

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NO RISCO DE INUNDAÇÕES EM ZONAS COSTEIRAS

André Luiz Belém¹

¹ *Laboratório de Oceanografia Física, Faculdade de Ciências Ambientais, UNIMONTE – Centro Universitário Monte Serrat, Av. Rangel Pestana, 99 Vila Mathias – CEP 11013-551 - Santos – SP BRASIL. e-mail: andre_belem@yahoo.com.br*

Resumo

Nos últimos anos o aumento gradativo do nível do mar tem sido observado em todos os oceanos, como resultado da anomalia termostérica causada em principio pela elevação da temperatura do planeta. Mesmo sendo este aumento de pequena magnitude, ainda assim, os efeitos combinados de clima e evolução natural da linha de costa têm mostrado visíveis impactos nas regiões costeiras, onde ainda a maioria da população vive concentrada em centros urbanos. Os dados que serão apresentados mostram de que forma os impactos são sentidos nas regiões costeiras, bem como sua evolução gradativa no tempo. A análise objetiva dos efeitos dessas mudanças pode contribuir para o gerenciamento do risco nas áreas costeiras.

Palavras chave

Mudanças Climáticas Globais, Nível do Mar, Ressacas, Inundações em Regiões Costeiras

1.INTRODUÇÃO

O forte crescimento das grandes cidades à beira-mar tem promovido um debate bastante acirrado sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas globais no ambiente costeiro. A preocupação maior é obviamente com a qualidade de vida e a segurança da linha de costa, mas em termos sócio-econômicos, não há muito consenso sobre responsabilidades e necessidade de investimentos pelo fato de que as mudanças climáticas ocorrem em um ciclo temporal bastante distendido quando comparado com o “ciclo político”. Este cenário, onde soluções corretivas e custosas são aplicadas em detrimento de soluções preventivas, estimulou o debate acadêmico regional sobre nível do mar e desastres costeiros. Embora alguma atenção tenha sido dada ao fenômeno de aumento do nível do mar propriamente dito, o papel crítico que esta elevação tem em associação com tempestades costeiras e ressacas na geração de desastres costeiros, foi muito pouco explorado.

O objetivo deste trabalho não é apenas demonstrar a relação existente em aumento do nível do mar e inundações em zonas costeiras, mas também, abrir a discussão sobre possíveis medidas mitigadoras para prevenir desastres costeiros em larga escala. Entende-se aqui que as ressacas (a subida do nível do mar por associação de maré e meteorologia) são as causadoras das inundações em regiões costeiras.

O nível do mar sobre aproximadamente à uma taxa de 2 mm/ano (Douglas et al., 2001) e é esperado que acelere nos próximos 100 anos (USGCRP, 2001). Embora os cientistas não estejam totalmente certos sobre a taxa de elevação ou de sua aceleração, o fato de estar subindo é inquestionável. Levando em consideração a dinâmica costeira, o aumento do nível do mar causa, entre outros aspectos, a erosão de praias, inundação em baixios, intrusão de águas salinas em aquíferos e aumento da incidência de ressacas. Todos estes aspectos são igualmente importantes no mundo inteiro, onde cerca de 60 % da população vive em uma faixa de 60 quilômetros da costa. As áreas populosas em regiões de confinamento geológico, como baías e estuários são extremamente vulneráveis ao aumento do nível do mar. No Brasil, várias cidades de médio e grande porte encontram-se nesse tipo de situação (Rio Grande-RS, Laguna-SC, Florianópolis-SC, Paranaguá-PR, Santos-SP, Rio de Janeiro-RJ, Vitória-ES, Salvador-BA, Maceió-AL, Recife-PE, São Luis-MA, Fortaleza-CE e Belém-PA).

Em primeiro lugar, é necessário definir alguns aspectos: (a) qual a real taxa de elevação do nível do mar considerando o fato de que a costa brasileira está inserida na região do Atlântico Sul Ocidental e (b) qual a variabilidade temporal que os fenômenos turbulentos ocorrem.

2.VARIAÇÕES CLIMÁTICAS NO ATLÂNTICO SUL OCIDENTAL

A principal causa das variações do nível do mar em todo o planeta é o efeito da “anomalia termostérica”. O nome anomalia advém do fato da água se expandir ou se contrair dependendo do seu aquecimento ou resfriamento, respectivamente. O efeito da salinidade é similar (anomalia halostérica), mas consideravelmente menor. Uma coluna de água H varia sua densidade na razão $\Delta\rho$ devido à um aquecimento ΔT , que se expande até uma altura $H+\eta$ (Polito e Sato, 2004). Dessa forma, o aquecimento da água do mar provocado por alterações climáticas, deve necessariamente provocar uma expansão e conseqüente aumento do nível do mar.

