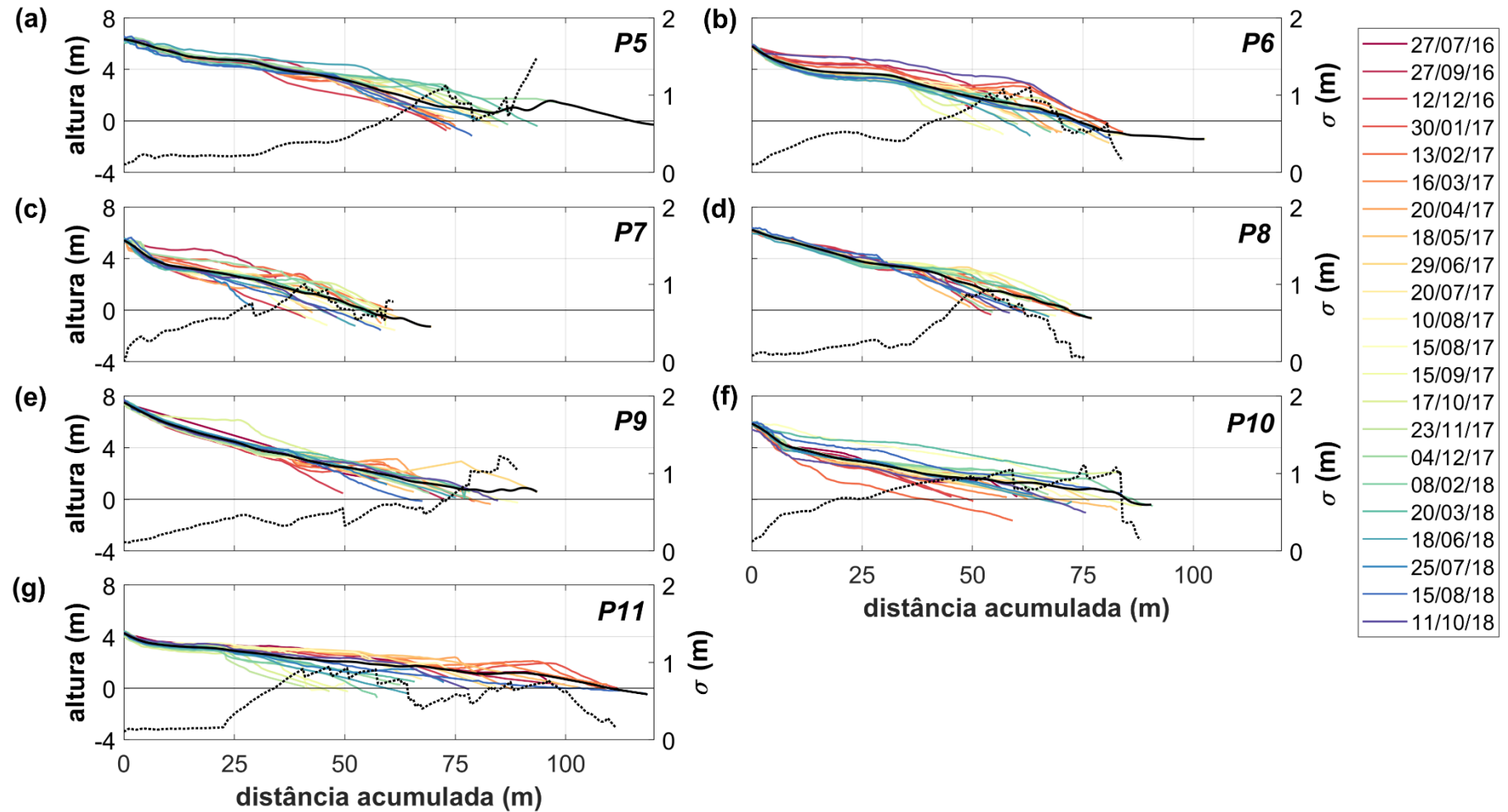


Figura 76 – Perfis topográficos no arco praial Recreio-Barra.



Legenda: (a) perfil 5; (b) perfil 6; (c) perfil 7; (d) perfil 8; (e) perfil 9; (f) perfil 10; (h) perfil 11. A linha contínua preta representa o perfil médio e a linha pontilhada preta, o desvio-padrão.

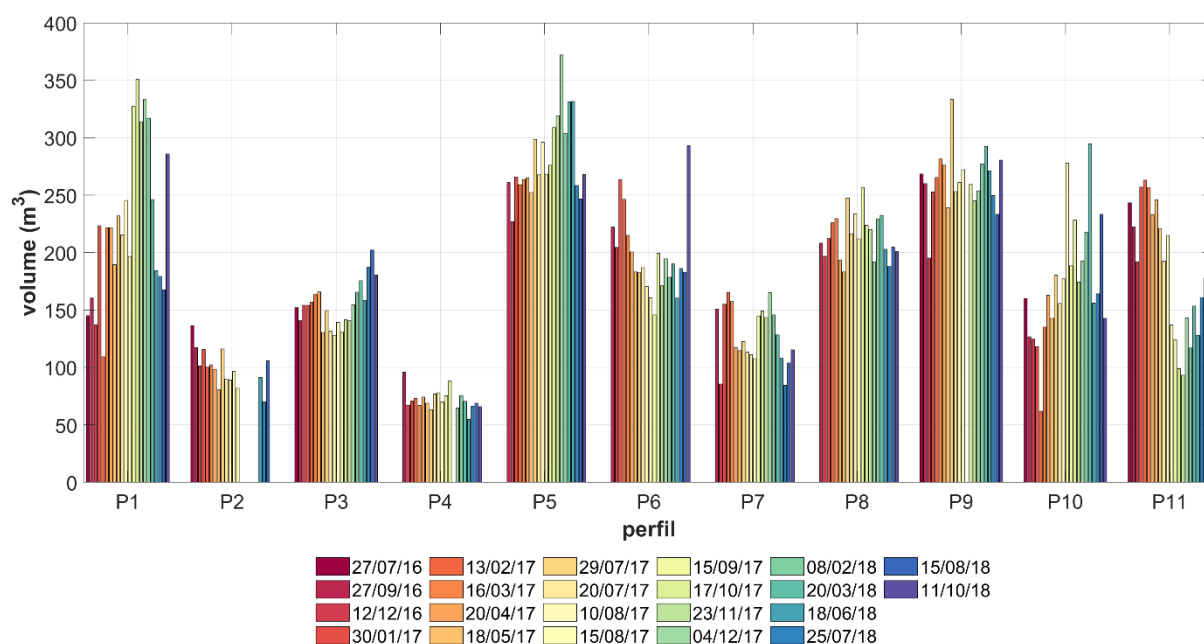
Nota: A altura zero indica o nível do mar. O eixo y à esquerda indica a altura ortométrica e o eixo y à direita o desvio-padrão. Localização dos perfis na Figura 28.

Fonte: A autora, 2019.

Na Figura 77 são apresentados os volumes dos perfis praias ao longo do período de monitoramento. No arco praial da Macumba, os maiores valores foram obtidos para o P1. Neste perfil o menor valor foi registrado em fevereiro de 2017 e o maior, em outubro do mesmo ano. Os perfis P2 e P4 mostraram menor variabilidade do volume, enquanto que no P3 observa-se que os menores volumes foram registrados entre maio e outubro de 2017.

