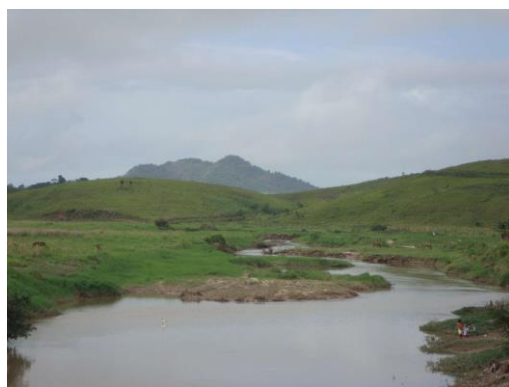


Figura 3. Margens do rio Jitituba.

Outro ponto crítico no rio Jitituba é nas proximidades de sua confluência com o rio Santo Antônio, neste local pode-se encontrar uma extensa área de extravasamento da calha do rio (Ver Figura 4). Um aspeto importante neste local é o fato de o rio Jitituba (assim como o Santo Antônio) sofrer influência dos níveis de maré (comprovado em estudos anteriores realizados por uma indústria Sucroalcooleira da região) o que pode maximizar o efeito das inundações dificultando o escoamento das cheias durante algumas horas.



Figura 4. Rio Jitituba na ponte da Rodovia AL-105.

O rio Santo Antônio, por sua vez margeia apenas a cidade de São Luiz do Quitunde e a jusante desagua no oceano, na cidade de Barra de Santo Antônio, formando um estuário composto pela ilha da Crôa. O vale do Santo Antônio é caracterizado por apresentar em sua parte baixa da bacia largas e extensas áreas inundáveis (Figura 5), que estando sob o efeito de maré, aliado aos altos índices pluviométricos e ocupação desordenada, provoca inundações na cidade de São Luiz do Quitunde. A Figura 6 mostra exemplo de construções no leito do rio Santo Antônio.



Figura 5. Planície de inundação do rio Santo Antônio.



Figura 6. Exemplo de construção desordenada na cidade de São Luiz do Quitunde.

4. PROPOSTA METODOLÓGICA

A metodologia foi composta de três etapas, que contemplam os estudos hidrológicos, levantamentos topobátimétricos e estudos hidráulicos.

4.1 Estudos Hidrológicos

Os estudos hidrológicos objetivam primordialmente o cálculo de hidrogramas de projeto, onde para se determinar as vazões máximas de projeto é necessário a área da bacia hidrográfica de estudo e disponibilidade de registros de estações fluviométricas.

Segundo Tucci (1993), as metodologias para cálculo da vazão máxima podem ser classificadas em:

- Ajuste de uma distribuição estatística aos registros de vazão máxima;
- Regionalização de vazões máximas;
- Modelos precipitação-vazão.

Sabe-se que a região de estudo não possui estações fluviométricas com um período representativo de observações de vazões máximas, portanto serão utilizados os modelos de transformação chuva-vazão, pois estes não exigem registros de históricos de cheias na bacia.

4.1.1 Precipitação Máxima

O cálculo das precipitações máximas é um passo fundamental para o processo de transformação chuva – vazão. Para as estações pluviométricas da região, e inventariadas no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), apenas o posto São Luiz (00935025) possui uma série de dados adequada para a bacia do rio Santo Antônio. Selecionado o posto, fez-se uso de ajustes estatísticos no intuito de obter os valores máximos anuais de vazão para um dia, para diferentes tempos de recorrência (2, 10, 20 e 100 anos). Assim, foram ajustados distribuições de valores extremos de probabilidade (Gumble, Log-Normal e Gama), para os valores máximos diários do posto 00935025 (Ver Figura 7).