O aquecimento do sistema atmosfera-oceano a nível global é um fato amplamente fundamentado no meio científico (Bryden et al., 2005; Cazenave & Nerem, 2004; Feldstein, 2002; entre outros) e conseqüentemente, o aumento do nível do mar deve ser encarado como fato. A taxa de aumento, no entanto, é discutível e de certa forma regionalizada, pelo fato do oceano variar suas características de temperatura e salinidade de forma espacial e temporal, incluindo aqui variações decadais. Para testar essa hipótese à nível regional, no entanto, foram levantados dados sinóticos em um período aproximadamente 14 anos, na região da plataforma continental sudeste do Brasil, nos pontos delimitados no mapa da Figura 1A e em 3 pontos localizados estrategicamente ao longo da costa brasileira (Figura 1B), à saber: Região da plataforma continental ao largo de Rio Grande (RS), ao largo de Salvador (BA) e ao largo de Fortaleza (CE).

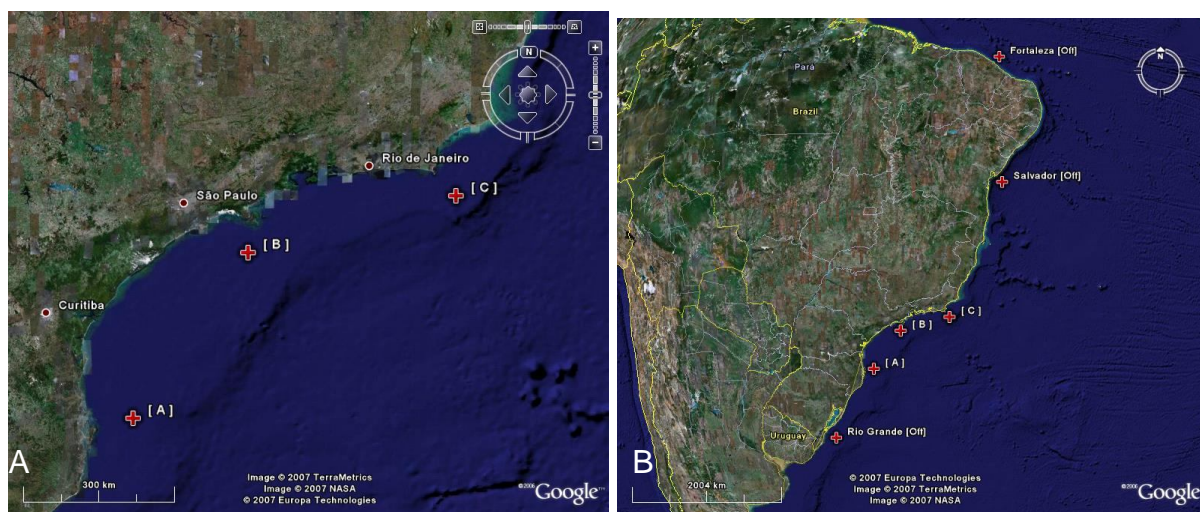


Figura 1[A] região da costa sudeste do Brasil mostrando os pontos onde foram obtidas séries de temperatura e anomalia de altura e [B] Costa Brasileira ampliada, mostrando a localização dos outros pontos comparativos (Rio Grande ao sul, Salvador no nordeste e Fortaleza ao norte). Fonte: Google Earth.

Nestas localidades, dados distribuídos pelo programa Ocean Watch do NODC (Nacional Oceanographic Data Center) da NOAA (Nacional Oceanic and Atmospheric Administration) correspondentes ao projeto Pathfinder Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) para os dados de temperatura superficial do mar (TSM ou, SST na sigla em inglês) e da série AVISO/ Altimetria do projeto TOPEX/POSEIDON, ambos obtidos por satélites, foram recolhidos em uma série longa de 1985 à 2005 para TSM e de 1992 à 2006 para os de altimetria. Detalhes dos dados e dos projetos podem ser obtidos diretamente na página do Ocean Watch em <http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch>.

