

## DINÂMICA CLIMÁTICA, VARIABILIDADE PLUVIAL E O RISCO À EROSÃO COSTEIRA NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

João Lima Sant'Anna Neto<sup>1</sup>; Celia Regina de Gouveia Souza<sup>2</sup>; Renato Tavares<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Dr. Depto. Geografia – FCT/UNESP-Presidente Prudente. (joãolima@prudente.unesp.br)

R. Roberto Simonsen, 305. CEP: 19060-900. Presidente Prudente-SP. T.+55 18 229 5388

<sup>2</sup>Dra. Instituto Geológico - Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. (celia@igeologico.sp.gov.br)

Av. Miguel Stéfano, 3900. CEP: 04301-903. São Paulo-SP. T. +55 11 5058 9994

<sup>3</sup>MSc. em Geografia Física - Climatologia. Instituto Geológico – SMA/SP. (renato@igeologico.sp.gov.br)

### RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a relação entre os diversos climas da planície costeira paulista e o risco à erosão costeira segundo sete setores morfodinâmicos. A dinâmica climática e a variabilidade pluvial no litoral paulista podem ser apontadas como mais uma dentre as causas naturais de erosão costeira, a qual está associada principalmente aos controles atmosféricos extratropicais produtores de chuva. No Litoral Sul, onde os totais anuais de chuva são mais elevados, estão os setores morfodinâmicos que se encontram sob mais alto risco à erosão costeira. Nesses setores, as causas naturais predominam sobre as antrópicas. No Litoral Norte as unidades climáticas apresentam menores volumes de chuva anual e números de dias chuvosos, sendo encontradas as praias com mais baixo risco à erosão.

### ABSTRACT

This paper presents the relationship between the different climates and coastal erosion risk of seven morphodynamic compartments along the State of São Paulo coastal zone. The climate dynamics and the rain variability along the São Paulo coastal zone must be considered as another important natural cause of coastal erosion, which process has a very close relationship with the rainy extratropical atmospheric system. At Southern Littoral, where the annual rain use to be higher, the morphodynamic compartments are under very high risk. Natural causes seems to be the mainly ones at these compartments. At Northern Littoral the climate units present both the lowest annual rain volumes and rainy days, and there low coastal erosion risks predominate.

Palavras-chave: Clima (*Climate*), Variabilidade Pluvial (*Rain Variability*), Erosão Costeira (*Coastal Erosion*).

### 1. INTRODUÇÃO

A linha de costa de São Paulo tem mais de 500 km de extensão e inclui dezesseis municípios, sendo o turismo a principal atividade econômica para a maioria deles. Aproximadamente 50% dessa linha de costa encontra-se urbanizada, estando a maior parte dessas praias no setor central do litoral, ou seja, na região metropolitana da Baixada Santista (Figura 1). Esse litoral apresenta grande diversidade de ambientes naturais, representados por extensos maciços e fragmentos remanescentes bem preservados de Mata Atlântica e ecossistemas associados (diferentes fisionomias de vegetação de restinga, extensos manguezais), praias representativas de todos os estados morfodinâmicos e um conjunto de promontórios, costões rochosos e ilhas.

O litoral paulista é caracterizado também por ser uma zona de transição climática, entre os domínios de climas tropical e subtropical. Além disso, a presença marcante da Serra do Mar, paralela e próxima à linha de costa, estendendo-se desde o Litoral Norte até o extremo sul da Baixada Santista, configura-se como um elemento importante no aumento da precipitação pelo efeito orográfico.

Um dos principais problemas que afetam o litoral dos países costeiros é a erosão. De acordo com Bird (1985) 70% das costas arenosas do planeta estão sob erosão nas últimas décadas. As áreas em progradação estão geralmente restritas a costas soerguidas como resultado de processos tectônicos ou glácio-eustáticos, ou são locais abrigados com abundante suprimento sedimentar proveniente de rios e bancos arenosos de costa-afora. As

razões para essa retração da linha de costa mundial podem ser classificadas como: aquelas que resultam de mudanças de longo período nas relações entre o nível do mar e o suprimento sedimentar na zona costeira; nos efeitos das pressões antrópicas sobre a zona costeira e áreas continentais e oceânicas de influência; e nas possíveis consequências das mudanças climáticas induzidas pelo homem, as quais podem se intensificar no futuro (Viles & Spencer, 1995).

