tendências erosivas, atingindo até ~30 m de deslocamento da linha de costa. Nas fases negativas do PDO, também são observados ciclos de avanço e recuo, porém entre 2001 e 2014 as magnitudes destes processos foram maiores, bem como se observou a erosão dos setores central e leste da restinga e a relativa estabilidade da praia da Macumba. Nos últimos anos, 2017 a 2018, houve o predomínio do avanço da linha de costa.

Relativo à Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO), em sua fase negativa, que se estendeu até o ano de 1995, a linha de costa apresentou um deslocamento médio de ~9,7 m. Em sua fase positiva, de 1995 ao presente, houve o predomínio erosivo da linha de costa, com deslocamento médio de 7,6 m.



Figura 62 – Variação da posição da linha de costa entre 1986 e 2018.

Legenda: (a) restinga da Marambaia; (b) arcos praiais Macumba e Recreio-Barra. Fonte: A autora, 2019.

Data	Restinga	Restinga	Restinga	Macumba	Recreio-	Média Total
(uu/IIIII/aaaa)				0.0		
20/05/1986	0,0	0,0 6 5	0,0	0,0 5.4	0,0	0,0
18/01/1988	11.3	-0,5	-9,2	-5,4	-11,1	-0,0
24/02/1990	-3.8	2.5	-1.2	_2 2	-4.8	-8.1
21/07/1991	11.5	-11.9	-1,2	-2,2	-4,8	-0,1
06/08/1991	-96	-59	-4.0	-3.9	-3	-5,2
01/10/1994	18.8	21.5	- - ,0 64	8.0	86	12.1
14/08/1994	13.6	-26.8	-8.6	-7.0	-117	-13.3
11/04/1995	86	18.8	15.4	5 5	193	15,5
27/04/1995	-3.5	-7.4	-5.6	0.2	-14.4	-8.9
09/12/1996	8.9	15.9	10.2	16.2	15.2	13.2
08/07/1998	-3 5	-7.1	-12.1	-18.9	-6.5	-7.6
26/05/2000	-71	-11.0	-6.6	-5.8	-6.5	-7.2
14/08/2000	42	2.8	-2.1	21.5	6.8	53
05/01/2001	15.6	24.9	21.6	-3.6	16.6	17.0
01/08/2001	-10.3	-19.9	-9.1	1.1	-10.1	-10.6
17/08/2001	0.8	5.3	6.0	0.8	3.2	3.2
02/03/2004	7.6	15.4	9.1	-4.2	6.7	7.7
28/05/2005	-3.4	-18.6	-8.6	-3.7	-9.8	-9.0
11/03/2007	-5.9	13.6	5.7	4.3	8.4	5.3
12/04/2007	-8,1	-8,3	-9.9	-2,7	0.3	-4,4
15/02/2010	14,6	14,5	17,6	8,1	5,2	10,5
20/04/2010	-6,9	-24,0	-21,4	-13,0	-20,9	-17,9
09/05/2011	-17,1	-11,1	-17,4	-3,3	-1,5	-8,7
17/07/2013	-1,7	-5,0	-6,4	-4,7	-9,2	-6,4
02/08/2013	-1,7	0,5	4,2	8,4	5,6	3,3
25/01/2014	15,6	19,0	10,1	2,8	4,5	9,5
27/12/2014	-11,5	-15,5	3,3	-0,9	1,7	-3,3
18/06/2014	6,8	1,8	-3,5	-1,4	-1,4	0,5
04/07/2014	2,7	4,2	4,5	8,3	4,9	4,5
12/01/2015	-5,0	-1,3	-0,1	-4,6	-2,5	-2,7
13/02/2015	-4,2	1,6	1,9	-0,1	-1,7	-1,1
01/03/2015	4,1	-0,1	-1,7	-5,3	0,9	0,7
31/01/2016	18,3	21,5	20,3	14,4	15,7	17,7
19/03/2016	-11,3	-7,9	-3,1	-5,8	-8,9	-8,2
26/08/2016	-11,0	-27,5	-31,1	-3,0	-14,5	-17,3
11/09/2016	18,1	27,2	27,4	0,7	18,5	19,8
18/02/2017	-2,4	4,0	-13,5	1,7	-3,9	-3,7
29/08/2017	-11,5	-20,0	-2,7	3,2	-11,1	-10,2
14/09/2017	12,5	-2,2	-6,8	-12,3	-4,4	-1,3
25/03/2018	-3,5	11,7	17,4	8,2	12,7	9,6
10/04/2018	4,9	6,9	-0,6	-0,6	3,6	3,4
26/04/2018	-2,8	-0,8	2,0	6,9	-5,3	-2,3
12/05/2018	10,0	4,5	-0,7	-4,7	7,3	5,6

Tabela 11 – Deslocamentos médios em metros na posição da linha de costa entre uma data e outra da imagem de satélite para o período de 1986 a 2018.