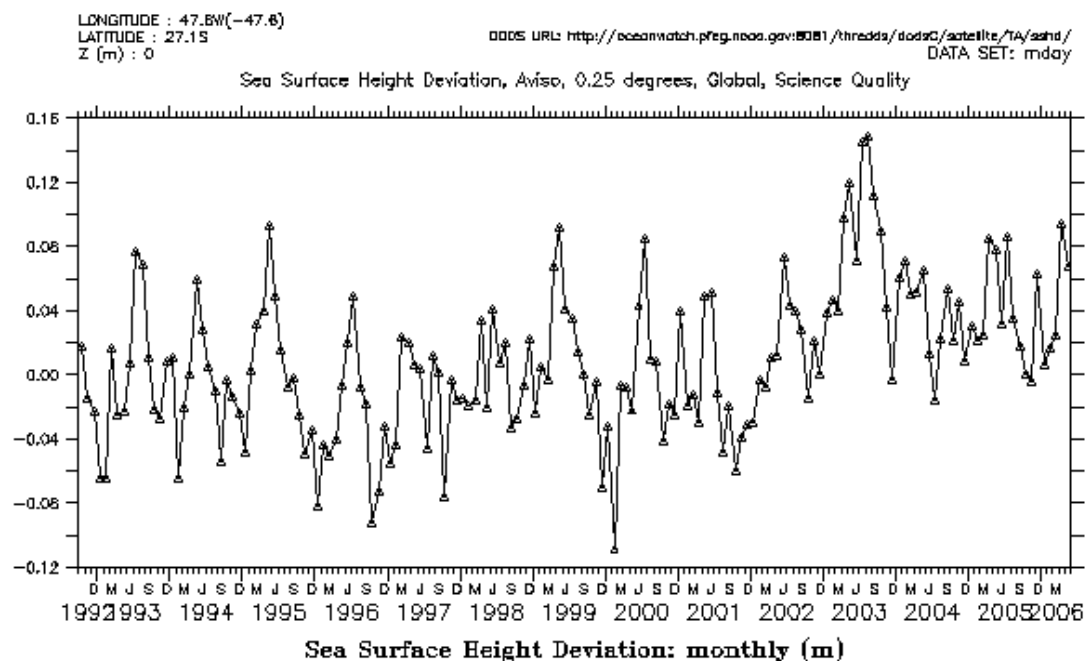


Figura 2 Anomalia da altura dinâmica do mar para o Sítio A. Veja texto para detalhes (dados médios mensais).

Na Figura 2 os dados de anomalia da altura dinâmica do oceano para o Sítio A, localizado na porção sul da plataforma continental sudeste, variações da ordem de 15 cm são observadas em um período de aproximadamente 14 anos, com forte variação interanual.

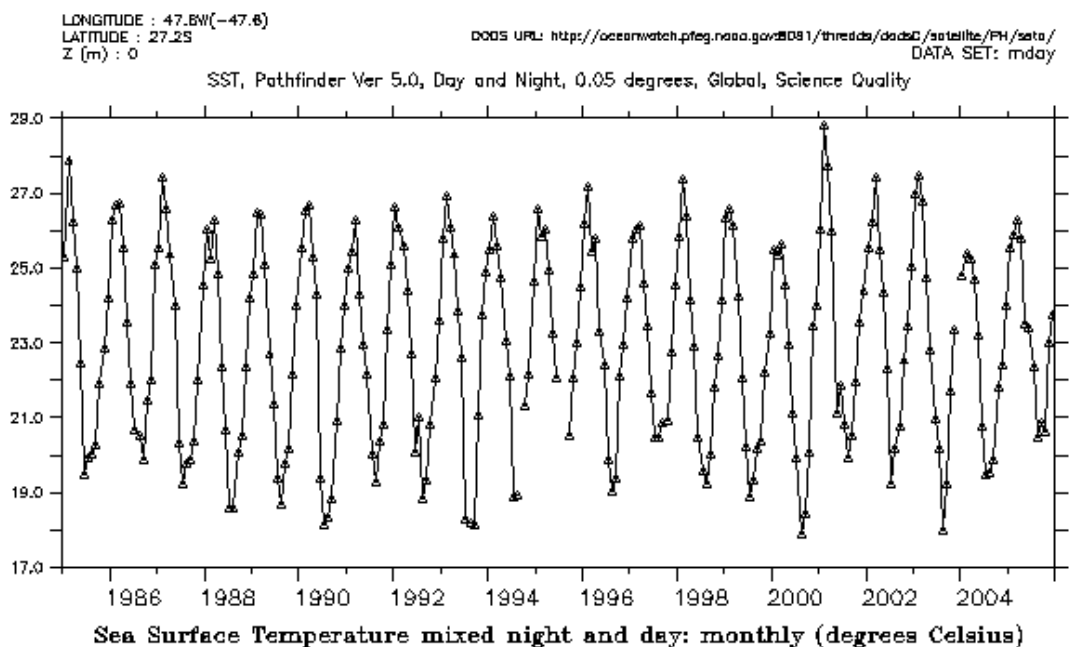


Figura 3 Variações da temperatura superficial do mar no Sítio A. Dados médios mensais.

Períodos de aumento significativo sobre o referencial (zero), em 2003 foram observados. Mas de maneira geral, existe uma leve tendência de elevação do nível do mar, principalmente nos últimos 5 anos.

A Figura 3 mostra as variações internanuais da TSM para o mesmo ponto, mostrando que o período de dois anos anteriores à 2003 foi caracterizado por temperaturas relativamente mais altas do que os outros anos.