No Brasil, os estudos sobre erosão costeira passaram a ser intensificados a partir da década de 1990, e os diferentes autores associam o fenômeno ora a causas naturais, ora a intervenções antrópicas, ou a ambas (Souza, 1997, 2001; Souza et al., 2003).

Este trabalho apresenta uma discussão sobre mais uma importante causa natural de erosão em São Paulo: a dinâmica climática e a variabilidade pluvial na zona costeira. O presente estudo está inserido no âmbito do Projeto SIIGAL – “Sistema Integrador de Informações Geoambientais para o Litoral de São Paulo Aplicado ao Gerenciamento Costeiro” (Souza, 2000)\*.

### 2. EROSÃO COSTEIRA EM SÃO PAULO

No Estado de São Paulo, as causas e os efeitos da erosão costeira têm sido estudados desde a década de 1980 (Souza, 1990, 1997, 1999, 2001; Souza & Suguio, 1996, 2002). Até o presente, as causas têm sido atribuídas a diversos processos naturais, atuando em diferentes

\* Suporte financeiro: FAPESP (Proc. 98/14277-2)

escalas temporais e espaciais, e a fatores induzidos pelo homem, como mostra a Tabela 1.

Uma avaliação de risco à erosão costeira foi efetuada para todas as praias de São Paulo, cujo método de análise foi elaborado em função da ocorrência de indicadores de erosão costeira (geo e bioindicadores) e sua distribuição espacial ao longo da linha de costa. A Figura 1 mostra a classificação de risco obtida por Souza (2001) e Souza & Suguio (2002) para os sete setores morfodinâmicos previamente definidos por Souza & Suguio (1996).

Note-se bem que a região menos habitada e mais preservada do litoral paulista, o Litoral Sul (setores morfodinâmicos I e II) é também aquela que encontra-se sob risco mais alto, por apresentar maior número de indicadores e maior distribuição espacial dos mesmos nas praias. Por outro lado, a região mais urbanizada e antropizada, representada pelos setores morfodinâmicos III e IV (Baixada Santista), o grau de risco varia de alto a médio. Portanto, os fatores naturais são bastante significativos no controle dos processos erosivos costeiros em São Paulo.

### **3. DINÂMICA CLIMÁTICA E VARIABILIDADE PLUVIAL NO LITORAL PAULISTA**

Devido à sua posição latitudinal, o litoral paulista pode ser considerado palco do complexo jogo de atuações dos sistemas atmosféricos, uma vez que é nessa faixa de transição que ocorre o confronto entre os climas controlados pelos sistemas tropicais e extratropicais (polares), além dos fenômenos frontais. Monteiro (1973) e Sant'Anna Neto (1990) identificaram a existência de três zonas climáticas baseadas nos processos de dinâmica atmosférica: Litoral Norte, território compreendido entre as serras de Parati (limite São Paulo - Rio de Janeiro) e Juqueriquerê (Caraguatatuba), controlado predominantemente por sistemas equatoriais e tropicais; Litoral Central, localizado entre as serras de Juqueriquerê e Itatins (sul de Peruíbe), controlado alternadamente por sistemas tropicais e polares, configurando-se assim uma vasta área transicional; e Litoral Sul, da Serra de Itatins até a Ilha do Cardoso, controlado pelos sistemas polares e tropicais.

Estes controles dinâmicos, homogêneos regionalmente, geram feições locais distintas, em função de suas interações com os fatores geográficos, como a altitude e a disposição espacial do relevo, a orientação das vertentes e a configuração da linha de costa, associados à direção predominante dos sistemas atmosféricos produtores de chuvas. Desta forma, as três grandes zonas climáticas, geneticamente estabelecidas em macroescala, estão hierarquicamente organizadas, permitindo o estabelecimento de unidades resultantes da combinação dos fatores geográficos e do regime pluvial, conforme mostra a Figura 2.