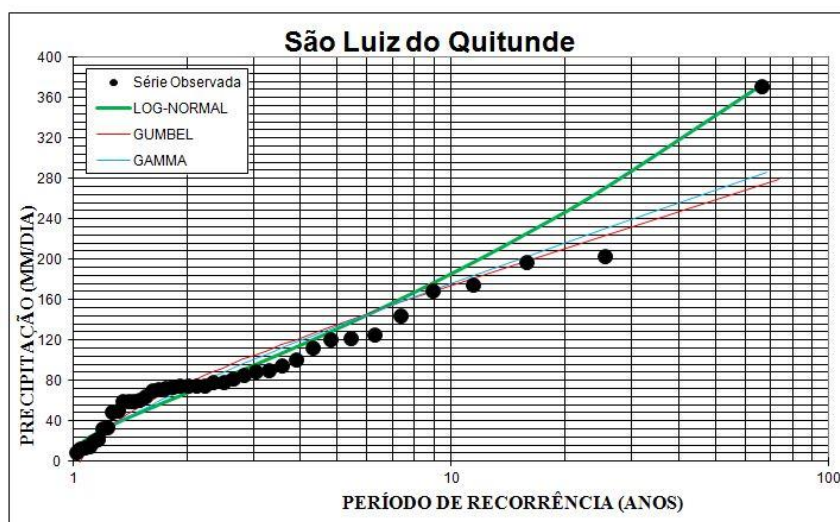


Figura 7. Ajuste estatístico de máximos para o posto São Luiz.

Em seguida, foi realizada a distribuição temporal dos eventos de precipitação máxima de 1 dia para diferentes durações, utilizando a relação dada pela Equação 1.

$$r_{i/j} = \frac{P_i}{P_j} \quad (1)$$

Onde: $r_{i/j}$ é a relação entre as precipitações de duração i e duração j ;

P_i é a precipitação com duração i ;

P_j é a precipitação com duração j ;

As alturas pluviométricas para as correspondentes durações e frequências foram obtidas da curva p-d-f para a cidade de Maceió (CETESB, 1986). A partir da curva p-d-f e do uso da Equação 1 foram determinadas as relações de durações para diferentes tempos de retorno. No caso específico da relação de 1 dia e 24h foi utilizado $P_{24h}/P_{1dia} = 1.13$, proposto pelo U.S Weather Bureau.

Assim, foram determinados os valores das alturas pluviométricas para diferentes durações e tempo de recorrência para o posto São Luiz, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Curva precipitação-duração-frequência para o posto São Luiz.

Duração	Tempo de Recorrência (anos)				
	2	10	50	100	1000
30min	22.11	43.97	60.83	67.84	103.80
1h	32.33	72.02	104.84	118.12	169.33
2h	41.76	94.46	139.72	158.55	223.39
4h	52.04	119.48	178.68	203.78	283.43
6h	58.70	134.19	201.38	230.01	319.34
8h	63.34	146.16	219.45	250.86	347.19
10h	67.58	155.41	232.87	265.66	368.90
12h	70.80	162.84	244.64	278.43	386.81
24h	87.14	196.50	292.38	332.91	466.84
1dia	77.12	173.90	258.74	294.61	413.13

4.1.2 Transformação Chuva-Vazão

Primeiramente a bacia do rio Santo Antônio foi discretizada em 5 sub-bacias, denominadas: SA1, SA2, SA3, SA4 e SA5 (Figura 8). Depois para a transformação chuva-vazão, foi utilizado inicialmente o método CN (curva número) desenvolvido pela *Soil Conservation Service* (SCS), que permite determinar a capacidade de armazenamento do solo (S) em função do tipo do solo, da umidade antecedente e do uso do solo (Equação 2).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Utilizando um mapa do uso de solos para a região (Engecorps, 2010) e um mapa de pedologia para os grupos hidrológicos de solos (EMBRAPA, 2012), foi possível caracterizar os valores de CN para cada sub-bacia, tomando as condições de umidade antecedente tipo

II, e considerando o solo pertencente ao grupo hidrológico tipo B (Sartori et al, 2005). Assim, os valores para tipo de uso do solo podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de CN utilizados.

Tipo de Uso	CN
Área Urbanizada	75
Mata	55
Assentamento	75
Agricultura	62
Pastagem	61
Coqueiral	36
Solo exposto	80

Fonte: Tucci (1993).

O passo seguinte consistiu do cálculo do tempo de concentração (T_c) para cada sub-bacia, pois influencia na escolha da chuva de projeto, tempo de pico e vazão máxima. Como a característica predominante de cada sub-bacia é rural, a opção foi a de se aplicar a Equação de Dodge para bacias rurais (Silveria, 2005), uma equação empírica que se baseia apenas na área (A) e na declividade (S). Os valores de T_c para cada sub-bacia foram: SA1 = 2.79h, SA2 = 2.17h, SA3 = 4.95h, SA4 = 4.09h e SA5 = 7.58h.

$$T_c = 21.88 * A^{0.77} * S^{0.17} \quad (3)$$

Então, de posse da precipitação máxima, as curvas p-d-f e T_c , foi possível encontrar os histogramas das precipitações totais para cada sub-bacia, além dos respetivos hidrogramas de projeto para os diferentes tempos de recorrência (2, 10, 50 e 100 anos).