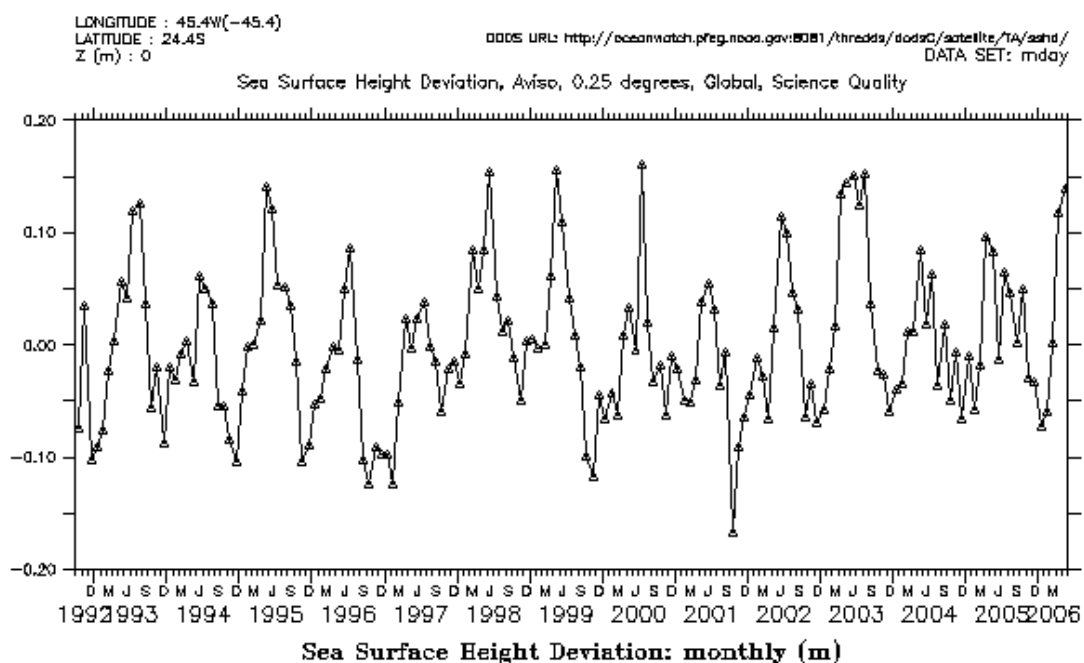


Figura 4 Anomalia da altura dinâmica do mar para o Sítio B. Veja texto para detalhes (dados médios mensais).

Comparativamente, os valores de anomalia da altura dinâmica do mar para o Sítio B (Figura 4) mostram variações da ordem de 20 cm, com pouca tendência de subida, não acompanhando as mesmas variações que o Sítio A. Mesmo assim o ciclo internanual da temperatura para o mesmo ponto de análise mostra uma leve oscilação na TSM da ordem de 1-2 graus com um período de aproximadamente 5 anos. Já o Sítio C mostra tendências de anomalia negativa em alguns períodos, mas ainda assim, o aumento do nível do mar em 2003 é claro. Apenas a amplitude do sinal deve ser analisada com cautela, já que os valores máximos são bem diferentes para cada sítio analisado.

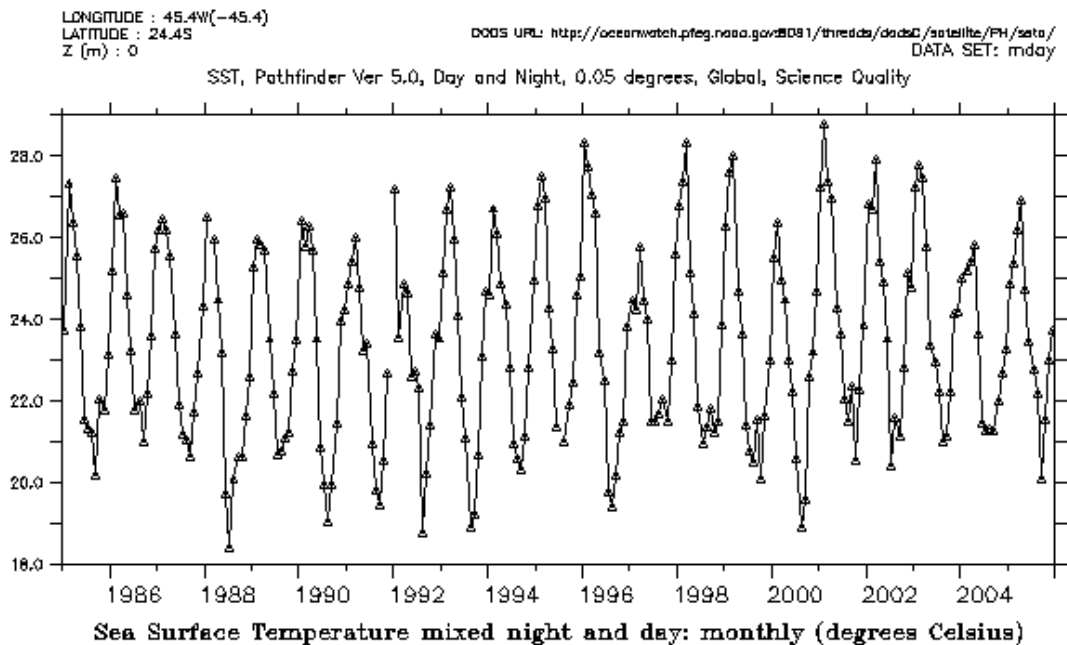


Figura 5 Variações da temperatura superficial do mar no Sítio B. Dados médios mensais.