Cerca de 70% das precipitações anuais ocorridas no litoral paulista são provenientes dos sistemas frontais, principalmente das passagens das frentes fria (frente Polar Atlântica). Desta forma, o controle climático que este sistema assume é fundamental para se compreender a dinâmica atmosférica desta região. De Cananéia (Litoral Sul) à Ubatuba (Litoral Norte), o total anual de passagens frontais diminui em cerca de 10% a 20%. Por outro lado,

o total de dias sob o domínio destes sistemas ocorre de forma inversa, ou seja, diminui de norte para sul. Isto pode ser explicado pelo fato de que a frentes frias passam pelas latitudes mais elevadas com maior vigor e velocidade, perdendo intensidade e estacionando à medida que evolui rumo às baixas latitudes.

Os totais pluviais são bastante elevados, podendo superar os 3.000 mm anuais. Em geral, aumentam pelo efeito orográfico nas áreas próximas às vertentes e aos morros isolados da planície costeira, como em Mongaguá (Serra de Mongaguá), Maciço de Juréia-Itatins e Ilha do Cardoso. As áreas litorâneas abrigadas (a sotavento), configuram-se como "ilhas" de sombra de chuva, cujos totais anuais são muito inferiores, com precipitação em torno de 1.300 a 1.800 mm, como ocorre em Caraguatatuba e no interior do Canal de São Sebastião (centros urbanos de São Sebastião e Ilhabela).

A planície costeira do Litoral Norte se subdivide em cinco unidades, diferenciadas pelo valor total médio de chuva anual. As unidades mais expostas aos sistemas frontais, como junto às Baías de Picinguaba e Ubatuba, apresentam totais mais elevados (de 1.800 a 2.600 mm). As unidades mais abrigadas, localizadas na Enseada de Caraguatatuba e no Canal de São Sebastião, são menos chuvosas. No Litoral Norte habitualmente chove durante menos dias no ano, em geral por volta de 150 dias/ano, considerado baixo em comparação com o restante da zona costeira (Tabela 2).

No Litoral Central, que apresenta uma linha de costa menos recortada, os totais anuais são mais homogêneos na planície (1.800 a 2.600 mm), ainda que em Mongaguá, pela presença da Serra de Mongaguá mais próxima à costa, as chuvas alcancem valores em torno de 3.000 mm anuais. Quanto ao número de dias com chuva, a porção central sofre um incremento comparado ao Norte, possuindo cerca de 170 dias/ano

O Litoral Sul forma um grande anfiteatro com maciços elevados nas extremidades (Juréia/Itatins e Ilha do Cardoso), onde os totais atingem 3.000 mm, e uma extensa planície costeira em sua porção central, que recebe precipitações da ordem de 1.800 a 2.600 mm. Caracteriza-se pelo setor com o maior número de dias com chuva, acima de 200, distribuídos ao longo do ano.

### **4. AS RELAÇÕES ENTRE O CLIMA E A EROSIÃO COSTEIRA**

Na literatura nacional, pouco tem sido apresentado a respeito das influências da dinâmica climática no processo de erosão costeira. Alguns autores têm apontado para a ocorrência de eventos meteorológicos extremos associados aos efeitos de marés astronômicas e meteorológicas na indução dos processos mais intensos (Souza, 2001; Souza & Suguio, 2002; Souza et al., 2003).

Entretanto, além da ocorrência de eventos anômalos, de maneira geral, o comportamento da dinâmica climática e da variabilidade pluvial no litoral paulista parecem estar intimamente relacionados ao fenômeno de erosão costeira, como mostra a análise comparativa entre as cartas de Risco à Erosão Costeira (Figura 1) e de Unidades Climáticas (Figura 2). A evidente relação entre as unidades mapeadas nos dois produtos cartográficos

sugere algumas conclusões, que podem auxiliar na interpretação do papel e da influência que o clima exerce nos processos erosivos costeiros.