Fonte: A autora, 2019.

O setor leste da restinga Marambaia apresentou o maior valor mediano para o envelope da mudança da linha de costa (SCE; ~72 m), alcançando cerca de 100 m próximo

aos canais de maré de Barra de Guaratiba. Nos setores central e oeste os valores medianos do SCE foram, respectivamente, 57 e 49 m. Relativo às taxas de mudança (LRR), o maior valor mediano associado a erosão é observado no setor oeste (-0,12 m/ano), enquanto que o setor central se mostra estável e o setor leste exibe um avanço da linha de costa (0,06 m/ano). Entretanto, neste último setor, até ~700 m a partir dos canais de maré, a erosão da linha de costa alcançou 0,10 m/ano. Em resumo, cerca de 38% da restinga encontra-se sob erosão, 34% é estável, enquanto que 27% apresenta avanço da linha de costa em direção ao mar (Tabela 12; Figura 63).

Na praia da Macumba, o SCE mediano foi de aproximadamente 40 m, alcançando valor máximo de 91 m, enquanto que no arco praial Recreio-Barra foi de ~50 m, alcançando 117 m próximo ao canal da Joatinga. A taxa de mudança da posição da linha de costa (LRR) para área compreendida entre os canais de Sernambetiba e Joatinga foi próxima de 0,20 m/ano, embora haja uma larga variabilidade espacial: enquanto na praia da Macumba a variação ficou entre -0,39 e 0,86 m/ano, no arco Recreio-Barra os valores oscilaram entre -1,33 e 0,76 m/ano. Em suma, apenas 7% deste compartimento apresentam recuo da linha de costa, sendo que a maior parte desta tendência erosiva se concentra na praia da Macumba e próximo ao canal da Joatinga. Enquanto isso, 27% da linha de costa se manteve estável e 66% avançou em direção ao mar (Tabela 12; Figura 63).

Ao analisar as taxas por décadas, verifica-se que entre 1986 e 1996 os pontos de maior erosão encontravam-se nas extremidades oeste e leste da restinga da Marambaia, com taxas de até -2,8 m/ano (Figura 64a) e na extremidade oeste do arco Recreio Barra, taxas de até 3 m/ano (Figura 64b). No período seguinte, entre 1997 e 2007, os pontos de maior erosão encontravam-se nas extremidades do setor oeste da Marambaia (até -2,7 m/ano) (Figura 64c) e no setor leste da praia da Macumba (-1,4 m/ano) (Figura 64d). Entre os anos de 2008 e 2018, verificam-se pontos de erosão ao longo de toda a linha, em especial nos setores central e leste da Marambaia e do arco Recreio-Barra, até -4,1 m/ano (Figura 64e, f).



Figura 63 – Taxas de mudança na posição da linha de costa entre 1986 e 2018.

Legenda: (a) envelope da mudança de posição da linha de costa (SCE); (b) taxa de variação por ano (LRR).

Nota: as linhas cinzas, no painel (b) representam estabilidade. Valores positivos e negativos indicam, respectivamente, mudanças em direção ao mar e em direção ao continente, relativo à posição da linha de costa em 2018. Fonte: A autora, 2019.

110



Figura 64 – Taxa de variação da posição da linha de costa por década.

Legenda: (a) taxa de variação por ano, na restinga da Marambaia, entre 1986 e 1996; (b) taxa de variação por ano, nos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra, entre 1986 e 1996; (c) taxa de variação por ano, na restinga da Marambaia, entre 1997 e 2007. (d) taxa de variação por ano, nos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra, entre 1997 e 2007. (e) taxa de variação por ano, na restinga da Marambaia, entre 2008 e 2018; (f) taxa de variação por ano, nos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra, entre 2008 e 2018; (f) taxa de variação por ano, nos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra, entre 2008 e 2018; (f) taxa de variação por ano, nos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra, entre 2008 e 2018; (f) taxa de variação por ano, nos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra, entre 2008 e 2018.

Nota: as barras azuis (valores positivos) e vermelhas (valores negativos) indicam, respectivamente, mudanças em direção ao mar – avanço da linha da costa – e em direção ao continente – recuo da linha de costa.

Fonte: A autora, 2019.

Setor	SCE (m)				LRR (m/ano)			
	Max	Média	Mediana	Max _a	Max _r	Média	Mediana	
RM Oeste	112	51±8	49	1,21	-1,07	$-0,05\pm0,21$	-0,12	
RM Central	92	57±8	57	0,54	-1,37	0,02±0,11	0,01	
RM Leste	145	73±27	72	0,77	-1,67	0,02±0,25	0,06	
Macumba	91	52±15	42	0,86	-0,39	0,21±0,26	0,26	
Recreio-Barra	117	57±10	53	0,76	-1,33	0,22±0,20	0,23	

Tabela 12 - Sumário das taxas de mudança na posição da linha de costa.