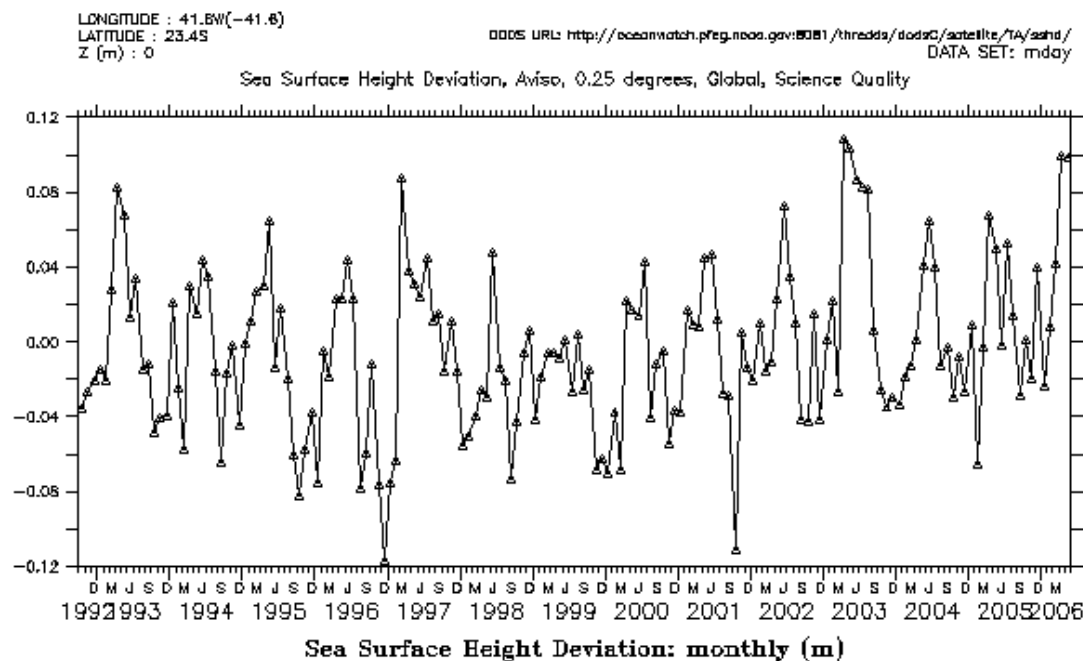


Figura 6 Anomalia da altura dinâmica do mar para o Sítio C. Veja texto para detalhes (dados médios mensais).

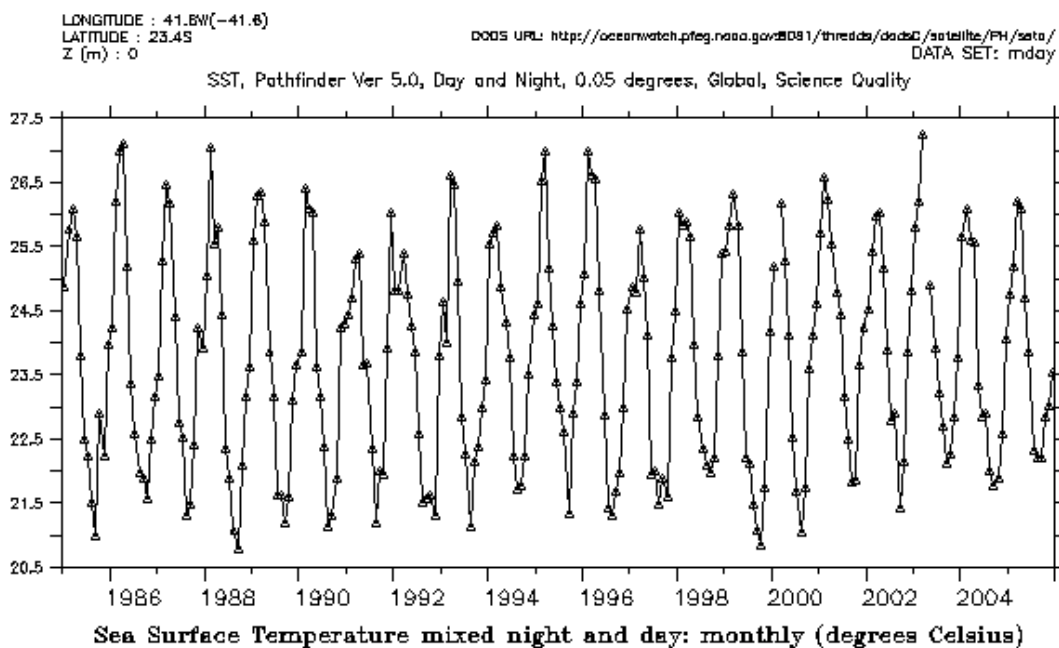


Figura 7 Variações da temperatura superficial do mar no Sítio C. Dados médios mensais.