Em primeiro lugar está o papel dos sistemas frontais como gerador forçante da circulação costeira. A região mais afetada pelas passagens frontais é justamente o Litoral Sul, onde o risco à erosão costeira apresenta-se mais elevado. A velocidade do vento provocada pelas frentes é um agente intensificador da quantidade de energia liberada pelas ondas junto à linha de costa. O Litoral Norte, com porções mais abrigadas e onde os sistemas frontais perdem sua força, apresenta os mais baixos graus de risco à erosão por fatores naturais.

A quantidade de chuva parece ser outro fator de intensificação da erosão costeira. As unidades climáticas, notadamente do Litoral Sul e Central (neste, em especial, a unidade Mongaguá) onde os totais anuais de chuva são mais elevados, coincidem com setores morfodinâmicos de mais alto risco à erosão costeira. De forma inversa, o Litoral Norte apresenta o setor morfodinâmico de mais baixo risco à erosão, assim como possui as unidades climáticas com menor volume de chuva anual e número de dias chuvosos.

Finalmente, cabe ressaltar que os estudos realizados até o presente permitem indicar que em São Paulo os eventos extremos de chuva que geram ressacas e, portanto, forte erosão costeira, são produto da superposição de atuação de sistemas frontais com a ocorrência de marés de sizígia e marés anômalas (abril-maio).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIRD, E.C.F. 1985. The study of coastline changes. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Supplement-Band 57*: 1-9.
- MONTEIRO, C.A. 1973. A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo. São Paulo: IGEOG/USP/Fapesp.
- SANT'ANNA NETO, J.L. 1990. Ritmo climático e a gênese das chuvas na zona costeira paulista. São Paulo: FFLCH/USP. (Dissertação de Mestrado)
- SOUZA, C.R.G. 1990. Considerações sobre os Processos Sedimentares Quaternários e Atuais na Região de Caraguatatuba, Litoral Norte do Estado de São Paulo. São Paulo. 314p. Dissertação de Mestrado em Oceanografia, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.
- SOUZA, C.R. de G. 1997. As Células de Deriva Litorânea e a Erosão nas Praias do Estado de São Paulo. São Paulo. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Volume I – Texto e Volume II - Anexos.
- SOUZA, C.R. de G. 1999. Efeitos e causas da erosão costeira no litoral de São Paulo. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA), VII, Porto Seguro. Anais (CD-ROM).
- SOUZA, C.R. de G. (coord.). 2000. Sistema Integrador de Informações Geoambientais para o Litoral do Estado de São Paulo, Aplicado ao Gerenciamento Costeiro - SIIGAL Fase II. Projeto de Pesquisa. FAPESP, Abril/2000. Proc. n° 1998/14277-2. 87 p. + anexos (inédito).
- SOUZA, C.R. de G. 2001. Coastal erosion risk assessment, shoreline retreat rates and causes of coastal erosion along the State of São Paulo coast, Brazil. *Revista Pesquisas em Geociências*, 28 (2): 459-474.
- SOUZA, C.R. de G. & SUGUIO, K. 1996. Coastal erosion and beach morphodynamics along the state of São Paulo (SE Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 68 (3): 405-424.
- SOUZA, C.R. de G. & SUGUIO, K. 2002. The coastal erosion risk zoning and the State of São Paulo Plan for Coastal Management. *Journal of Coastal Research, Special Issue 35* (in press).
- SOUZA, C.R. de G.; SOUZA FILHO, P.W.M.; ESTEVES, S.L.; VITAL, H. DILLENBURG, S.R.; PATCHINEELAM, S.M. & ADDAD, J.E. 2003. Praias Arenosas e Erosão Costeira. In: C.R. de G. Souza et al. (eds.). *O Quaternário do Brasil*. (no prelo).
- TAVARES, R., SANT'ANNA NETO, J.L., TOMMASELLI, J.T.G. 2002. Mapa de Unidades Climáticas do Litoral Paulista. In 2º Relatório Científico do Sistema Integrador de Informações Geoambientais para o Litoral do Estado de São Paulo, Aplicado ao Gerenciamento Costeiro - SIIGAL Fase II. Projeto de Pesquisa. FAPESP, Proc. n° 1998/14277-2 (inédito).
- VILES, H. & SPENCER, T. 1995. *Coastal Problems. Geomorphology, Ecology and Society at Coast*. Edward Arnold and Oxford University Press Inc. 350p.