4.1.3 Propagação de cheias em canais

A propagação das ondas de cheias foi realizada pelo método de Muskingun-Cunge, através do modelo hidrológico semi-distribuído IPHS1, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS e com o auxílio da Tabela 3 que traz as informações de cada trecho (Trecho 4 refere-se ao rio Santo Antônio, enquanto Trecho 5 refere-se ao rio Jitituba) a ser propagado o hidrograma. Foram realizados também levantamentos e reconhecimentos de campo para fins de aplicação do modelo. A Figura 8 ilustra a utilização do modelo IPHS1 para a área de estudo.

Tabela 3. Dados dos trechos utilizados no IPHS1.

Bacia	Trecho	Comprimento do Trecho (m)	Cotas (m)		Dados do Canal (m)		Manning - n
			Montante	Jusante	Altura - h	Largura - B	
Santo Antônio	5	7000	140	100	1.5	11	0.08
	4	6400	100	33	1.9	25	0.13

Os hidrogramas propagados não serão apresentados aqui neste artigo, sendo demonstrado apenas as vazões máximas encontradas nos pontos de controle (PC) de cada sub-bacia na Tabela 4.



Figura 8. Discretização da bacia do rio Santo Antônio no IPHS1.

Tabela 4. Vazões máximas dos hidrogramas propagados (m^3/s).

Bacia	PC	Tr (anos)			
		2	10	50	100
Santo Antônio	1	62.60	150.51	225.19	255.38
	2	76.04	193.57	293.87	335.67
	3	75.55	201.36	363.44	459.24
	4	57.19	145.02	224.20	256.28

4.2 Levantamentos Topobátimétricos

Como apresentado anteriormente, o trabalho consta de um estudo hidrológico com a geração de hidrogramas e propagação dos mesmos através do uso de um modelo hidrológico, e também a aplicação de um modelo hidráulico para se conhecer os níveis d'água provocados por inundações nas seções do rio. Assim, para a aplicação do modelo hidráulico, antes é necessário a realização de levantamentos topobátimétricos para conhecimento das seções transversais e cotas das obras - de - arte especiais (pontes rodoviárias) no rio estudado. Todos os levantamentos foram nivelados em relação a Referência de Nível mais próxima, cadastrado no banco de dados geodésico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no intuito de comparações entre as cotas de cheias e as cotas das edificações e equipamentos.

Este levantamento também serviu para a estimativa da declividade média no trecho, que é o gradiente de escoamento na entrada do modelo hidráulico.

As seções topográficas levantadas para o rio Santo Antônio foram três, além de um monitoramento dos níveis (cota) de maré. A localização das seções foi:

- Rio Santo Antônio - imediatamente a montante da ponte da AL-105 (Seção 3);
- Rio Santo Antônio - imediatamente a jusante da ponte da AL-105 e a montante da cidade de São Luiz do Quitunde (Seção 2);
- Rio Santo Antônio - Na cidade de São Luiz do Quitunde (Seção 1).

Quanto ao estudo da influência de maré, foi realizado uma campanha de monitoramento durante 8 horas no dia 25/09/2010, durante uma maré de Sizígia.

Nesta campanha, foram instaladas e niveladas réguas graduadas em suas seções: uma no rio Santo Antônio em São Luiz do Quitunde na ponte dentro da cidade e uma outra em seu estuário na cidade de Barra de Santo Antônio abaixo da ponte que dá acesso a ilha da Crôa, onde os níveis foram monitorados concomitantemente durante 8 horas consecutivas.

Através dessa campanha foi possível mensurar a influência da maré nos níveis do rio Santo Antônio na cidade de São Luiz do Quitunde, onde nota-se uma variação de 1,40 m na foz e uma variação de 60 cm em São Luiz (Ver Figura 9).



Figura 9. Monitoramento do nível do rio Santo Antônio e da maré (Barra de Santo Antônio).

Ainda é possível notar que durante um período de 4 horas o gradiente hidráulico do rio em relação ao mar ficou invertido, provocando provavelmente entrada de água no canal. Esta informação para um estudo de cheia é bastante significativa, pois o nível do mar entra como uma condição de contorno durante a simulação hidráulica, reduzindo a capacidade de escoamento do canal.