As variações de temperatura neste período para o Sítio C mostram sinais interanuais da ordem de 1-2 graus, acompanhando a tendência dos outros pontos.

Mesmo com uma leve tendência de aumento da temperatura, ainda que não proeminente no Sítio B ao à Santos, tal aumento (da ordem de 1 grau) é o suficiente para causar uma expansão termostérica suficiente para provocar as oscilações observadas na anomalia de altura dinâmica do mar.

A Figura 8 mostra comparativamente, a anomalia da altura dinâmica do mar em 3 localidades: Rio Grande, Salvador e Fortaleza. No primeiro ponto (Figura 8A), correspondente à plataforma continental ao largo de Fortaleza, a anomalia ascendente, com variações de nível da ordem de apenas 5 cm, enquanto que na Figura 8B, correspondente à plataforma continental ao largo de Rio Grande, as variações chegam à 10 cm nos últimos anos, mas com uma tendência decadal menor do que na região ao norte. A Figura 8C mostra a região ao largo de Salvador, com variações da ordem de 8 cm mas sempre ascendente ao longo dos últimos 14 anos.

A interpretação mais correta destes dados é de que, existe uma significativa variação decadal e interanual na temperatura superficial do mar, variação esta que pode contribuir de forma significativa para o aumento do nível do mar através do

efeito de anomalia termostérica. Quando comparamos diferentes pontos da costa brasileira, a tendência de aumento do nível do mar é clara, mas em taxas variáveis, de 8 cm em alguns pontos à 10 cm no sul do país, considerando os dados dos últimos 10 anos.

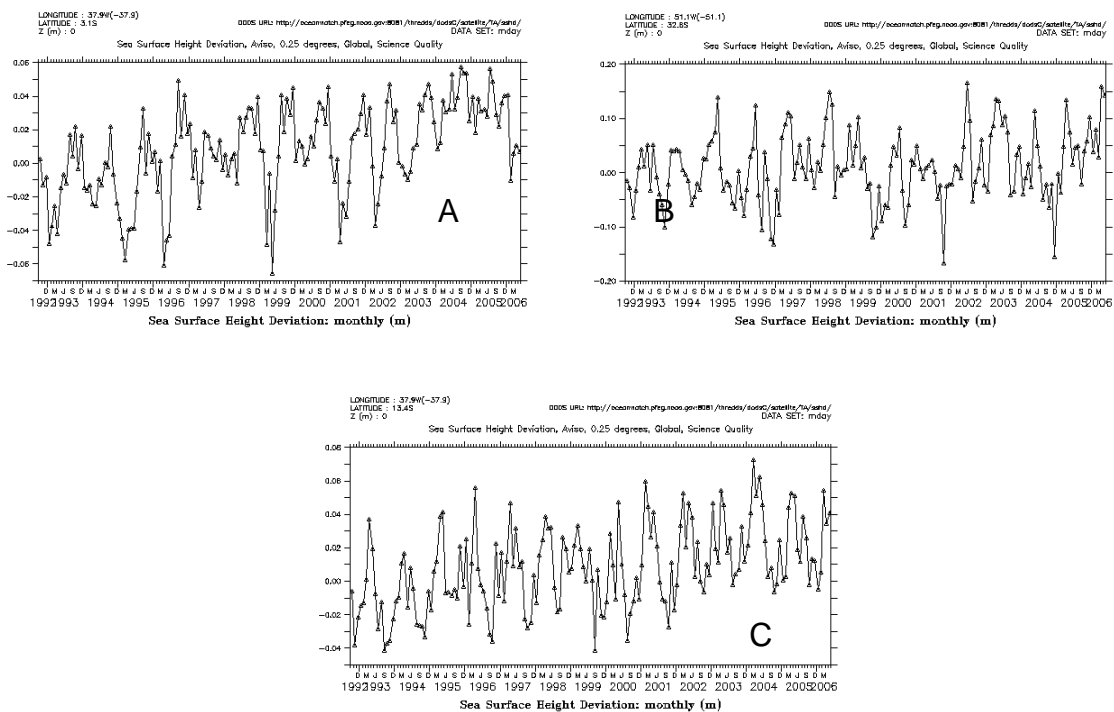


Figura 8 variações na anomalia de altura dinâmica do mar nas localidades de [A] Fortaleza, [B] Rio Grande e [C] Salvador. Veja texto para detalhes

O significado disso é que para os próximos 50-100 anos, podemos estimar que o nível médio do mar a longo da costa brasileira, poderá subir em cerca de 0,5 m. Mesmo não sendo um número que possa gerar preocupação imediata, sua conexão com o risco de inundações é clara. Marés meteorológicas (aquelas induzidas por efeitos do empilhamento de água na costa por razão de ventos fortes de tempestades e baixa pressão atmosférica) podem induzir variações positivas do nível do mar da ordem de 50 cm. Somados esses 50 cm a estimativa de variação do nível do mar (também 50 cm) e em regiões onde a maré de sizígia (que ocorre em lua cheia ou nova) é de 1,5 m, como no caso da região sudeste do Brasil, a variação de nível em situação de tempestade é da ordem de 2 metros. Isso não significa que a região irá experimentar uma lâmina d'água de 2 metros acima do nível de referência, e sim, que a linha de costa, avança para uma cota 2 metros acima do

nível de referência. Em muitos casos, isso significa avançar a zona de surf, onde as ondas arrebatam, para cima de edificações e construções à beira mar, causando impactos profundos na orla. Com o aumento decadal observado no nível do mar, estima-se que uma faixa considerável de costa pode ser atingida em cerca de 50 anos.