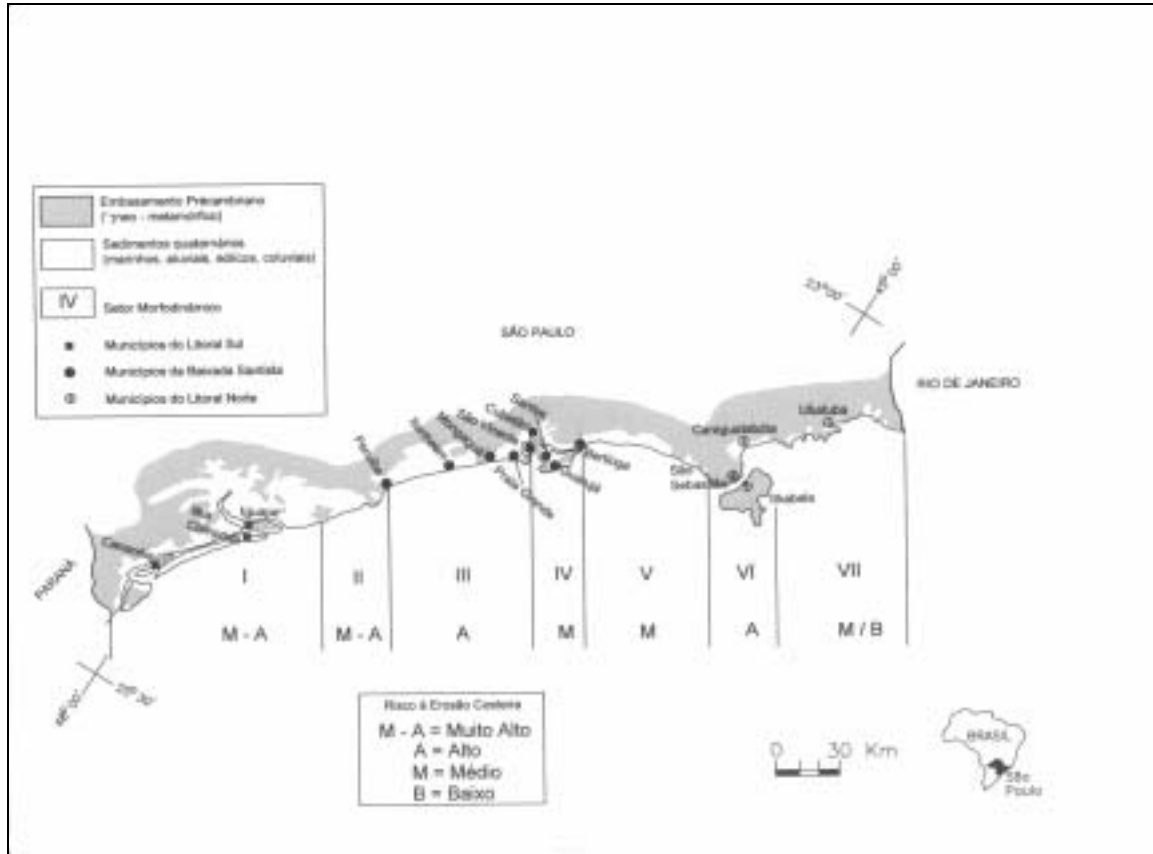