No arco Recreio-Barra, os maiores volumes são observados no P5 e no P9, $\sim 370 \text{ m}^3$ e $\sim 340 \text{ m}^3$, respectivamente, enquanto que os menores se localizam no P7 e no P10, $\sim 90 \text{ m}^3$ e $\sim 60 \text{ m}^3$, respectivamente. No P5 nota-se o aumento do volume até dezembro de 2017, diminuindo após esta data. No P6 o volume diminuiu entre janeiro e setembro de 2017, aumentando posteriormente. Já no P7, houve aumento do volume de janeiro a março de 2017, diminuindo até agosto do mesmo ano, seguido do aumento até dezembro e diminuição até julho de 2018.

Figura 77 – Variação do volume dos perfis nos arcos praias Macumba e Recreio-Barra.



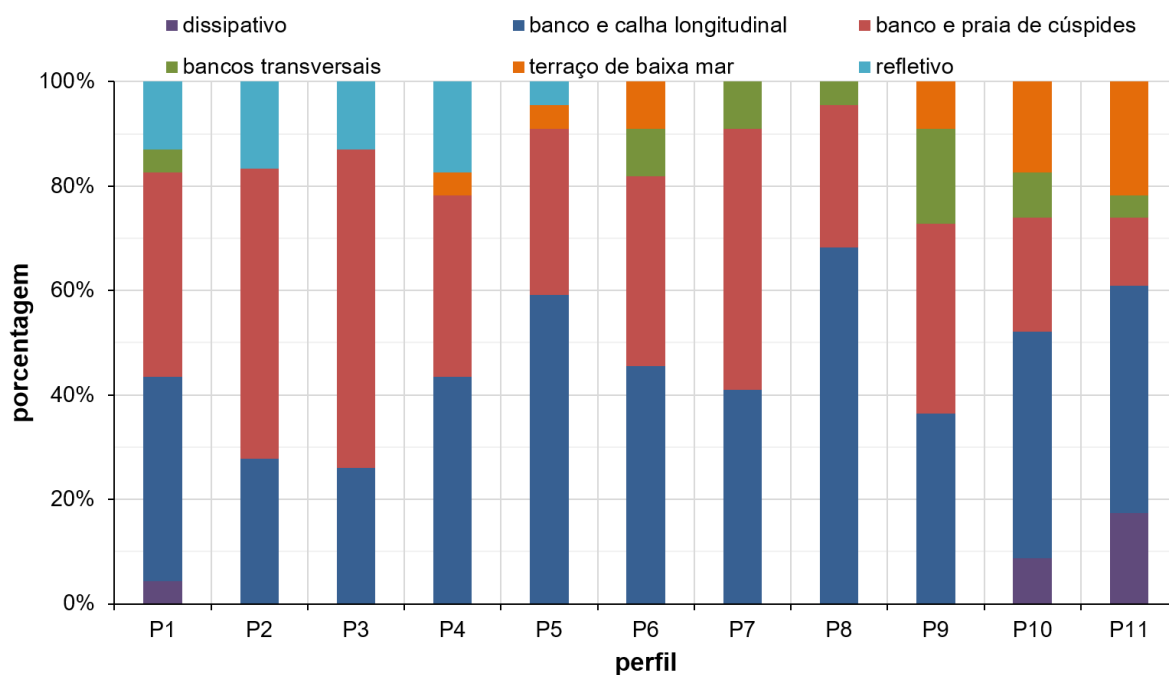
Fonte: A autora, 2019.

No P8 nota-se a manutenção dos volumes, com períodos erosivos em abril e maio de 2017 e de outubro a dezembro do mesmo ano. No P9, além de alguns períodos erosivos, em maio de 2017 e julho de 2018, em junho de 2017 é verificado um aumento pronunciado no volume. A partir de março de 2017, o perfil 10 apresentou uma tendência de aumento de volume, com os maiores volumes registrados em agosto de 2017 e março de 2018. De

maneira oposta ao P10, no P11 a partir de março de 2017 observa-se a progressiva diminuição do volume praial, com o menor atingido em novembro de 2017, $\sim 100 \text{ m}^3$.

Ao longo do período de monitoramento, observações visuais dos estágios morfodinâmicos foram documentados para todos os perfis. De modo geral o estágio mais frequente é de banco e calha longitudinal (43,21%), predominante no arco Recreio-Barra, seguido do estágio banco e praia de cúspides (33,63%), predominante na praia da Macumba. Em cerca de 15% do período de monitoramento, houve a ocorrência do estágio refletivo nos perfis do arco Macumba, enquanto que o outro extremo, o estágio dissipativo, foi registrado cerca de 13% do tempo no extremo leste do arco Recreio-Barra. Ainda neste último setor, entre o P6 e o P11 foi registrada a ocorrência do estágio bancos transversais ($\sim 10\%$). Por fim, no P10 e no P11, o estágio terraço de baixa mar foi documentado em 20% dos registros.

Figura 78 – Estágios morfodinâmicos observados nos arcos praias Macumba e Recreio-Barra.



Fonte: A autora, 2019.