Nota: SCE: envelope da mudança na posição da linha de costa; LRR: taxa de variação por ano; RM: restinga da Marambaia; Max: valor máximo do envelope; Max_a: máximo avanço; Max_r: máximo recuo.

Fonte: A autora, 2019.

5.5 Cenários de elevação do nível do mar e novos traçados da linha de costa

A partir da taxa (regressão de 1º grau) de subida do nível do mar (NM) de 2,42 mm/ano, calculada pela regressão linear para toda a série histórica, foi elaborada a projeção de elevação do NM até o ano de 2100 (Figura 65). Baseando-se nesta projeção, no ano de 2100 o NM será de 2,51 m, ou seja, subirá aproximadamente 20 cm em relação ao último registro da série, que é de 2,31 m para o ano de 2016.

Com esta projeção, um novo traçado da linha de costa é apresentado na Figura 66 (linha contínua verde). De modo geral observa-se um recuo médio da linha de costa de ~ 39 m. No compartimento que abrange a restinga da Marambaia, há a abertura do setor central, com extensão de 12,5 km e a quase destruição total do ponto arenoso ancorado na parte superior do setor oeste. Outro ponto de destaque é a erosão dos bancos de sedimentos localizados em Barra de Guaratiba: o maior deles possui ~1,83 km² na atualidade e com a elevação do NM dividir-se-ia em três partes, uma com área 0,75 km², a outra com 0,13 km² e a última com 0,05 km². No segundo compartimento, o tômbolo que liga o arco praial à Pedra do Pontal fica submerso. No segundo compartimento, o tômbolo que liga o arco praial à Pedra do Pontal fica submerso. Alguns pontos da área central seriam recuados, atingindo a malha viária e a 4 km do canal da Joatinga, o novo traçado da linha de costa atingiria as residências. Na linha de costa adjacente ao canal da Joatinga a erosão seria de ~50 m.



Figura 65 – Projeção de subida do nível do mar com base na tendência calculada para série de 1963 a 2016.

Nota: Projeção calculada com base na taxa de subida de 2,42 mm/ano. A área destacada em laranja ressalta o período que compreende a subida de 2 cm em relação ao nível em 2016, levando em consideração um intervalo de confiança de 95%.
Fonte: A autora, 2019.

No cenário RCP 4.5 proposto pelo Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC), onde projeta-se um NM 40 cm maior que o atual para o ano de 2100, as tendências de recuo da linha de costa descritas anteriormente seriam agravadas, com recuo médio de ~90 m. A área central da restinga da Marambaia apresentaria uma abertura de 13,8 km e os bancos arenosos de Barra de Guaratiba diminuiriam de tamanho – e.g. o maior banco perderia 1,26 km² em relação a sua área atual. No cenário RCP 8.5, em que o NM projetado estaria 0,63 m acima do nível atual, no ano de 2100, o recuo médio da linha de costa é de ~110 m.Verifica-se uma abertura de 14,2 km de extensão no setor central da restinga e o maior banco arenoso de Barra de Guaratiba diminui 1,58 km² em relação a área atual. O traçado da linha de costa no arco praial Recreio-Barra alcançaria a lagoa de Marapendi, abrindo novas conexões entre a lagoa e o oceano adjacente.



Figura 66 - Novos traçados da linha de costa em cenários de elevação do nível do mar.

Fonte: A autora, 2019.

Como descrito anteriormente, a área central da restinga da Marambaia é um setor sensível frente a uma possível elevação do NM, dado seu estreitamento, onde chega a atingir 130 m de largura, e rebaixamento topográfico. Neste sentido, baseando-se na taxa de subida de 2,42 mm/ano, buscou-se avaliar em que nível se daria a ruptura deste compartimento da área de estudo. Assim, com o NM 20 cm acima do atual os primeiros pontos de ruptura apareceriam no setor central da restinga (Figura 67). Na ruptura mais a oeste, um canal de 75 m seria aberto. Já na ruptura mais a leste, abrir-se-iam dois canais, um de 55 m e outro de 211 m. O pontal arenoso da Ponta da Pombeba também seria erodido, perdendo sua ancoragem na restinga.



Figura 67 – Traçado da linha de costa da restinga da Marambaia com a subida de 2 cm do nível do mar.

Legenda: O círculo tracejado em vermelho indica o pontal arenoso da Ponta da Pombeba. Fonte: A autora, 2019.