3.EXEMPLOS DE RESSACAS

A Ilha de São Vicente, localizada no litoral médio de São Paulo, Brasil, é uma região densamente povoada e que abriga o maior porto da América Latina, o porto de Santos, inserida em um contexto sócio-econômico de uma região denominada Baixada Santista. As cidades que compõem o complexo da Baixada Santista são Santos, São Vicente, Cubatão (e o pólo industrial), Vicente de Carvalho, Guarujá, e de forma satélite as cidades de Praia Grande e Bertioga (Figura 9). O confinamento geológico é formado por duas projeções rochosas de aproximadamente 200 metros de altura, uma em cada ponta da Baía de Santos. A cidade de Santos e São Vicente, bem como Guarujá e Praia Grande, possuem praias com significativo adensamento populacional na orla, o que acaba formando uma área de risco à inundações principalmente pelo fato do nível das construções ser apenas poucos centímetros acima do nível da praia.

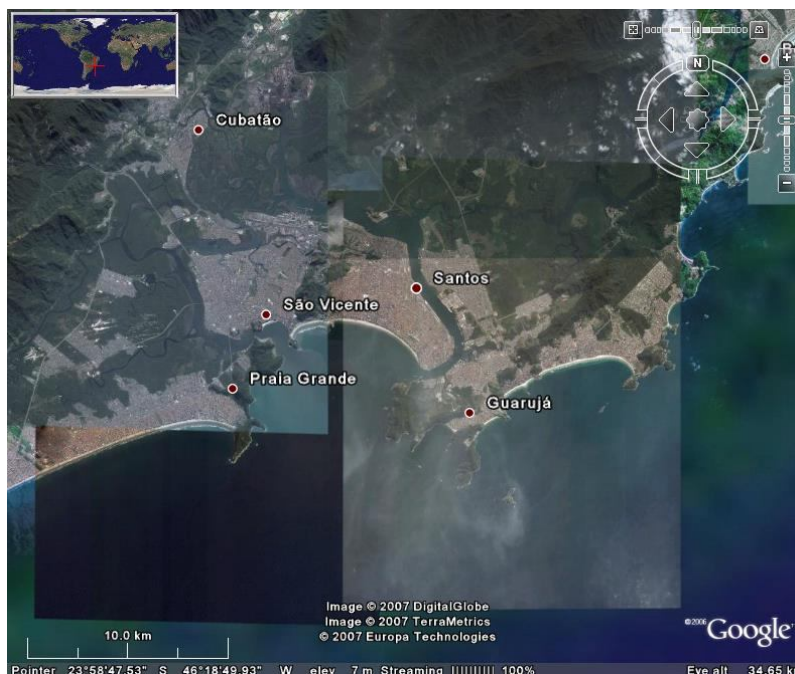


Figura 9 Região da Baixada Santista, com as principais cidades: Santos, São Vicente, Cubatão, Praia Grande, Guarujá. Fonte: Google Earth.

Especialmente a cidade de Santos, apresenta uma característica importante para o gerenciamento de risco, que é o desnível da cidade da praia para o centro, com o canal do estuário ao fundo. Parte da água pluvial é captada por um sistema de canais que evita a inundação durante as chuvas. Os canais de Santos deságuam na baía (praia), controlados por comportas semi-automáticas que são abertas quando o volume de água dentro da cidade chega nível crítico.

Nos últimos dois anos, a cidade de Santos sofreu danos na orla com ressacas que (1) destruíram parte da orla, danificando não apenas estruturas da cidade como também bens individuais de moradores e (2) assorearam os canais de forma a impedir a drenagem da água da cidade durante o período de chuvas associado com as tempestades que deram início à ressaca (Figura 10).



Figura 10 [A] Foto de Carlos Nogueira, mostrando a entrada de água na Pta da Praia, Santos, SP, publicada na matéria sobre a ressaca no Jornal A Tribuna de 27/04/05. [B] Foto de André Belém mostrando os efeitos da ressaca no Canal 6 em Santos, Julho de 2006.

O dano estrutural causado pelas ressacas é mitigável apenas se houver uma efetiva contenção da linha de costa, projetando-se níveis críticos de subida do mar em eventos de tempestades (Anthes, 1982). Outra forma de mitigação é o monitoramento constante, tanto do nível do mar (em escala contínua e projetando-se

o monitoramento no decorrer de anos e décadas), quanto das condições meteorológicas que condicionam as ressacas.