6.3 Transporte longitudinal

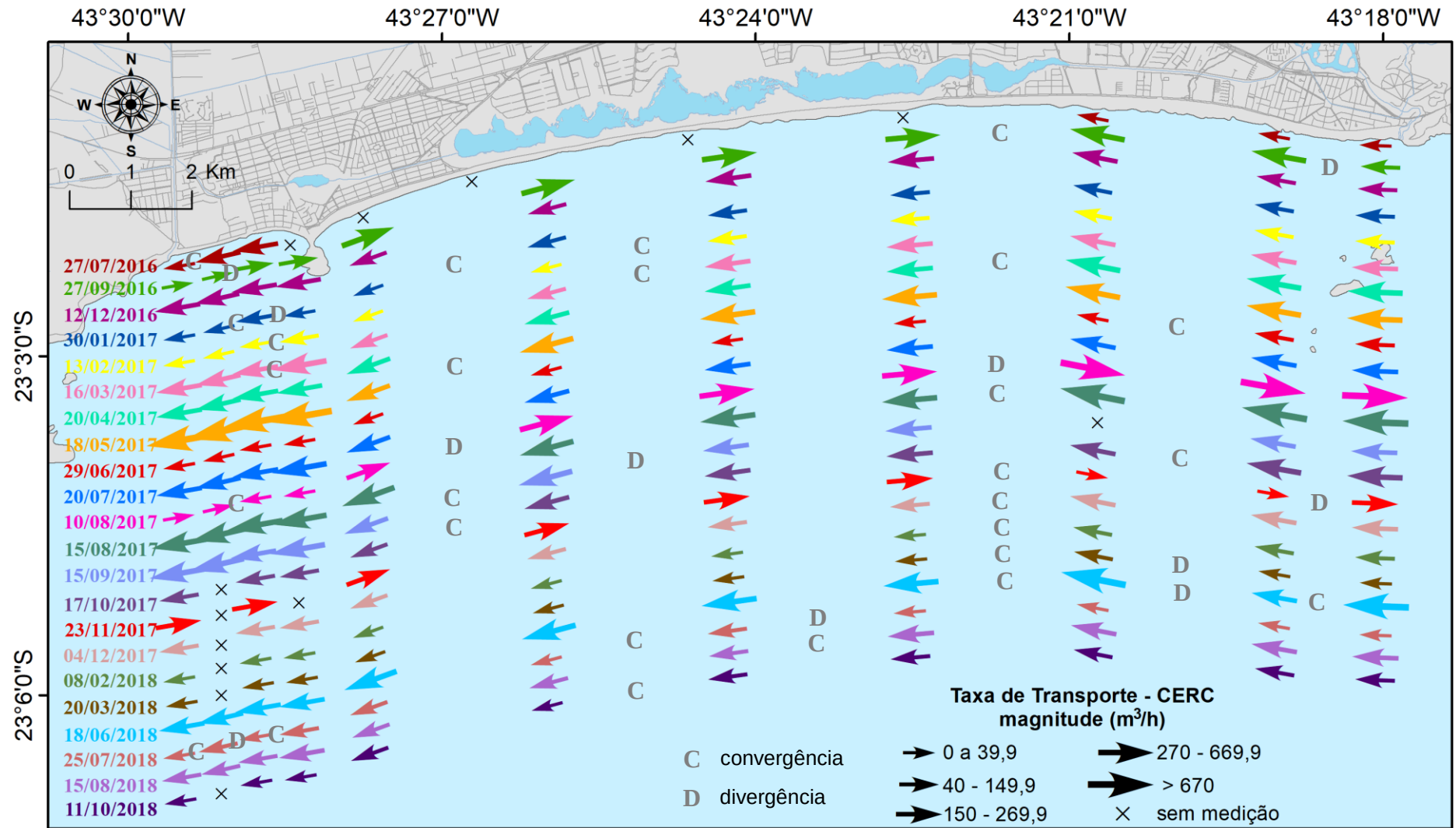
De modo geral, as taxas estimadas a partir dos três modelos de cálculo do transporte longitudinal, em cada ponto de monitoramento para cada dia de levantamento, apresentaram diferenças nas magnitudes calculadas: os resultados obtidos pelo modelo CERC variaram entre -1047 e $1353 \text{ m}^3/\text{h}$, pelo modelo de Kamphuis variaram entre -415 e $194 \text{ m}^3/\text{h}$ e pelo modelo de Bayram, entre -35 e $246 \text{ m}^3/\text{h}$. Em todos os modelos, nota-se o predomínio do transporte para oeste, sendo que o transporte para leste foi estimado apenas para três datas: 27/09/2016, 10/08/2017 e 23/11/2017.

A partir do modelo da CERC (Figura 79), nota-se que ao longo da praia da Macumba as taxas de transporte apresentaram classes de magnitudes similares. Em alguns momentos observa-se a convergência do transporte no setor leste da praia (em fevereiro e março de 2017 e julho de 2018) e a divergência no setor central (em setembro de 2016 e julho de 2018). No arco praial Recreio-Barra verifica-se a maior frequência de áreas de convergência entre os setores central e leste da praia, bem como no setor oeste. Em toda área de estudo, as maiores taxas foram estimadas para setembro de 2016, maio, agosto e setembro de 2017 e junho de 2018.

Segundo os resultados estimados pelo modelo de Kamphuis (Figura 80), na Macumba são mais frequentes áreas de divergência de transporte no setor central e convergência nos demais setores da praia. Ao longo do arco Recreio-Barra alternam-se áreas de convergência e divergência de transporte, nas diferentes datas de monitoramento, com maior frequência de áreas de convergência nos setores leste e oeste e de divergência nos setores central e extremo leste. Para os dois arcos praias, as maiores taxas foram estimadas para setembro e dezembro de 2016, maio, julho, agosto e novembro de 2017 e junho de 2018.

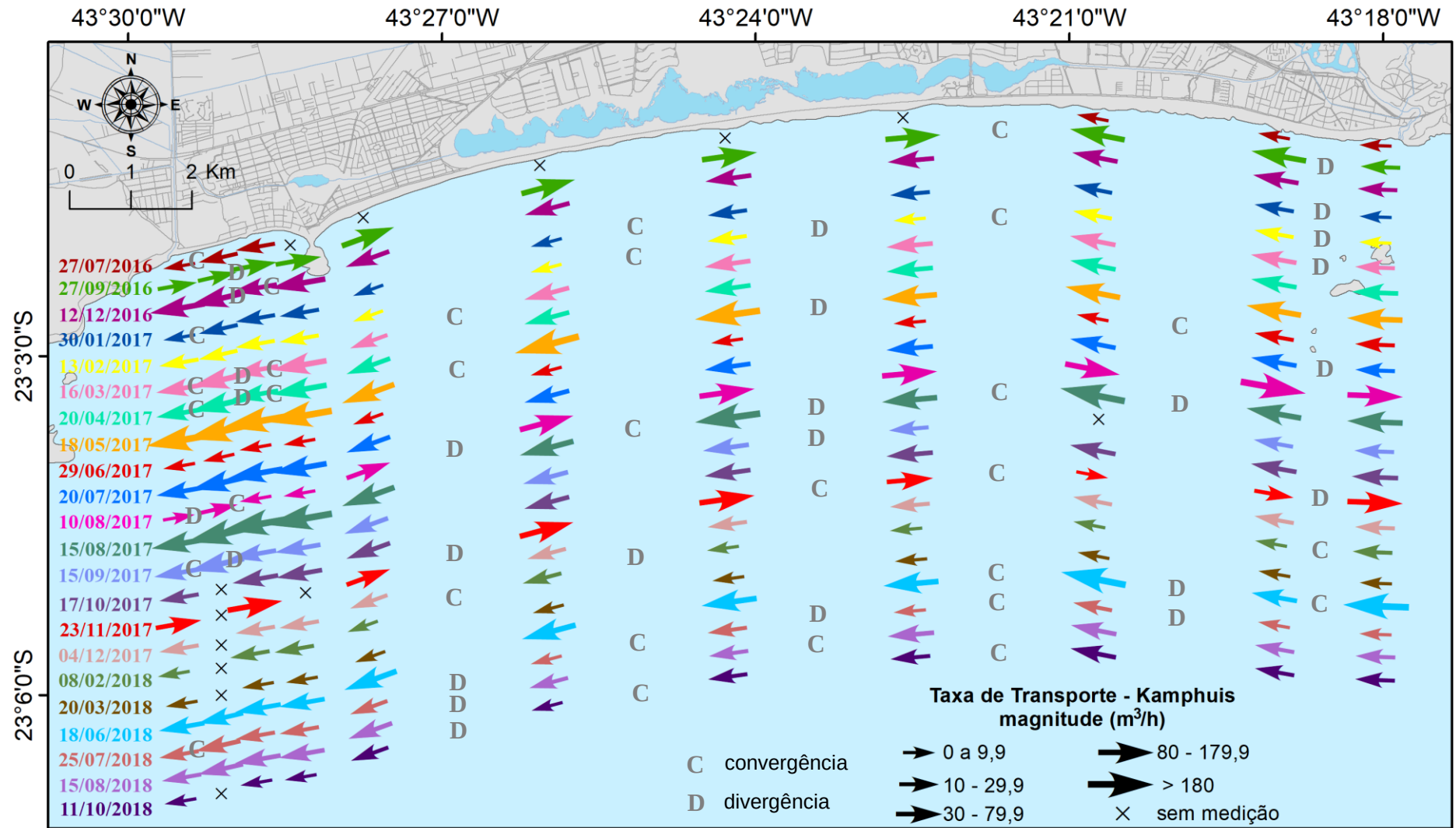
Conforme o modelo de Bayram (Figura 81), na praia da Macumba não há padrões definidos de convergência e divergência do transporte, com alguns momentos de divergência no setor oeste (março e maio de 2017 e julho de 2018) e convergência no setor central (junho de 2017 e julho de 2018). Já no arco Recreio-Barra verifica-se maior frequência de áreas de divergência no extremo oeste e na área centro-leste, enquanto que nas demais áreas há maior frequência de cenários de convergência de transporte. Ao longo de toda a área de estudo, as maiores taxas foram estimadas para setembro de 2016, maio, agosto, setembro e novembro de 2017 e junho de 2018.