5.6 Discussão

Os dados meteorológicos mostraram claramente as variações intra-anuais, com condições de tempo bom entre novembro e março e de tempestade nos demais meses, enquanto que não foi observado nenhum padrão interanual. Um destaque importante relaciona-se à bdirecionalidade dos ventos, em que durante os períodos de maior agitação marítima, entre abril e outubro, os ventos mais intensos são do quadrante S, intensificando as ondas de tempestade que são do mesmo quadrante.

Estudos recentes mostram uma tendência global de aumento de eventos extremos, refletindo no aumento da intensidade dos ventos e do H_s – para a costa sudeste brasileira Young e Ribal (2019) estimaram um aumento de 2-4cm/s/ano para os ventos e 1 cm/ano para a altura das ondas. Também foi estimado um aumento anual da energia da onda em todo o mundo de 0,4% para o período compreendido entre 1948 e 2008 (REGUERO; LOSADA; MÉNDEZ, 2019). Relativo aos eventos de tempestade analisados neste trabalho, aproximadamente a cada 8 anos há um aumento no número de eventos, ao passo que não há evidências deste padrão cíclico para a magnitude destes eventos.

Além disto, foi observado que na caracterização dos eventos de tempestade a partir do SPI, os meses associados a um alto número de eventos, não necessariamente correspondem àqueles com a maior magnitude acumulada (APÊNDICE D, Tabela 20). Por exemplo, apesar de quatro eventos de tempestade terem sido registrados para o mês de junho de 1987 (SPI =

246 m²h), o mês com a maior magnitude acumulada foi calculada para março do mesmo ano, quando apenas um evento foi registrado. Em trabalho realizado por Mendoza, Jimenez e Mateo (2011) para verificar a intensidade das ondas de tempestade na costa mediterrânea através do SPI, eles não encontram uma correspondência direta entre as intensidades dos ciclones que atingiram a costa e as classes de tempestade determinadas pelo *SPI*, sugerindo que outros parâmetros fossem incorporados na análise. Neste sentido, a determinação dos eventos de tempestade pelo *E* é uma boa alternativa para acessar a real magnitude dos eventos de tempestade, já que se leva em consideração não apenas a altura e a duração do evento, mas também o período.

Durante o período analisado, 1986 a 2018, os eventos de *El Niño* de 1997/1998 e 2015/2016 foram dois dos três mais fortes já registrados, e em estudos realizados nas praias dos Estados Unidos, verificou-se um aumento da erosão da linha de costa, particularmente neste último evento, como resultado de mudanças nas condições de ondas (BARNARD et al., 2017; GORDON; BARNARD; GIBBONS, 2017). Contudo, neste trabalho, foi verificado que ano de *La Niña* de 2010/2012 foi o mais intenso, com o registro de 38 eventos de tempestade e magnitude acumulada de 16.766 m²h (*SPI*) / 30.919 kJ/m (*E*) (Tabela 9). Durante este período, um dos eventos mais energético de toda a série foi registrado em abril de 2010 (1745 m²/h / 2090 kJ/m), resultando na erosão de 20 m da linha de costa.

Outro resultado relevante relaciona-se ao fato de que apesar do número de eventos registrados durante anos de *La Niña* ser menor do que aqueles registrados durante *El Niño*, em média eles são levemente mais fortes (~22%) (Tabela 12). De acordo com Mentaschi et al. (2018), o aumento na frequência de eventos de tempestade pode estar correlacionado a teleconexões de larga escala, como os ciclos de *El Niño/La Niña*. Um dos primeiros trabalhos a verificar o impacto da teleconexões climáticas na resposta da linha de costa foi realizado por Short, Trembanis e Turner (2000), que observaram na costa leste australiana a correlação entre *La Niña* e erosão praial em resposta ao aumento da frequência de tempestades durante a fase positiva do SOI.

Mais recentemente, Barnard et al. (2015) verificaram nas praias australianas e neozelandesas altas taxas erosivas e de fluxo de energia das ondas ligadas aos efeitos da *La Niña*, devido ao aumento no número de ciclones extra tropicais durante este período. Adicionalmente, na Austrália, os mesmos autores observaram que a erosão costeira durante a *La Niña* foi mais intensa que o normal. Ainda no hemisfério sul, Dutra et al. (2014), analisando as praias de Salvador, no nordeste do Brasil, e Gutiérrez et al. (2016) e Orlando,

Ortega e Defeo (2019) avaliando as praias de Montevidéu, no Uruguai, encontraram forte correlação entre os anos de *La Niña* e a erosão costeira.