4.3 Estudos Hidráulicos

Um modelo hidráulico foi utilizado para simular os possíveis níveis d'água máximos atingidos na passagem de uma onda de cheia. O modelo utilizado foi o HEC-RAS, pois permite simular características relevantes do fenômenos de escoamento, além do efeito de

armazenamento, tais como os efeitos de pressão e atrito, fundamentais quando um trecho de rio se encontra sob controle de maré. O modelo foi aplicado em regime permanente para todo o trecho, que compreende desde a 1ª seção topobátimétrica a montante da cidade de São Luiz do Quitunde até a foz do rio Santo Antônio (planície de inundação).

Os dados de entrada para o modelagem foram os hidrogramas propagados até a seção de interesse, além das seções topobátimétricas levantadas, para representar as características básicas do canal, perfil e declividade média do trecho. Para extrapolação das seções transversais levantadas foi utilizado altimetria do Radar SRTM. A rugosidade adotada no canal principal foi $n = 0.045$, nas seções secundárias (áreas laterais) foi adotado $n = 0.1$.

Como condições de contorno a jusante, no modelo hidráulico, foram utilizados dois cenários diferentes. Um cenário sem efeitos de maré, considerando apenas a declividade natural do trecho simulado, igual a 0.001354 m/m. Outro cenário incrementando o efeito de maré, utilizando as informações obtidas na campanha de monitoramento, como condicionante na foz, já que o nível do mar influi na capacidade de escoamento do canal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos da simulação no HEC-RAS para a passagem de uma onda de cheia sem efeitos da maré na foz, e considerando apenas a declividade, pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5. Resultado da simulação sem o efeito da maré.

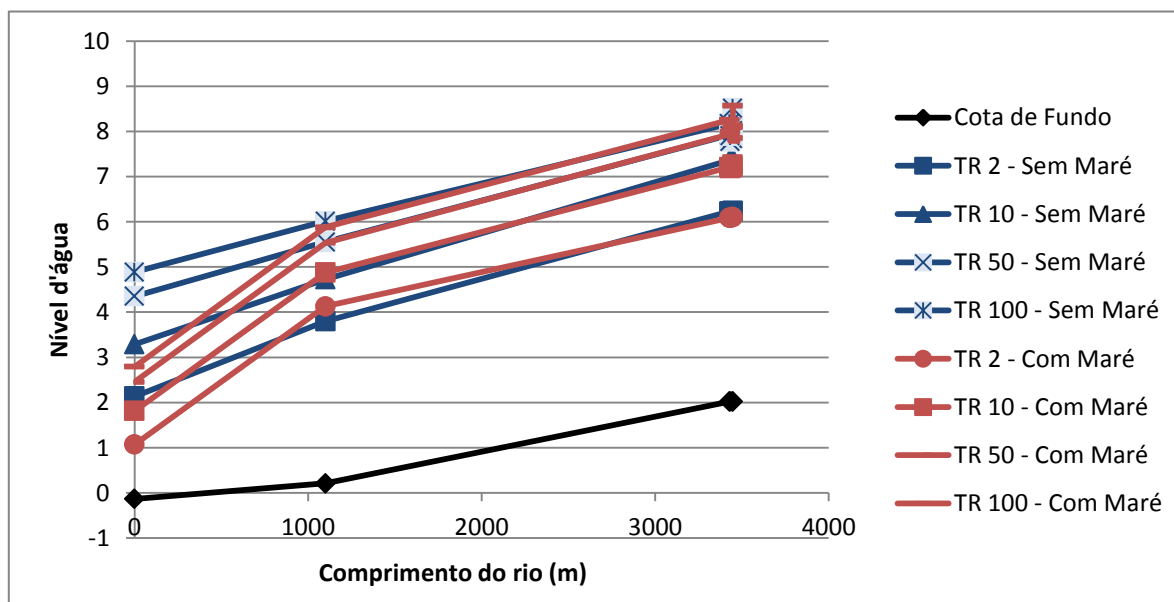
Seção	Cenário	Q Total (m ³ /s)	Nível da água (m)	Nível Crítico (m)	Elevação da Energia (m)	Declividade da linha d'água (m/m)	Velocidade (m/s)	Área Molhada (m ²)	Largura de Topo (m)	Froude
3	TR 2 anos	75.55	6.24	4.01	6.3	0.000639	1.07	72.21	53.97	0.2
3	TR 10 anos	201.36	7.41	5.12	7.55	0.001059	1.73	207.02	169.34	0.27
3	TR 50 anos	363.44	8.12	6.53	8.3	0.001388	2.21	391.97	335.8	0.32
3	TR 100 anos	459.24	8.51	7.13	8.68	0.001325	2.27	528.23	364.56	0.32
2	TR 2 anos	75.55	3.8		3.92	0.001793	1.57	72.17	154.51	0.33
2	TR 10 anos	201.36	4.73		4.78	0.001128	1.49	414.43	431.41	0.27
2	TR 50 anos	363.44	5.55		5.58	0.000681	1.35	774.6	442.89	0.22
2	TR 100 anos	459.24	6.01		6.04	0.000555	1.31	985.62	464.51	0.2
1	TR 2 anos	75.55	2.13	1.01	2.19	0.001355	1.06	71.27	48.58	0.28
1	TR 10 anos	201.36	3.29	1.82	3.41	0.001355	1.55	140.91	65.75	0.31
1	TR 50 anos	363.44	4.35	2.46	4.53	0.001355	1.94	214.41	74.06	0.32
1	TR 100 anos	459.24	4.89	2.79	5.1	0.001355	2.13	295.37	192.54	0.33