Figura 79 – Taxas de transporte longitudinal obtidas usando o modelo CERC.



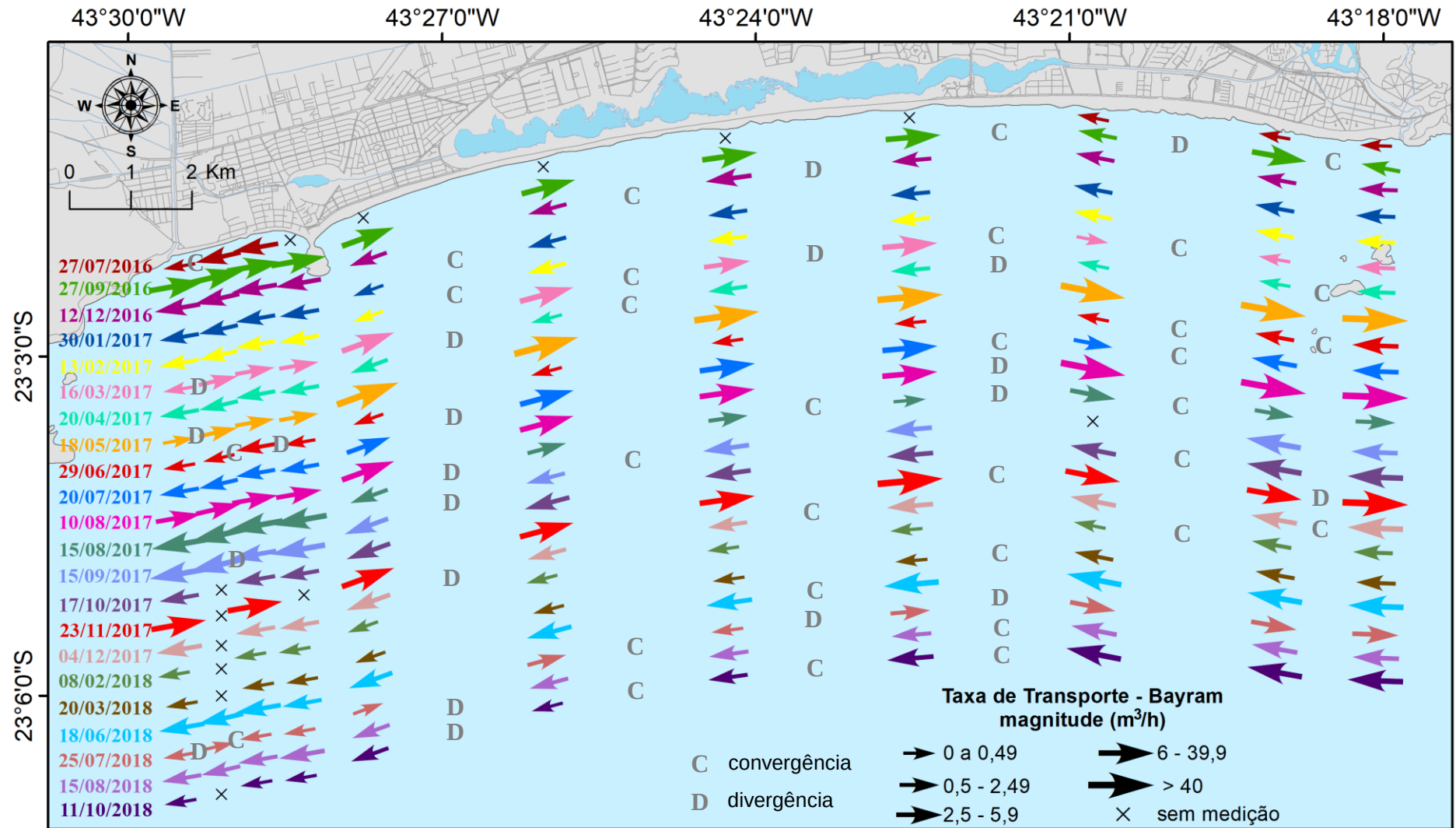
Fonte: A autora, 2019.

Figura 80 – Taxas de transporte longitudinal obtidas usando o modelo de Kamphuis.



Fonte: A autora, 2019.

Figura 81 – Taxas de transporte longitudinal obtidas usando o modelo de Bayram.



Fonte: A autora, 2019.

Ao longo de dois anos de monitoramento, foram definidas duas condições de tempo bom e duas de tempestade:

- a) tempo bom 1 (*B1_LST*): de dezembro de 2016 a março de 2017;
- b) tempestade 1 (*T1_LST*): de abril a outubro de 2017;
- c) tempo bom 2 (*B2_LST*): de novembro de 2017 a março de 2018;
- d) tempestade 2 (*T2_LST*): de junho a outubro de 2018.