Neste trabalho, verificou-se que tanto nos anos de *El Niño*, quanto de *La Niña*, a linha de costa mostra-se mais erosiva que durante os anos neutros. Outros detalhes acerca dos anos de *La Niña* dizem respeito à linha de costa mais erosiva na restinga da Marambaia e quando ocorre o avanço da linha de costa, ela é mais intensa em toda a área de estudo quando se compara aos anos neutros e de *El Niño*.

O poder destrutivo das ondas de tempestade é notório e ao longo do período analisado, dois casos amplamente registrados na literatura (FERNANDEZ; BULHÕES; ROCHA, 2011; INNOCENTINI; OLIVEIRA; PRADO, 2003; MUEHE, 2011)foram detectados tanto pelo *SPI* quanto pelo *E*. Em maio de 2001, ondas predominantemente do quadrante SW, com altura máxima de até 5 m, em um evento que durou ~90 h, atingiram a linha de costa da área de estudo, ocasionando um recuo médio de 11 m. Já em abril de 2010, ondas predominantemente de SE, com duração de 100 h, ocasionaram um recuo médio de 18 m na linha de costa. Algo similar entre os eventos foi o predomínio de ondas de SW três dias antes do início da tempestade, reforçando, assim, a vulnerabilidade da área de estudo a ondas deste quadrante (LINS-DE-BARROS; KLUMB-OLIVEIRA; LIMA, 2018; MUEHE et al., 2015; MUEHE; ROSMAN, 2007).

A partir das velocidades orbitais próximo ao fundo calculadas tanto em cenários de tempo bom, quanto de tempestade, foi possível verificar a remobilização dos sedimentos da plataforma, que consequentemente estariam disponibilizados na coluna d'água e poderiam ser transportados tanto longitudinal, quando transversalmente. Em um cenário de tempo bom (ondas de SE), apenas os sedimentos localizados entre a linha de costa e a isóbata de 20 m, predominantemente areia média, seriam ressuspendidos (Figura 68a). Já em um cenário extremo de tempestade (ondas de SW), desde areias grossas até siltes grossos seriam ressuspendidos (Figura 68b).

Em estudo realizado por Yokoyama (2012) na plataforma continental ao largo do estado de São Paulo, tendências similares foram encontradas pelo autor, onde foi verificada a remobilização de areias muito finas até 22 m de profundidade em condições de ondas de SE, enquanto que em condições mais energéticas (ondas de S), havia remobilização até a isóbata de 60 m. Neste sentido, Storlazzi e Reid (2010) verificaram que a remobilização dos sedimentos na plataforma continental da Califórnia estaria associada às oscilações de *El Niño/La Niña*, em que verificou-se maior mobilização dos sedimentos até a isóbata de 120 m durante períodos de *El Niño*, em geral de sedimentos mais finos.



Figura 68 - Remobilização dos sedimentos na plataforma continental.

Legenda: (a) ressuspensão dos sedimentos no cenário B2; (b) ressuspensão dos sedimentos no cenário T2.
 Nota: Condições de contorno dos cenários na Tabela 5. Ressuspensão dos sedimentos baseada nos limites propostos por Komar e Miller (1973).
 Fonte: A autora, 2019.

A taxa de oscilação do nível do mar calculada para os registros de nível do mar no marégrafo da Ilha Fiscal, de 2,42 mm/ano, é similar a encontrada por Losada et al. (2013), que determinou uma tendência de subida do nível do mar a uma taxa de ~2,25mm/ano ao longo da costa do Rio de Janeiro, através da análise de dados de marégrafos e de altimetria por satélites. Cabe destacar que no presente estudo, o modelo que apresentou melhor ajuste aos dados foi o de 3° grau, em que cerca de 59% da variabilidade do NM é explicada pelo modelo. Os outros 41% são influenciados por outros fatores, como as variações climáticas interanuais. No estudo elaborado por Losada et al. (2013), eles verificaram correlação moderada a forte (> 0,5) entre períodos de *El Niño* e anomalias do NM entre 15°S e 30°S na costa Atlântica da América do Sul, como também verificaram a influência da AMO nestas anomalias.

Desta forma, em resposta a esses condicionantes, ao longo da restinga da Marambaia é possível verificar um padrão espacial alternado de erosão e acreção, com predomínio erosivo nos setores oeste e extremo leste e de avanço da linha de costa no setor leste. Em contraste, grande parte dos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra exibem tendência de acreção em 66% da sua extensão. Uma síntese das condições meteo-oceanográficas típicas dos eventos de

tempestade durante anos neutros e de *El Niño/La Niña* e a resposta da linha de costa são apresentadas na Tabela 13.