No cenário onde foi considerado o controle de maré na foz do rio, os dados obtidos da simulação podem ser vistos na Tabela 6. Devido a simulação ter se dado em regime permanente, a altura do nível do mar na foz foi fixada em 1.07 m.

Tabela 6. Resultado da simulação com o efeito da maré.

Seção	Cenário	Q Total (m ³ /s)	Nível da água (m)	Nível Crítico (m)	Elevação da Energia (m)	Declividade da linha d'água (m/m)	Velocidade (m/s)	Área Molhada (m ²)	Largura de Topo (m)	Froude
3	TR 2 anos	75.55	6.1	4.01	6.17	0.00074	1.13	67.14	25.09	0.22
3	TR 10 anos	201.36	7.27	5.12	7.42	0.001271	1.85	183.19	156.88	0.3
3	TR 50 anos	363.44	8.13	6.53	8.31	0.001368	2.2	395.74	336.71	0.32
3	TR 100 anos	459.24	8.57	7.13	8.73	0.001238	2.22	549.59	375.07	0.31
2	TR 2 anos	75.55	4.13	2.28	4.19	0.00094	1.19	158.71	415.66	0.24
2	TR 10 anos	201.36	4.88	4.24	4.91	0.000783	1.28	478.98	432.89	0.23
2	TR 50 anos	363.44	5.53	4.52	5.57	0.0007	1.37	767.04	442.43	0.22
2	TR 100 anos	459.24	5.88		5.91	0.000676	1.42	921.98	462.28	0.22
1	TR 2 anos	75.55	1.07	1.01	1.43	0.017513	2.64	28.6	33.4	0.91
1	TR 10 anos	201.36	1.82	1.82	2.46	0.018439	3.56	56.5	43.68	1
1	TR 50 anos	363.44	2.46	2.46	3.34	0.016343	4.18	88.31	57.43	0.99
1	TR 100 anos	459.24	2.79	2.79	3.78	0.014566	4.42	108.85	63.07	0.97

A Figura 10 apresenta as mudanças no comportamento do perfil da linha d'água para a passagem de uma onda de cheia nas diferentes seções topobátimétricas em diferentes tempo de recorrência, com e sem a condição de maré.

**Figura 10.** Perfil da linha d'água.

A simulação comprova que realmente a maré influencia no rio Santo Antônio até as proximidades da cidade de São Luiz do Quitunde, apenas comparando a mudança do perfil da linha d'água entre a 2ª e 1ª seção. As seções 2 e 3 são as mais distantes da foz, enquanto a seção 1, ainda dentro da cidade de São Luiz, se encontra a 20 km da foz.

Retirando o efeito de maré, o nível do rio acresce em aproximadamente 15 cm para vazões máximas de menor tempo de retorno, na seção mais a montante. Quando aumenta o tempo de retorno a influência da maré praticamente não interfere no nível, pois provavelmente a onda de cheia supera seu efeito nesta seção transversal.

A medida que a seção se aproxima da foz, a variação do nível é mais acentuada, chegando a ser de 1 m. Nota-se também uma variação bastante alta na declividade da linha d'água, com aumento da velocidade e principalmente no número de Froude. Nesta localidade é provável que em uma onda de cheia a maré retarde o escoamento, contribuindo para inundações, no entanto a localidade também possui uma planície de inundações o que provavelmente minimiza um evento extremo e devido a este fator os níveis críticos não são superados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo permitiu identificar, através da simulação hidráulica, a influência da maré na capacidade de escoamento no trecho mais baixo do rio Santo Antônio, além das cotas de inundações que a região esta sujeita.