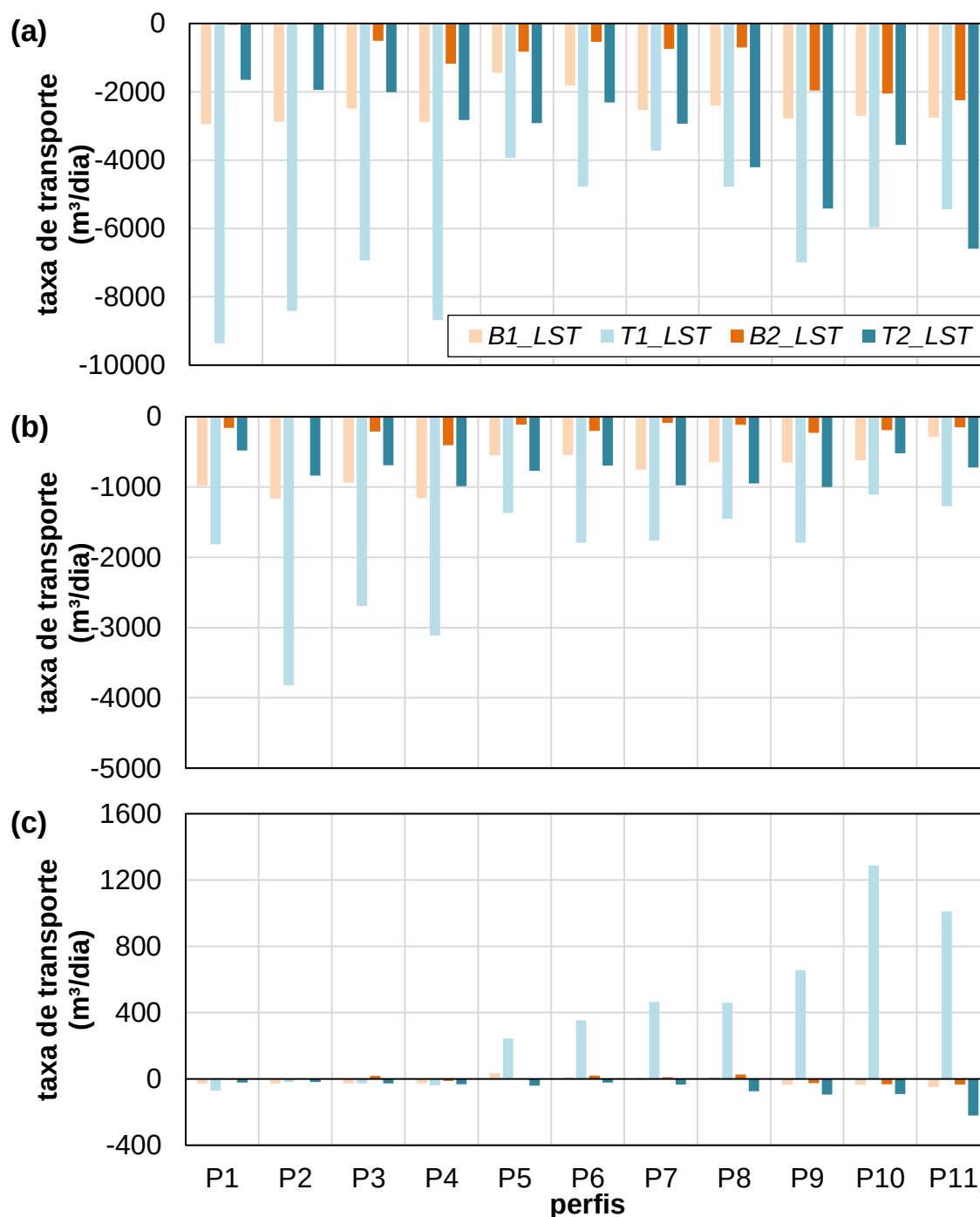
A partir destas definições foram calculadas as estimativas de transporte diárias médias para cada condição (Figura 82). As estimativas calculadas a partir do modelo CERC (Figura 82a), mostram que as taxas estimadas nos períodos *B1_LST* (média de $-2511 \text{ m}^3/\text{dia}$) e *T1_LST* (média de $-6273 \text{ m}^3/\text{dia}$) são maiores que nos períodos *B2_LST* (média de $-1078 \text{ m}^3/\text{dia}$) e *T2_LST* (média de $-3305 \text{ m}^3/\text{dia}$), respectivamente, e todas com sentido oeste. Em geral as taxas para o período *T1_LST* foram superiores em quase toda a linha de costa, exceto no setor leste do arco Recreio-Barra, onde as taxas do período *T2_LST* foram iguais ou superiores ao *T1_LST*.

Assim como no modelo CERC, no modelo de Kamphuis a mesma tendência foi verificada (Figura 82b), com *B1_LST* (média de $-753 \text{ m}^3/\text{dia}$) e *T1_LST* (média de $-1999 \text{ m}^3/\text{dia}$) maiores que *B2_LST* (média de $-186 \text{ m}^3/\text{dia}$) e *T2_LST* (média de $-784 \text{ m}^3/\text{dia}$), respectivamente. Ressalta-se que as taxas durante os períodos *B1_LST* e *T1_LST* foram maiores na Macumba, que no arco Recreio-Barra.

Diferente dos modelos anteriores, no modelo de Bayram (Figura 82c) as taxas para os períodos *B1_LST* e *B2_LST* mostram valores muito baixos (média $< -17 \text{ m}^3/\text{dia}$), e o período *T1_LST* apresentou taxas médias maiores que o período *T2_LST*, média de 393 e $-62 \text{ m}^3/\text{dia}$, respectivamente. Outro ponto a ser destacado, deve-se ao fato do transporte médio, para cada período analisado, ter sentido oeste na praia da Macumba e sentido leste no arco Recreio-Barra.

Por fim, o transporte resultante após os dois anos de monitoramento, apresentados na Figura 83, indicam comportamentos distintos da dinâmica sedimentar de acordo com cada modelo. Por meio do modelo CERC, o transporte resultante é para oeste, com valores similares na praia da Macumba, $\sim 3270 \text{ m}^3/\text{dia}$ e valores superiores a $4000 \text{ m}^3/\text{dia}$ no setor leste do arco Recreio-Barra.

Figura 82 – Estimativa do transporte de sedimentos nos arcos Macumba e Recreio-Barra em períodos de tempo bom e de tempestade.



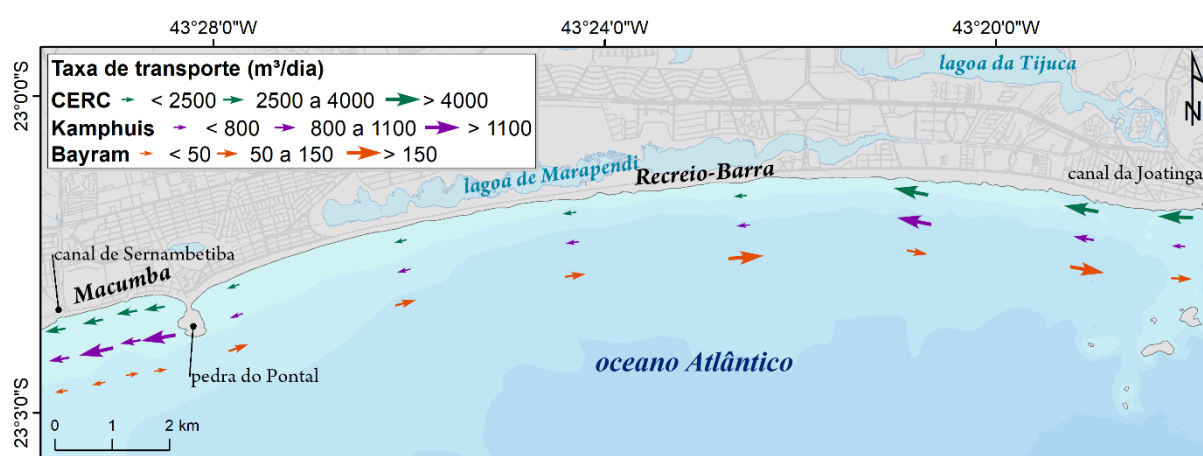
Legenda: (a) estimativas obtidas a partir do modelo CERC; (b) estimativas obtidas a partir do modelo Kamphuis; (c); estimativas obtidas a partir do modelo Bayram; B1_LST (período de tempo bom) – dez/2016 a mar/2017; T1_LST (período de tempestade) – abr/2017 a out/2017; B2_LST (período de tempo bom) – nov/2017 a mar/2018; T2_LST (período de tempestade) – jun/2018 a out/2018.

Nota: Valores médios apresentados em m^3/dia . Valores positivos indicam transporte para leste, enquanto que valores negativos expressam transporte para oeste.

Fonte: A autora, 2019.