Atributo		Ano neutro		Ano de <i>El Niño</i>		Ano de <i>La Niña</i>	
vento	direção modal	S		SW		SW e SSW	
-	maiores velocidades	SW		ESE e SSW		SW e SSW	
	ocorrência	outono-inverno		ao longo do ano todo		outono-inverno	
ade		SPI	Ε	SPI	E	SPI	Ε
pest	duração	26 h	27 h	28 h	29 h	30 h	28 h
tem]	intervalo de retorno	19,8 d	21,1 d	20,1 d	18,8 d	19,1 d	15,5 d
NM		maiores valores medianos		maiores valores máximos		maior amplitude	
resposta da linha de costa		erosão/acreção		erosão intensa		erosão (mais intensa na restinga da Marambaia) e avanço maior da LC	

Tabela 13 – Características meteo-oceanográficas e da resposta da linha de costa durante os eventos de tempestade.

Legenda: h = horas; d = dias; NM = nível médio; mín = mínimo; máx = máximo. Fonte: A autora, 2019.

No setor central da restinga da Marambaia, as taxas de erosão variaram entre 0,1 e 0,5 m/ao e durante episódios de tempestade os valores de recuo foram superiores a 20 m. Além disto, a área é propensa a processos de transposição (*overwash*) devido ao seu estreitamento (Figura 69a), apesar da frequência destes eventos não ser documentada. De acordo com Muehe et al. (2018) o canal apresentado na Figura 69a teria sido formado pela ação dos ventos (*blow out*) no campo de dunas. Assim, episódios de transposição nesta localidade teriam ocorrido posteriormente à abertura do canal.

A extremidade leste da Marambaia (Figura 69b), onde estão localizados os canais de maré de Barra de Guaratiba, registrou tendências erosivas superiores a 30 m em todas ocasiões (de 1986 a 2018 e durante eventos de tempestade). Durante uma campanha hidrodinâmica no canal de Barra de Guaratiba, Cortez (2014) documentou, sob condições de maré de sizígia, correntes de até 2 m/s e vórtices de sedimentos, caracterizados por areias médias, entrando no canal. A este respeito, este setor da restinga pode ser considerado como

um *sink/attractor* de sedimentos (BARNHARDT, 2009; GOLDSMITH; GOLIK, 1980; HINWOOD; MCLEAN; WILSON, 2012).

Figura 69 – Áreas erosivas na restinga da Marambaia.



Legenda: (a) setor central; tomada do alto de uma duna de 5 m, onde é possível observar marcas de deixa, indicadas pelas setas e uma área úmida no lado esquerdo, possivelmente devido a ocorrência de transposição (*overwash*) (b) setor leste, mostrando uma escarpa erosiva de ~3 m de altura, a 500 m do canal de Barra de Guaratiba.
 Fonto: (a) A autor: 2013; (b) CUERPA 2016

Fonte: (a) A autora, 2013; (b) GUERRA, 2016.

A tendência erosiva da praia da Macumba (Figura 70) foi recentemente reportada em outros estudos (PENA, 2017; PEREIRA et al., 2018). Em meado de setembro de 2017 a ciclovia e o calçadão localizados adjacente ao pós-praia foi destruído devido à erosão costeira e em outubro de 2017, casas e construções próximas começaram a ser atingidas pelas ondas. Em maio de 2018 as obras de contenção, que custaram 14,5 milhões de reais, foram completadas, mas em junho do mesmo ano o processo erosivo afetou a praia novamente (LINS-DE-BARROS; SAUZEAU; GUERRA, 2019; RODRIGUES, 2018).

Apesar das extremidades dos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra serem delimitados por canais, eles apresentam comportamentos distintos. Na extremidade oeste, na praia da Macumba (Figura 71a), a linha de costa adjacente ao canal de Sernambetiba exibe uma tendência de avanço, enquanto que na extremidade leste, no arco Recreio-Barra (Figura 71b), a linha de costa está propensa a erosão, conforme as taxas apresentadas na Figura 63. Souza (2016) registrou correntes com velocidades de até 1 m/s no canal da Joatinga, fortes o suficiente para ressupender as areias locais, cujo tamanho varia de médio a fino.

Relativo às projeções de ruptura das barreiras arenosas, alguns estudos sísmicos que foram conduzidos na região da restinga da Marambaia, revelam uma rápida elevação no NM, inundando o ambiente e construindo barreiras arenosas durante a regressão marinha (DADALTO, 2017; FRIEDERICHS et al., 2013). As altas taxas relacionadas à subida do nível do mar são visíveis a partir da regressão cúbica, que chegam a ser cinco vezes maior que a taxa de descida. Neste sentido, o trabalho realizado por Angulo, Souza e Muller (2009) para

uma ilha-barreira de características similares à Marambaia, a ilha do Cardoso localizada no extremo sul do estado de São Paulo, constatou que a ruptura da área central se daria entre os anos de 2012 e 2016, previsão esta que se realizou em agosto de 2018(TOMAZELA, 2018).