Figura 11 Fotos de Rogério Soares e Irandy Ribas publicadas no jornal A Tribuna de 27/04/05.

A Figura 11 e a Figura 10 mostram o efeito destrutivo de uma ressaca, neste caso, a ocorrida entre 24 e 27 de abril de 2005, onde a ação combinada de ondas de 3 m de altura na baía de Santos, com uma maré de sizígia de 1,60 m e uma maré meteorológica de 30 cm provocou a demolição de uma faixa de 100 m da orla na Pta da Praia em Santos/SP;

Com base nas projeções de aumento do nível do mar, levamos em consideração a ocorrência nos últimos anos de tempestades próximos à costa, associadas à marés de sizígia, como mostra a Tabela 1, podemos notar que existe um aumento significativo nos últimos 10 anos, tanto pela ocorrência maior de ciclones (como reportado por outros autores em outras localidades – Webster et al. 2005) e necessariamente um aumento na probabilidade destes ciclones ocorrerem durante uma maré de sizígia.

Tabela 1 Número de ciclones comparados à ocorrência de ressacas (maré sizígia + maré meteorológica). Veja texto para detalhes sobre os danos.

Ano	N. de Ciclones >F1	Ressacas	Danos
1997	15	1	Sim
1998	14	2	Não
1999	16	0	Não
2000	17	0	Não
2001	16	1	Não
2002	19	2	Sim
2003	21	2	Sim
2004	17	1	Não
2005	13	2	Sim
2006	22	2	Sim

2007	9 (até maio)	--	--
------	--------------	----	----

Para esta tabela, a ocorrência de danos é tabulada apenas se na mídia é reportado algum dano material seja de ordem pública ou privada.

4.CONCLUSÕES

O aumento da incidência de fenômenos atmosféricos como ciclones extra-tropicais de intensidade moderada à forte é inquestionável, da mesma forma que a sua variabilidade interanual. Essas variações ocorrem por força da energia transferida do oceano para a atmosfera na forma de calor, fato este que está intimamente conectado com as anomalias de temperatura superficial do mar, o principal fornecedor de vapor para o sistema. Da mesma forma que o aumento, mesmo que de poucos centímetros, do nível do mar, também é de certa forma inquestionável. A conjunção destes dois efeitos com a periodicidade das marés mais altas (sizíguas) aumenta significativamente a probabilidade da ocorrência de inundações provocadas por ressacas.

A solução para este tipo de desastre deve ser necessariamente preventiva, baseada no monitoramento contínuo das condições sinóticas e no aprimoramento do estudo combinado destes fenômenos. Políticas públicas de proteção à linha de costa devem ser implementadas, paralelamente com a criação de observatórios costeiros. A prevenção e correta informação sobre fenômenos mete-oceanográficos, e o estudo de sua evolução em escala de tempo da ordem de anos e décadas, é a melhor solução para prevenir desastres em regiões costeiras.

5.REFERENCIAS

- Anthes, R. A., 1982: *Tropical cyclones: Their Evolution Structure and Effects*. Meteor. Monograph, No. 41, Amer. Meteor. Soc., 208 pp.
- Bryden, H. R., H. R. Longworth, and S. A. Cunningham, 2005: *Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N*. Nature, 438, 655–657.
- Cazenave, A., and R. S. Nerem, 2004: *Present-day sea level change: Observations and causes*. Rev. Geophys., 42, RG3001, doi:3010.1029/2003RG000139.
- Douglas, B. C., M. S. Kearney, and S. P. Leatherman, 2001: *Sea Level Rise: History and Consequences*. Academic Press, 232 pp.
- Feldstein, S. B., 2002: *The recent trend and variance increase of the Annular Mode*. J. Climate, 15, 88–94.

- *Henderson-Sellers, A., and Coauthors, 1998: Tropical cyclones and global climate change: A post-IPCC assessment. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79, 19–38.*
- *Houghton, J. H., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Nogue, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson, Eds., 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, 881 pp.*
- *Polito, P. e Sato, O.; 2004: Oceanografia por Satélites. Apostila do curso de Oceanografia, Instituto Oceanográfico da USP (IOUSP), disponível no endereço http://orion.io.usp.br/los/repo/apostila_iof5856.pdf.*
- *USGCRP, 2001: A Plan for a New Science Initiative on the Global Water Cycle [Hornberger, G.M. J.D. Aber, J. Bahr, R.C. Bales, K. Beven, E. Foufoula-Georgiou, G. Katul, J.L. Kinter III, R.D. Koster, D.P. Lettenmaier, D. McKnight, K. Miller, K. Mitchell, J.O. Roads, B.R. Scanlon, and E. Smith (eds.)]. The USGCRP Water Cycle Study Group, U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 118 pp.*
- *Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, and H.-R. Chang, 2005: Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. Science, 309, 1844–1846.*