O modelo de Kamphuis mostra sentido semelhante ao CERC, para oeste, porém observam-se pontos de divergência e convergência na praia da Macumba e valor superior a $1100 \text{ m}^3/\text{dia}$ no centro-leste do arco Recreio-Barra. Já pelo modelo de Bayram, nota-se uma clara divergência na praia da Macumba, onde há o transporte para oeste do centro da praia até o canal de Sernambetiba e para leste, do centro até a Pedra do Pontal. No arco Recreio-Barra o transporte é para leste, com as maiores taxas no centro e leste da praia.

Figura 83 – Transporte longitudinal resultante nos arcos praias Macumba e Recreio-Barra após dois anos de monitoramento.



Nota: Valores médios apresentados em m^3/dia .

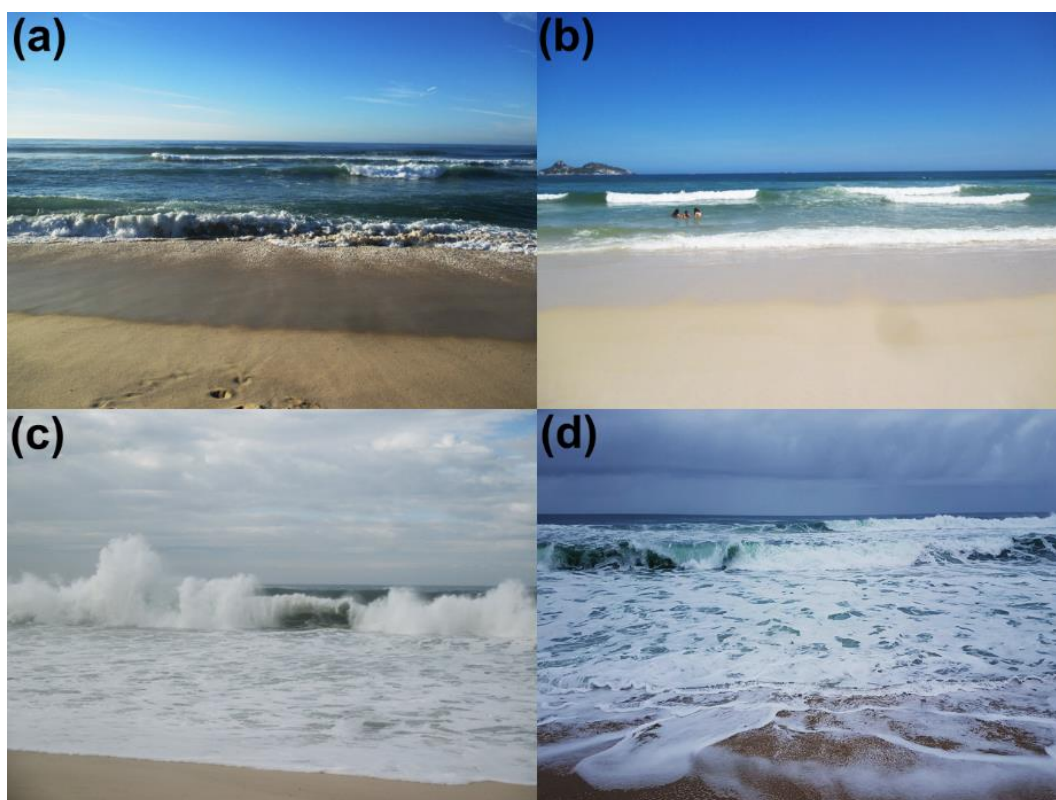
Fonte: A autora, 2019.

6.5 Discussão

A análise do registro de ondas permitiu observar que no período entre abril e outubro há maior frequência de ondas de maior altura e período, configurando momentos de maior agitação marítima próximo à costa, sempre associadas às direções de quadrante sul, fato já observado no mesmo arco praial por Bulhões (2010) e Nemes, Criado-Sudau e Gallo (2019) e em outros locais do litoral fluminense por Klumb-Oliveira, Pereira e Leão (2015), Lins-de-Barros, Klumb-Oliveira e Lima (2018); Machado, Alves e Fernandez (2010) e Parente, Nogueira e Ribeiro (2015). Outra característica marcante ratificada neste trabalho refere-se à refração das ondas de águas profundas que chegam a águas rasas, em que as ondas de leste são refratadas para sul e sudeste ao atingirem o litoral (Figura 72c).

Ao longo dos dois anos de monitoramento dos arcos praias Macumba e Recreio-Barra, observou-se que o tipo de quebra mergulhante (ondas destrutivas, segundo Bird, 2008) foi mais frequente em momentos de tempestade, entre abril e outubro, enquanto o tipo de quebra colapsante foi mais frequente durante momentos de tempo bom, de novembro a março (Figura 84). Em trabalho realizado por Bulhões (2010), além destes dois tipos de quebra, o autor também verificou a presença do tipo deslizante, porém não foi feita nenhuma análise sobre em qual período do ano estes tipos foram mais frequentes, inviabilizando comparações entre os resultados encontrados pelo autor e este trabalho.

Figura 84 – Tipos de quebra de ondas na área de estudo.



Legenda: (a) quebra do tipo colapsante, no P1 em 13/02/2017; (b) quebra do tipo colapsante, no P10 em 16/03/2017; (c) quebra do tipo mergulhante, no P5 em 18/05/2017; (d) quebra do tipo mergulhante, no P6 em 15/08/2017.

Fonte: (a) a (c) A autora, 2017; (d) Pena, 2017.

A importância das ondas mergulhantes na ressuspensão dos sedimentos de fundo e na contribuição para o transporte sedimentar já foi abordada por diversos autores (e.g. AAGAARD; GREENWOOD; HUGHES, 2013; BEACH; STERNBERG, 1996; CHRISTENSEN; JENSEN; MAYER, 2000; KANA, 1979; VOULGARIS; COLLINS, 2000; YANG et al., 2017). Segundo Voulgaris e Collins (2000) a ressuspensão dos sedimentos seria mais dependente dos processos de quebra da onda, que da turbulência da camada limite e a

distribuição vertical do material em suspensão seria controlada por vórtices induzidos pela quebra das ondas. De acordo com Yang et al. (2017), apesar da modelagem numérica realizada por eles indicarem fluxo direcionado à costa em condição de onda mergulhante, observações de longo prazo mostram que as praias apresentam caráter de acreção em condições de *swell*, porém não sob condições de ondas mergulhantes, quando o transporte é notadamente em direção ao mar.

Neste sentido, as ondas mergulhantes na área de estudo além de disponibilizar mais sedimentos na coluna d'água, por meio da ressuspensão, teriam um papel importante no incremento das taxas de transporte longitudinal em condições de tempestade, quando há maior frequência destas ondas e mais registros de altas taxas de transporte longitudinal. Além disto, 47% das ondas mergulhantes estiveram associadas a perfis praias erosivos.

No tocante à cobertura sedimentar, a gradação lateral dos sedimentos, dos mais grossos para os mais finos de oeste para leste, foi verificada anteriormente neste mesmo arco praias por Coutinho (2007) e em outros setores do litoral fluminense voltados para o quadrante sul, como na restinga da Marambaia por Borges (1990) e na restinga da Massambaba por Muehe e Carvalho (1993) e Bentes (1998). De acordo com Muehe e Carvalho (1993), esta gradação lateral sugere o reflexo da cobertura sedimentar da plataforma continental adjacente.