Figura 70 - Processo erosivo na praia da Macumba.



Legenda: (a) setor da praia da Macumba, próximo ao perfil 2, em 15/09/2017; (b) início do processo erosivo, próximo ao afloramento que divide o arco praial ao meio, distante 400 m do perfil 2, em 15/09/2017; (c) agravamento do processo erosivo, com a destruição de dois quiosques; (d) início das obras de contenção, em 23/11/2017; (e) continuidade das obras de contenção, em 14/12/2017; (f) conclusão das obras, em 18/06/2018; (g) retomada do processo erosivo, em frentes aos quiosques que foram destruídos, expondo os sacos usados na contenção, em 18/06/2018; (h) detalhe da placa com as informações sobre a restauração da restinga na área , orçada em mais de R\$100 mil, em 11/10/2018; (i) recuperação parcial do perfil praial, em 11/10/2018.

Nota: localização do perfil 2 (P2) na Figura 28. Fonte: (a) a (e) Pena, 2017; (f) a (i) A autora, 2018. Figura 71 – Extremidades dos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra.



Legenda: (a) extremidade oeste, com o enroncamento do canal de Sernambetiba ao fundo; (b) extremidade leste, próximo ao canal da Joatinga, no início de um evento de tempestade. Fonte: A autora, 2017.

6 OBSERVAÇÕES MORFODINÂMICAS E OCEANOGRÁFICAS ENTRE 2016 E 2018

Neste capítulo são apresentados os resultados e a discussão, em separado, das observações de ondas, topografia e sedimentologia realizados entre julho de 2016 e outubro de 2018, em vinte duas campanhas amostrais ao longo dos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra, a fim de compreender o comportamento praial em uma escala temporal de médio prazo.

Durante o período de monitoramento, foram contabilizados vinte e um eventos de tempestade, sendo que em duas ocasiões o levantamento foi realizado logo no início da tempestade (18/05/2017 e 10/08/2017) e em quatro ocasiões, logo após a tempestade (27/09/2016, 20/07/2017, 15/08/2017 e 18/06/2018).

Também foram estimadas as taxas de transporte longitudinal para cada data de levantamento de campo, bem como foram feitas as estimativas do transporte resultante total e para períodos caracterizados como tempo bom e tempestade. Cabe relembrar que os trabalhos de campo não foram conduzidos na restinga da Marambaia, devido à restrição ao seu acesso.

6.1 Observações hidrodinâmicas

Na boia oceanográfica localizada da plataforma continental, a cerca de 140 km da área de estudo, entre julho de 2016 e janeiro de 2018, as ondas variaram entre os quadrantes L e SW, onde as ondas de L foram mais frequentes e as do quadrante S mais intensas, com alturas de até 5 m e períodos de 18 s em alguns episódios (linha e pontos cinzas na Figura 72). Os registros das boias de Copacabana, distantes cerca de 15 km da área de estudo, entre julho de 2016 e outubro de 2018, exibiram ondas variando entre SE e SW, com alturas entre 0,5 e 4 m e períodos alcançando até 17,5 s em algumas ocasiões (linha e pontos pretos na Figura 72).

A observação visual de ondas (Figura 73) mostra que os tipos de quebra colapsante e mergulhante são os mais recorrentes, sendo mais frequente o tipo mergulhante (53,25%) no setor oeste da praia da Macumba e ao longo dos setores leste e central do arco Recreio-Barra. O tipo colapsante predomina nos setores leste dos arcos Macumba e Recreio-Barra (43,75%).



Figura 72 – Condições hidrodinâmicas entre julho de 2016 e outubro de 2018.

Legenda: (a) altura de onda significativa; (b) período da onda; (c) direção da onda. Nota: As linhas vermelhas indicam as datas em que houve levantamento de campo. Fonte: A autora, 2019.



Figura 73 - Tipos de quebra de onda observados nos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra.

Fonte: A autora, 2019.

6.2 Análise sedimentológica e topográfica dos perfis praiais

Em geral, o tamanho médio dos grãos diminui de oeste para leste da área de estudo, predominando a classe areia grossa desde a Macumba e até a área central do arco Recreio-Barra e a classe areia média predominando no restante do arco Recreio-Barra (Figura 74a). Relativo ao grau de seleção das amostras, na Macumba predominam grãos que variam de muito bem selecionados a moderadamente selecionados, enquanto que no arco Recreio-Barra predominam grãos muito bem e bem selecionados (Figura 74b).

Quanto à assimetria das amostras, quase todas as amostras se apresentaram quase simétricas ou positivas, com apenas algumas amostras negativas (Figura 74c). De modo geral, houve o predomínio de amostras platicúrticas, mesocúrticas e leptocúrticas (Figura 74d). Estes dois últimos parâmetros não apresentaram um padrão definido de ocorrência.



