

# QUANTIFICAÇÃO DE SEDIMENTOS TRANSPORTADOS POR CORRENTES NAS PRAIAS OCEÂNICAS DE SALINÓPOLIS, NORDESTE DO PARÁ, BRASIL

Leilanne Almeida RANIERI <sup>1</sup> & Maâmar EL-ROBRINI <sup>2</sup>

(1) Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – IG/UFPA. Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros – GEMC/CNPQ. Avenida Augusto Corrêa, 1. Prédio da Biblioteca Setorial (Raimundo M.G. Montalvão), Sala 3. CEP 66075-110. Belém, PA.

Endereço eletrônico: leilanne.ranieri@gmail.com

(2) Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – IG/UFPA. Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros – GEMC/CNPQ.

Endereço eletrônico: robrini@ufpa.br

Introdução

Área de estudo

Materiais e métodos

Apresentação dos dados

Discussão

Processos físicos costeiros

Quantificação e qualificação dos sedimentos transportados

Conclusões

Agradecimentos

Referências bibliográficas

**RESUMO** – A costa amazônica apresenta extensos ambientes de sedimentação, fortes correntes de maré (até 2 m/s), alto índice pluviométrico (>2.500 mm/ano), ampla drenagem fluvial e numerosos estuários. O artigo quantifica sedimentos transportados em três setores de praias em Salinópolis/Pa: oeste, central e leste. Foram realizadas campanhas de campo durante a estação chuvosa (26-28/04/2013) e estação menos chuvosa (04-06/10/2013), coletados sedimentos com armadilhas nas praias e dados de ondas e correntes longitudinais. Menores períodos de ondas (<5,35 s) ocorreram durante a maré enchente (setor oeste). Maiores alturas de ondas (>0,86 m) e correntes longitudinais (>0,45 m/s) no setor leste. Houve mais sedimentos transportados longitudinalmente na estação menos chuvosa (mínimo  $28 \times 10^{-2}$  kg/min/m<sup>2</sup>: enchente, setor oeste; máximo  $109 \times 10^{-2}$  kg/min/m<sup>2</sup>: vazante, setor leste). O balanço de sedimentos transportados transversalmente foi menor no setor central (mínimo 80 g; vazante, máximo 690 g; enchente; estação menos chuvosa). A circulação de sedimentos é oriunda, principalmente, do retrabalhamento de depósitos da plataforma continental, desempenhado pelas correntes de marés, podendo alterar o sentido da deriva litorânea em direção à enchente e vazante dos estuários que atravessam a costa. Durante domínio de ondas há maior incremento de areia fina transportada.

**Palavras-chave:** Salinópolis, Praia, Granulometria, Transporte de Sedimentos.

**ABSTRACT** – The Amazon coast has extensive sedimentary environment, strong tidal currents (up to 2 m.s<sup>-1</sup>), high rainfall (> 2,500 mm/year), large river drainage and numerous estuaries. This paper quantified sediment transported in three sectors of beaches in Salinópolis: western, center and eastern. Field campaigns were conducted during the rainy season (in April 26<sup>th</sup>, 27<sup>th</sup> and 28<sup>th</sup>, 2013) and less rainy season (in October 04<sup>th</sup>, 05<sup>th</sup> and 06<sup>th</sup>, 2013), collected sediment with traps in the beaches and data of waves and longshore currents. Shorter period waves (<5.35 s) occurred during the flood tide (western sector). Larger wave heights (>0.86 m) and longshore currents (>0.45 m.s<sup>-1</sup>) in the eastern sector. More sediments were transported longitudinally in the less rainy season (minimum  $28 \times 10^{-2}$  kg.min.m<sup>-2</sup>: flood tide, west sector; maximum  $109 \times 10^{-2}$  kg.min.m<sup>-2</sup>: ebb, east sector). The balance of sediment by cross transportation was lower in the center sector (minimum 80 g; ebb, maximum 690 g; flood; less rainy season). The sediment movement is derived mainly from the reworking of deposits of the continental shelf, made by tidal currents that can change the direction of longshore currents toward the ebb and flow of the estuaries crossing the coast. During waves domain occurs largest increase of transported fine sand.

**Keywords:** Salinópolis, Beach, Grain Size, Sediment Transport.

## INTRODUÇÃO

Na costa amazônica, as praias são dominadas pelo regime de meso-macromarés semi-diurnas que induz a formação de intensas correntes de marés que exercem um importante papel na circulação local, influenciando fortemente o transporte sedimentar litorâneo (Souza Filho & Paradella, 2002; Souza Filho & Paradella, 2003), sendo estas correntes com

velocidade máxima na plataforma continental interna de 2 m/s, durante a maré de sizígia (Segundo, 2007).

Os ventos, as ondas, as marés, as correntes e o transporte litorâneo oriundo destes agentes naturais, têm a dinâmica regida principalmente pela meteorologia local, pelo clima equatorial e pelos padrões físicos e sedimentares de grandes

estuários que se formam na costa amazônica (por exemplo, os do rio Amazonas, Pará, Marapanim, Maracanã, Arapepó, Caeté e Emboraí).

O clima equatorial é marcado fortemente pelo movimento migratório latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Oceano Atlântico Equatorial e, por eventuais anomalias que ocorrem nos oceanos Pacífico e Atlântico (El Niño/La Niña e Dipolo do Atlântico, respectivamente). Estes fatores controlam o nível de precipitação na região amazônica, havendo duas estações definidas: a chuvosa, que ocorre de dezembro a maio, quando a ZCIT desloca-se para o Hemisfério Sul; e a menos chuvosa, que ocorre de junho a novembro, quando a ZCIT desloca-se para o Hemisfério Norte.