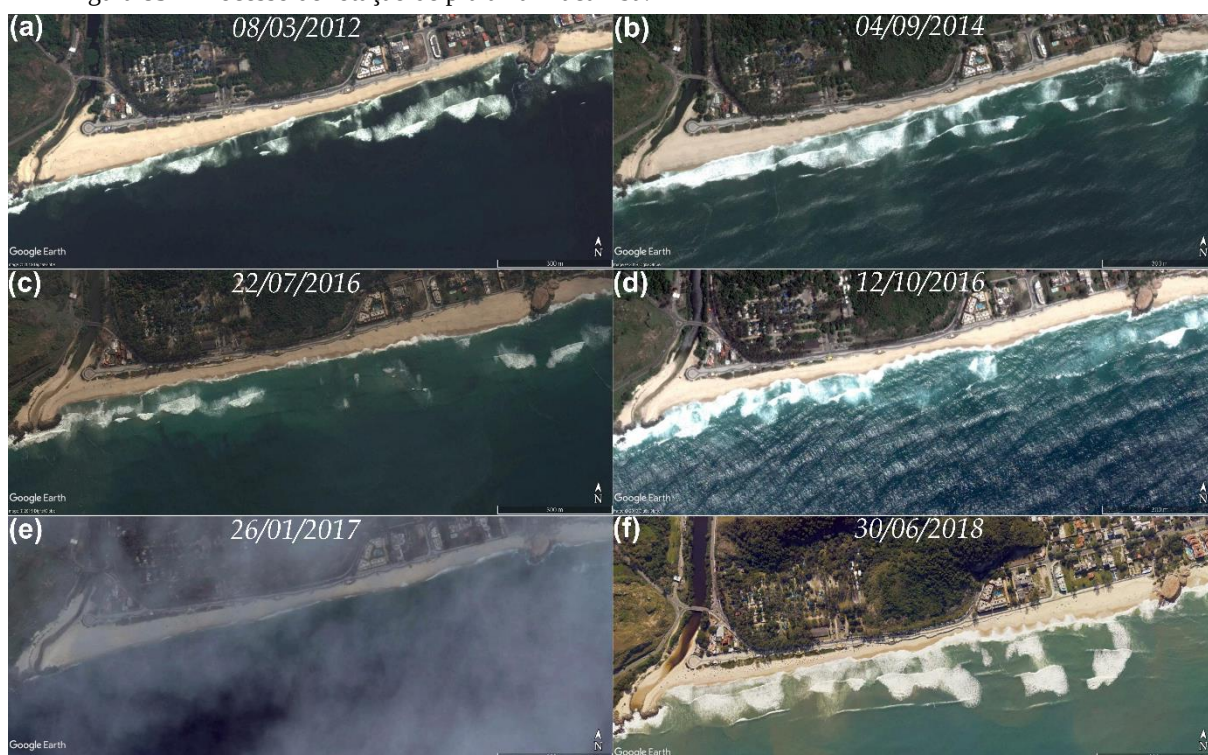
O afinamento dos sedimentos para leste pode ser um indicativo do transporte longitudinal atuando seletivamente, onde os sedimentos mais finos são mais facilmente remobilizados pelas ondas e transportados passivamente pelas correntes (BIRD, 1996, 2008). Esta hipótese se apoia no fato de que há uma maior frequência de amostras assimetricamente positivas, principalmente nos perfis P1 e P3 a P7, indicando remoção seletiva dos sedimentos mais grossos, que podem ser tanto transportados longitudinalmente, quanto transversalmente a costa. Amostras assimetricamente negativas, que indicam adição de sedimentos mais grossos ou remoção seletiva dos sedimentos mais finos, foram registradas apenas em alguns momentos ao longo do período de monitoramento. Relacionando estas características às estimativas de transporte longitudinal na área (Figura 79; Figura 80; Figura 81), pode-se deduzir que em março de 2017, no P1, e em novembro de 2017, no P7, P9 e P10 houve remoção seletiva dos finos e em julho, junho e outubro de 2017, no P2, P5 e P6, respectivamente, houve adição de sedimentos mais grossos à amostra.

Relativo à topografia, de modo geral, os perfis monitorados nos arcos praias Macumba e Recreio-Barra apresentaram tendência de acreção até abril de 2017, sendo fortemente erodidos em maio, julho e agosto de 2017, recuperando a largura inicial e erodidos

novamente em julho de 2018. Logo, verifica-se a tendência de diminuição da largura e do volume em relação ao valor médio dos perfis praias durante o período de tempestade (abril a outubro) e posterior recuperação no período de tempo bom (novembro a março). Exceção à regra é o P11, em que após perder ~30% de sua largura e volume na tempestade de agosto de 2017, só recuperou seu valor médio em agosto de 2018.

Um processo relevante na área de estudo é o efeito da rotação de praia na Macumba, entre o setor adjacente ao canal de Sernambetiba, próximo ao P1, e o afloramento rochoso que divide a praia ao meio, próximo ao P2. Nos perfis topográficos esse processo não foi registrado, porém é possível verificá-lo a partir de imagens de satélite de alta resolução espacial (Figura 85). Nota-se que quando há incidência de ondas de SE, o setor próximo ao canal encontra-se mais largo (Figura 85a, b, e), enquanto que durante a incidência de ondas de S, o setor próximo ao afloramento é mais largo (Figura 85c, d, f). De acordo com Harley, Turner e Short (2015), variações nos fluxos de transporte em direção à costa (*onshore*) e ao mar (*offshore*) seriam controladas pelo gradiente longitudinal da altura da onda na zona de arrebentação e ocasionariam o processo de rotação, indicando que variações no transporte transversal são mais significantes que o transporte longitudinal.

Figura 85 – Processo de rotação de praia na Macumba.