Nas seções mais a montante (2 e 3), os resultados mostraram que o nível crítico do canal foi superado para todos os tempos de recorrência simulados, ao contrário do que se poderia supor, sendo esperado que a região mais próxima a foz sofresse com os eventos de máximas. Essas regiões estão mais suscetíveis à eventos hidrológicos extremos por apresentarem resposta hidrológica mais rápida em função de um relevo acidentado aliado ao tipo de solo e seções encaixadas sem área de extravasamento lateral, provocando o aumento dos níveis de inundações.

Para a seção 1, observou-se nas simulações junto ao controle de maré na foz, que a planície de inundações existente nas regiões baixas do rio Santo Antônio desempenha um papel importante no amortecimento das cheias. O que explica o fato da cidade de Barra de Santo Antônio não sofrer com inundações, diferentemente da cidade de São Luiz do Quitunde, sobretudo na parte da cidade que se encontra no início da planície, onde recebe todo deflúvio das regiões à montante e ainda se encontra sob controle da maré à jusante sem áreas de extravasamento laterais.

Fica evidente com o estudo a importância que a planície de inundações exerce sobre o rio Santo Antônio, evitando que os efeitos de eventos extremos hidrológicos sejam mais intensos, devendo estas áreas serem delimitadas e preservadas sem edificações. No entanto a ausência de levantamentos planialtimétricos na região, não permite realizar com mais precisão um zoneamento de riscos para as cidades contra possíveis inundações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os colaboradores da Gama Engenharia e Recursos Hídricos que contribuíram para a concretização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

a. Capítulo de Livro

CETESB (1986); Drenagem Urbana, In: Manual de Projeto. 3ª. Edição/ ACETESB, 1986.

Tucci, C.E.M (1993); Vazões Máximas e Hidrograma de Projeto. In: Hidrologia Ciência e Aplicação, organizado por Carlos E.M. Tucci.. Porto Alegre. Editora da Universidade. ABRH-EDUSP.

b. Artigo de revista científica

Ferraz, F. F. ; Ferraz, E. S. B. ; Ballester, M. V. R.; Moraes, J.E. ; Victoria, R. L. ; Martinelli, L. A. . Previsão de áreas inundadas na cidade de Piracicaba (SP) através de Sistema de Informações Geográficas (SIG). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Brasil, v. 3, n. 3, p. 17-27, 1998.

Islam M.S., Swapan, M. S.H., Haque S.M. (2013). Disaster Risk Index: How far should it take account of local attributes?. *International journal of Disaster Risk Reduction*, 3: 76-87.

Peduzzi P.,DAO H., Herold D., e Mouton M. (2009). Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The Disaster Risk Index. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9: 1149-1159.

Sartori, A., Neto, F. L. & Genovez, A. M. (2005) Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 10(4), 5–18.

c. Artigo em actas de congresso (ou equiparado)

Fragoso JR., C. R.; PEDROSA, V. D. A.; SOUZA, V. C. B. D. Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio Mundaú e Paraíba. *X Simpósio Regional Brasileiro de Recursos Hídricos*. Fortaleza/CE. 2010.

d. Sítios na *Internet* (institucionais ou pessoais)

ANA, 2011. Agência Nacional de Água. Disponível em < <http://hidroweb.ana.gov.br/>> Acesso em 2 de maio de 2011.

SECRETARIA NACIONAL DE DEFESA CIVIL. Notícias - Novos dados do desastre em Pernambuco e Alagoas são divulgados. Defesa Civil Brasil, 2010. Disponível em: <<http://www.defesacivil.gov.br/noticias/noticia.asp?id=5105>>. Acesso em: 16 Novembro 2012.

TUCCI, C. E. M. As inundações do Norte e Nordeste. Blog do Tucci, 24 Maio 2009. Disponível em: <<http://blog.rhama.net/2009/05/24/as-inundacoes-do-norte-e-nordeste/>>. Acesso em: 15 Novembro de 2012.

e. Outros

Engecorps (2010). Plano Diretor de Recursos Hídricos, Proposta de Enquadramento dos Corpos D'água das das Regiões Hidrográficas XIV – Camaragibe e VX – Litoral Norte, Alagoas.

EMBRAPA (2012). Mapa de Solos do Brasil. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.