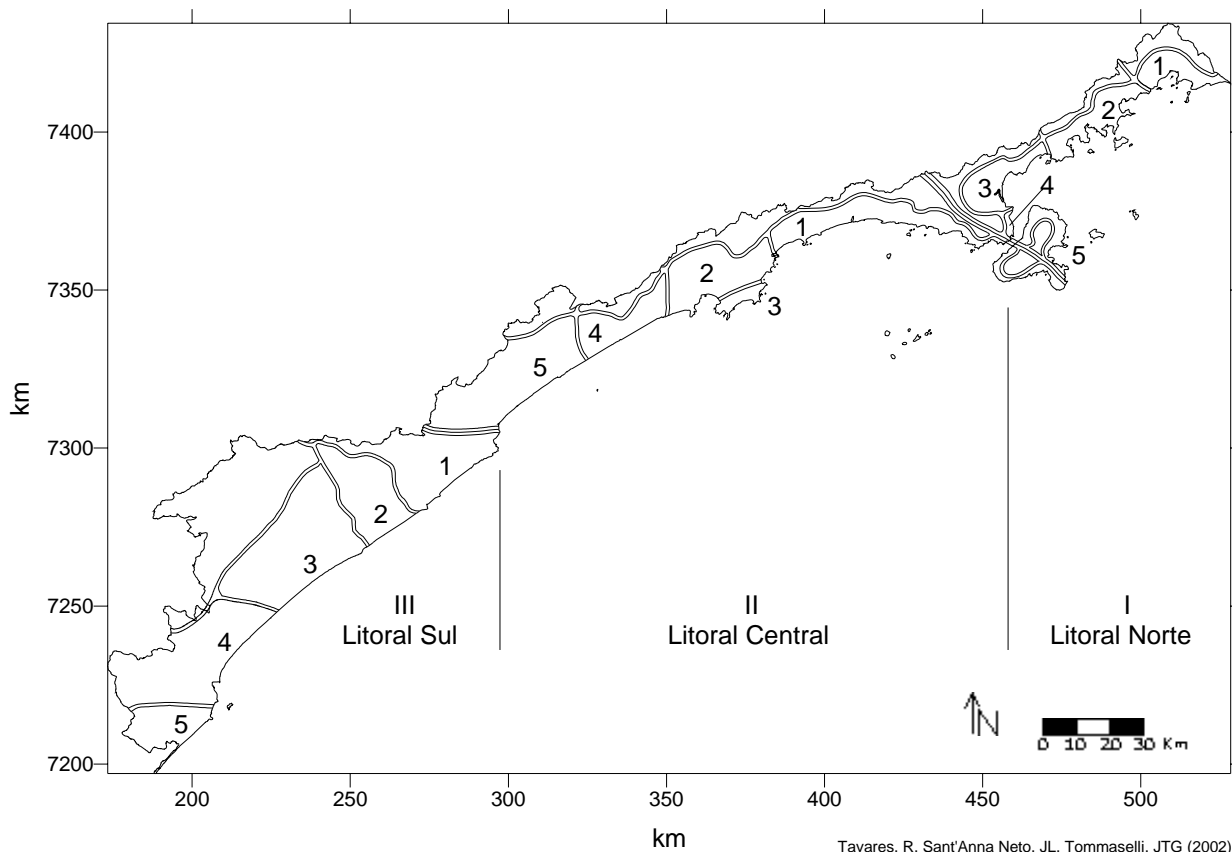