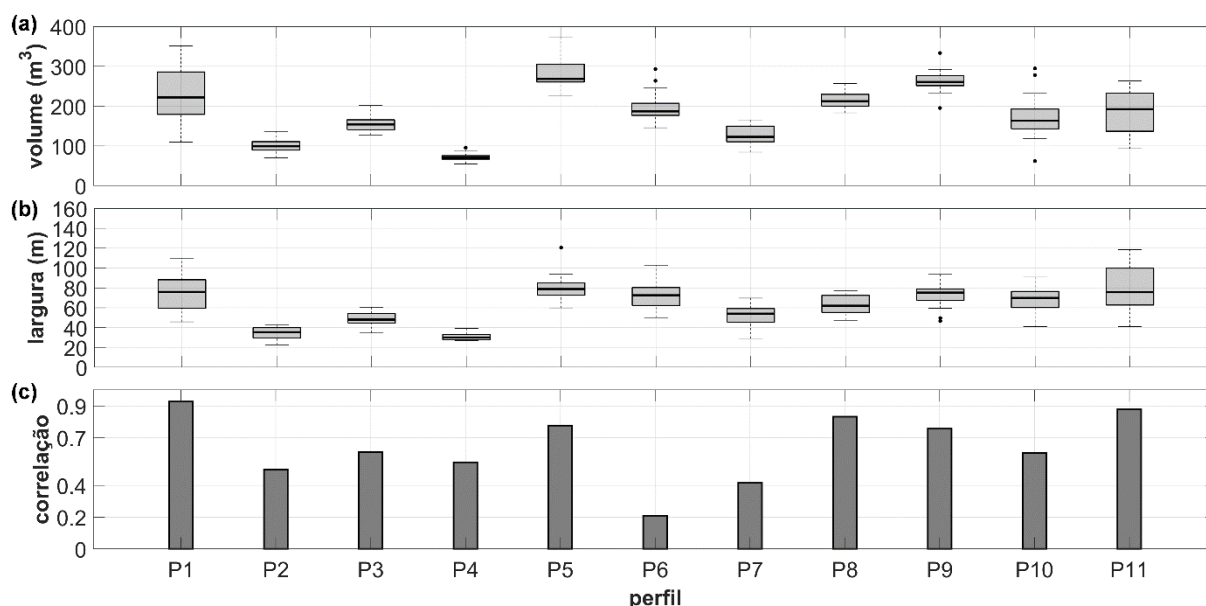


Legenda: imagem de satélite DigitalGlobe de (a) 08/03/2012; (b) 04/09/2014; (c) 22/07/2016; (d) 12/10/2016; (e) 26/01/2017; (f) 30/06/2018.

Fonte: Google Earth Pro, 2019.

Na Figura 86 são apresentadas as variações de largura e volume por perfil para todo o período de monitoramento. Observa-se que próximo aos canais de Sernambetiba (P1) e da Joatinga (P11) há as maiores variações de largura e volume, estando fortemente correlacionadas, ou seja, quando há o aumento da largura, há também o aumento do volume, e vice e versa. Os outros três pontos da praia da Macumba (P2, P3 e P4) apresentam pouca variação de largura e volume, com correlação moderada. No arco Recreio-Barra, a variabilidade é um pouco maior que na Macumba, com fraca correlação no P6 e P7, indicando, nestes dois pontos, que o aumento da largura do perfil não necessariamente remete à um aumento de volume, ou o contrário.

Figura 86 – Variabilidade do volume e da largura nos perfis dos arcos praias Macumba e Recreio-Barra.



Legenda: (a) *boxplot* com a variação do volume; (b) *boxplot* com a variação da largura; (c) correlação entre volume e largura.

Fonte: A autora, 2019.

Todos os estágios morfodinâmicos foram observados nos arcos praias (Figura 87), sendo que os estágios banco e calha longitudinal e banco e praia de cúspides foram os mais frequentes em todos os perfis (Figura 78). Contudo foi verificado que os estágios terraço de baixa mar e bancos transversais foram registrados em momentos de maior agitação marítima, entre abril e outubro. Excetuando-se o estágio dissipativo, Bulhões (2010) encontrou a predominância dos estágios terraço de baixa mar e refletivo no arco praias Recreio-Barra entre os anos de 2004 e 2005, porém não descreveu a variação intra-anual destes estágios, fato que possibilitaria compreender se houve mudanças ou não, entre aquele e este estudo, na resposta morfodinâmica em condições de tempo bom e tempestade.

Recentemente, Criado-Sudau (2016) e Nemes et al. (2018) avaliaram as condições hidrodinâmicas locais e a resposta morfodinâmica, frente a presença de um afloramento rochoso submerso, no setor central do arco praial Recreio-Barra. A partir de medições *in situ*, com perfiladores acústicos e derivadores humanos, Criado-Sudau (2016) verificou que na área existem três padrões de circulações dominantes: (1) correntes de retorno em 68% dos casos analisados; (2) células de circulação quando a altura das ondas é maior ou igual a 1 m e a incidência é normal à linha de costa; e (3) correntes longitudinais em sentido oeste quando à inclinação das ondas em relação à linha de costa é maior que o habitual, oriundas de SSE. Nemes et al. (2018) constatou que as mudanças na morfologia praial podem ser tanto de deposição, com formação de bancos arenosos, como de erosão, com construção de canais e estão estritamente relacionadas ao ângulo de incidência das ondas.

Figura 87 – Estágios morfodinâmicos na área de estudo.



Legenda: (a) P11 em 16/03/2017; (b) P7 em 25/07/2018; (c) P9 em 20/04/2017; (d) P10 em 11/10/2018; (e) P11 em 25/07/2018; (f) P2 em 27/09/2016.

Nota: Perfis esquemáticos de Short e Jackson (2013).

Fonte: A autora, 2019.

Sobre os processos envolvidos na mudança de um estágio para outro, Aagaard, Greenwood e Hughes (2013) verificaram que os gradientes de transporte *offshore* na zona de surfe no estágio terraço de baixa mar resultam em erosão da calha e deposição dos sedimentos em direção ao mar, formando uma barra na antepraia superior, dando início a construção do estágio banco e calha longitudinal. Ranasinghe et al. (2004) observaram que a transição entre o estágio praia de cúspide e bancos transversais se dá com (a) a formação de bancos de areia

na barra longitudinal devido ao transporte em direção à costa causado por um forte fluxo nesta direção; (b) formação de extensões destas barras na direção da costa, em suas extremidades, devido à acreção na confluência dos canais formados pelas correntes de retorno; e (c) a combinação destes dois tipos de bancos e o eventual acoplamento com a praia. Já entre a transição do estágio bancos transversais e banco e calha longitudinal, os autores verificaram (a) erosão nos bancos transversais e deposição do material erodido nos canais das correntes de retorno, diminuindo a variabilidade da morfologia e (b) enfraquecimento da circulação de retorno.

A fim de verificar com maior detalhe a resposta morfodinâmica a um evento de tempestade, foram analisados os registros adquiridos nas primeiras horas do evento de tempestade de 10/08/2017 ($H_s = 4$ m; $T = 14$ s; $Dir = SE$), cinco dias após, em 15/08/2017 e um ano depois, em 15/08/2018 (Figura 88). Em geral, os perfis diminuíram $\sim 15\%$ e $\sim 11\%$ em relação a largura e volume médios, respectivamente, após 5 dias do evento, registrando-se recuo e erosão máximos de 40 m e 80 m^3 , respectivamente. Um mês após a tempestade (setembro de 2017), 54% da área recuperou sua largura e volume médios.

Um ano após o evento, todos os perfis recuperaram sua largura média, no entanto nota-se um déficit em relação ao volume médio, estando em média 11% abaixo. Uma exceção à este padrão, é o P11: após a tempestade, registrou-se recuo de 33 m e erosão de 80 m^3 , valores $\sim 30\%$ abaixo da largura e volume médio para o perfil. Consecutivamente o perfil foi estreitando-se e diminuindo o volume até agosto de 2018, quando sua largura se recompôs, estando 50% acima do valor médio e a diminuição do volume recuou em 9%.

Quanto aos estágios morfodinâmicos, no dia 11/08/2017, havia predomínio do estágio praia de cúspides na praia da Macumba, e em parte do extremo oeste e setor leste do arco Recreio-Barra, seguindo do estágio bancos transversais nos setores oeste e central e terraço de baixa mar, adjacente ao canal de Sernambetiba. Após o evento houve o predomínio do estágio banco e calha longitudinal nos dois arcos praias. Fato semelhante foi reportado por Ranasinghe et al. (2004) em Palm Beach, Austrália, onde a morfologia foi “resetada” durante eventos de tempestade, resultando no estágio banco e calha longitudinal.