Figura 74 – Parâmetros granulométricos das amostras da face de praia nos arcos praiais Macumba e Recreio-Barra entre 2016 e 2018.

Legenda: (a) tamanho médio do grão; (b) grau de seleção; (c) assimetria; (d) curtose. AF: areia fina; AM: areia média, AG: areia grossa; AMG: areia muito grossa; MoS: moderadamente selecionada; MoBS: moderadamente bem selecionada; BS: bem selecionada; MBS: muito bem selecionada; AMP: assimetria muito positiva; AP: assimetria positiva; QS: quase simétrica; NA: assimetria negativa; MLe: muito leptocúrtica; Le: leptocúrtica; Me: mesocúrtica; PI: platicúrtica; MPI: muito platicúrtica.

Fonte: A autora, 2019.

Na Figura 75 são apresentados os perfis topográficos realizados na praia da Macumba, onde o perfil 1 (P1) é o perfil mais a oeste e o perfil 4 (P4), mais a leste. Nota-se que a declividade dos perfis aumenta de oeste para leste. A topografia do P1 exibe uma grande variabilidade ao longo do período de monitoramento, variando de 46 a 110 m de largura. Neste perfil, entre dezembro de 2016 e outubro de 2017 observa-se uma tendência de aumento da largura e posterior recuo de 60 m em julho de 2018. O desvio-padrão em torno do perfil médio é maior (até 1,5 m) na zona que se estende da face de praia até a berma.

Os perfis 2 (P2) e P4 registraram as menores larguras, variando entre 25 e 42 m, respectivamente, enquanto que o perfil 3 (P3) foi ligeiramente maior, alcançando a largura máxima de 60 m. Nota-se uma relativa ciclicidade entre erosão e acreção dos perfis P2 e P3, enquanto que o P4 apresenta maior estabilidade. Nestes perfis, o desvio-padrão em relação ao perfil médio é inferior a 1 m, atingindo maiores valores nos últimos 5 m dos perfis.

Na Figura 76 são apresentados os perfis topográficos realizados ao longo do arco praial Recreio-Barra, onde o perfil 5 (P5) é o perfil mais a oeste e o perfil 11 (P11), mais a leste. Observa-se que as extremidades (P5 e P11) exibem uma grande variabilidade em relação à largura, variando de 50 a 125 m. Nota-se uma diminuição da declividade dos perfis no sentido de oeste para leste, bem como da altitude, que vai de 7 m no P5 para 4 m no P11.

No P5 é possível observar o recuo de ~10 m entre abril e maio de 2017 e posterior acreção, atingindo a largura máxima, 120 m, em dezembro do mesmo ano. Em seguida, tendências erosivas são observadas, com recuo total de 40 m, e posterior manutenção da largura média da praia em 75 m.

No perfil 6 (P6) nota-se uma tendência de acreção praial até agosto de 2017, quando houve um recuo de ~40 m, seguida da recuperação do perfil até o final do monitoramento. Nos perfis 7 (P7) e 8 (P8), a tendência de acreção praial é observada até abril de 2017, sendo sucedida por episódios erosivos entre maio e setembro do mesmo ano. Em seguida há relativa estabilidade dos perfis até julho de 2018, quando se registra um recuo de ~20 m.

O perfil 9 (P9) apresenta tendência geral de acreção praial até abril de 2017, seguida de ciclos erosivos, com recuos inferiores a 20 m, e posterior recuperação. No perfil 10 (P10) observa-se tendência de acreção até maio de 2017, seguida de um processo erosivo em julho. Após a recuperação da largura, em novembro do mesmo ano, ocorreu um novo episódio erosivo, que novamente foi seguido pelo aumento da largura praial. Por fim, no P11, em março e dezembro de 2017 nota-se uma tendência erosiva, agravada em agosto quando houve o recuo de ~45 m, completando sua recuperação total apenas um ano depois, voltando a exibir pouco mais de 110 m largura.

Relativo ao desvio-padrão em relação ao perfil médio dos perfis do arco Recreio-Barra, observa-se que os maiores valores, ~1 m, foram observados entre a berma e a face de praia. No P11, além desta característica, estes valores também são encontrados na distância acumulada entre 30 e 60 m, zonas referentes a berma e face de praia dos perfis levantados entre agosto de 2017 e julho de 2018.

Figura 75 – Perfis topográficos na praia da Macumba.





Nota: A altura zero indica o nível do mar. O eixo y à esquerda indica a altura ortométrica e o eixo y à direita o desvio-padrão. Localização dos perfis na Figura 28.

Fonte: A autora, 2019.