Figura 1. Localização da área de estudo e classificação de risco à erosão costeira nos setores morfodinâmicos (Souza, 2001; Souza & Suguio, 2002)

Tabela 1. Causas de erosão costeira em São Paulo (Souza, 2001; Souza & Suguio, 2002)

CAUSAS NATURAIS	CAUSAS ANTRÓPICAS
Dinâmica de circulação costeira: presença de centros de divergência de células de deriva litorânea em determinados locais mais ou menos fixos da linha de costa e atuação do efeito “foco estável”	Urbanização da orla, com destruição de dunas e/ou impermeabilização de terraços marinhos holocênicos e eventual ocupação da pós-praia
Morfodinâmica praial: mobilidade e suscetibilidade à erosão costeira	Retirada de areia de praias e dunas
Aporte sedimentar atual naturalmente ineficiente (continente, praia e fundo marinho adjacente)	Extração de areias fluviais (desassoreamento de desembocaduras e mineração) e dragagens em canais de maré e na plataforma continental
Presença de irregularidades na linha de costa: mudanças bruscas na orientação da linha de costa, promontórios rochosos e cabos inconsolidados	Implantação de estruturas rígidas ou flexíveis, paralelas ou transversais à linha de costa (em geral para conter ou mitigar a erosão costeira)
Modificação da deriva litorânea devido à presença de: desembocaduras fluviais (migração lateral e efeito “molhe hidráulico”), obstáculos situados na zona próxima à praia (barras de desembocadura fluvial, ilhas, paricéis, arenitos de praia e recifes), baías e desembocaduras lagunares	Armadilhas de sedimentos associadas à implantação de estruturas artificiais
Presença de amplas zonas de transporte ou trânsito de sedimentos (by-pass)	
Inversões bruscas da orientação da deriva litorânea causadas por fenômenos climático-meteorológicos como a passagem de ciclones extratropicais ou Anticiclone Tropical Atlântico (frentes frias estacionárias) e a atuação intensa do ENOS	
Elevações do NM de curto período devido a efeitos combinados de fenômenos astronômicos, meteorológicos e oceanográficos	Conversão de manguezais, planícies fluviais e lagunares, pântanos e áreas inundadas em terrenos para urbanização e atividades antrópicas; mudanças no padrão de drenagem
Efeitos primários da elevação do NM durante o último século, em taxas de até 30 cm/século ou 3 mm/ano	
Efeitos secundários da elevação de nível do mar de longo período - Regra de Bruun: processos erosivos no perfil emerso da praia e deposição no perfil submerso e fundo marinho adjacente (perfil de equilíbrio)	
Evolução quaternária das planícies costeiras: balanço sedimentar de longo prazo negativo e dinâmica e circulação costeira atuante na época	
Balanço sedimentar atual negativo originado por processos naturais individuais ou combinados	Balanço sedimentar atual negativo decorrente de intervenções antrópicas



Tavares, R, Sant'Anna Neto, JL, Tommaselli, JTG (2002)

Figura 2. Unidades climáticas do litoral paulista – planície costeira

Tabela 2. Unidades climáticas do litoral paulista – planície costeira

IDENTIFICAÇÃO				PADRÕES PLUVIAIS ANUAIS						
Zonas	Climas	Sistemas	Unidades	Precipitação			Volume	Nº de Dias Chuvosos	Índice de Variabilidade	
				Mínima	Habitual	Máxima				
Litoral Norte	I	Clima Tropical Úmido	Equatoriais e Tropicais	1 Picinguaba	<1900	2300-2400	>2800	Médio	Baixo	Alto
				2 Ubatuba	<1800	2100-2200	>2500	Médio	Baixo	Alto
				3 Caraguatatuba	<1450	1700-1800	>2000	Baixo	Médio	Médio
				4 São Sebastião/Canal	<1050	1300-1400	>1650	Baixo	Baixo	Alto
				5 Ilhabela	<1200	1550-1750	>2200	Baixo	Baixo	Alto
Litoral Central	II	Clima Subtropical Úmido	Tropicais e Polares	1 Maresias-Bertioga	<1900	2050-2500	>2600	Médio	Médio	Alto
				2 Cubatão-S.Vicente-Santos	<2050	2300-2500	>2700	Médio	Médio	Médio
				3 Guarujá	<1800	2100-2200	>2550	Médio	Médio	Médio
				4 Mongaguá	<2300	2700-2850	>3250	Alto	Médio	Alto
				5 Itanhaém-Peruibe	<1700	1750-2250	>2300	Médio	Médio	Alto
Litoral Sul	III	Clima Subtropical Úmido	Tropicais e Polares	1 Itatins-Juréia	<2100	2600-3000	>3400	Alto	Alto	Médio
				2 Barra do Ribeira	<1700	2700-2800	>2300	Alto	Alto	Médio
				3 Ilha Comprida Norte - Iguape	<1800	1800-2200	>2800	Médio	Alto	Alto
				4 Ilha Comprida Sul - Cananéia	<1800	2200-2600	>2800	Médio	Alto	Médio
				5 Ilha do Cardoso	<2000	2600-2800	>3200	Alto	Alto	Alto

Tavares, R, Sant'Anna Neto, JL, Tommaselli, JTG (2002)