Na costa amazônica, os ventos alísios de NE são predominantes e atuam continuamente durante o ano todo, com máximo de dezembro a março, quando se somam aos alísios de SE (Geyer et al., 1996). Entretanto, no NE do Pará, durante a estação menos chuvosa, os ventos predominantes fluem na maior parte de norte-nordeste, enquanto que na estação chuvosa, fluem na direção leste-nordeste, associado ao deslocamento da ZCIT para o Hemisfério Sul.

O município de Salinópolis está localizado no NE do Pará, costa amazônica (Figura 1). A precipitação anual em Salinópolis é cerca de 2.800 mm (Ana, 2013). A velocidade média dos ventos é de 4,10 m/s, sendo a variação predominantemente da direção de 20 a 30°, representada pelos ventos alísios de NE (Cptec, 2014). As ondas são formadas por estes ventos predominantes que ocasionam correntes de deriva litorânea para NW (Geyer et al., 1996). Segundo Cptec (2013), a altura de onda em Salinópolis varia de 0,5 a 1,5 m. As marés são semi-diurnas e podem alcançar alturas próximas a 6 m (macromarés).

Estas características típicas da costa amazônica criam condições peculiares na circulação costeira de sedimentos, que difere de outras regiões do Brasil e do mundo. O elevado volume de precipitação local, a existência de uma ampla drenagem fluvial/estuarina, as macromarés semidiurnas, a alta a moderada energia de ondas, a direção dos ventos quase constante para NE atuando sobre extensa pista (*fetch*) no oceano aberto e nos largos cordões de

praia arenosa e, a interação com a larga plataforma continental Amazônica (até 330 km), que possibilita um maior espaço de acomodação de sedimentos na mesma e na costa amazônica. Diante disso, vastos ambientes de sedimentação ocorrem nesta costa, a exemplo das praias-barreiras, que tem um papel de proteção contra os efeitos do nível do mar e das águas estuarinas. Nestas praias-barreiras pode-se identificar a atuação do transporte de sedimentos por ventos e, o longitudinal e transversal por ondas e correntes.

O transporte por ventos é responsável pelo retrabalhamento dos sedimentos depositados na face praial, quando exposta, por correntes de ar. Já o transporte sólido que ocorre dentro d'água é subdividido em transversal e longitudinal. Estes são capazes de deslocar sedimentos provenientes dos cursos fluviais adjacentes e da plataforma continental interna até a praia, ou recolocá-los na plataforma continental (Machado, 2007). O transporte transversal representa os movimentos de sedimentos ora no sentido continente-oceano (*onshore-offshore*) ora no sentido contrário, enquanto que o transporte longitudinal consiste no encaminhamento dos sedimentos costeiros, paralelo à linha de costa, por correntes oriundas das ondas e marés.

O transporte de sedimentos é um importante fator do desenvolvimento costeiro e sua estimativa muito tem atraído atenção de pesquisadores e engenheiros costeiros. A finalidade do cálculo é avaliar a taxa de transporte longitudinal do material da praia em várias situações (Leont'yev, 2014), visando identificar as características de células de circulação costeira em diferentes trechos da praia, particularmente as zonas de erosão (*barlamar*), transporte e deposição (*sotamar*) de sedimentos.

Neste contexto, a distribuição vertical de sedimentos na coluna d'água e, particularmente, de sedimentos suspensos sendo transportados, tem sido cada vez mais estudada em ambientes costeiros/marinhos durante as últimas décadas, devido às rápidas resposta de sensores óticos ou acústicos para registro de velocidades orbitais de ondas e concentração de sedimentos, que se tornaram mais amplamente disponíveis (Osborne & Greenwood, 1993; Aagaard & Greenwood,

1995; Vincent & Osborne, 1995; Beach & Sternberg, 1996; Voulgaris & Collins, 2000; Cartier & Héquette, 2015).

Tais sensores utilizam o retroespalhamento ótico ou acústico para determinar o Material Particulado em Suspensão (MPS), contudo, as medições com os mesmos podem apresentar limitações em algumas costas de macromarés (Amazônica e Norte da França, por exemplo), sendo uma tarefa difícil por causa do alto teor de matéria orgânica (Vantrepotte et al., 2007; Cartier & Héquette, 2015) e presença de sedimentos de granulação fina em suspensão nas águas costeiras (Chapalain & Thais, 2000) que dificulta a utilização destes dispositivos de alta resolução para medir as concentrações de areia. Além disso, dentro e perto da zona de arrebentação, ondas quebrando geraram bolhas de ar que podem induzir estimativas de concentração de sedimentos errôneas em sensores como OBS (*Optical Backscattering Sensor*), ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) e transmissômetros, especialmente quando as bolhas estão associadas com matéria orgânica (Battisto et al., 1999; Puleo et al., 2006; Cartier & Héquette, 2015).

Devido a estas condições limitantes, armadilhas de sedimentos foram optadas nesta pesquisa para analisar o transporte litorâneo nas praias de macromarés de um dos municípios mais povoados no litoral amazônico oriental, Salinópolis (Figura 1).

## MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo foi dividida longitudinalmente em 3 setores (Figura 1), para finalidade da caracterização pontual do transporte de sedimentos e da hidrodinâmica costeira. No Setor Oeste, situa-se o primeiro seguimento praias (praias da Corvina e do Maçarico), e nos Setores Central e Leste, compreendidos pela Ilha do Atalaia, situa-se o segundo seguimento praias (praias do Farol Velho e Atalaia, respectivamente).

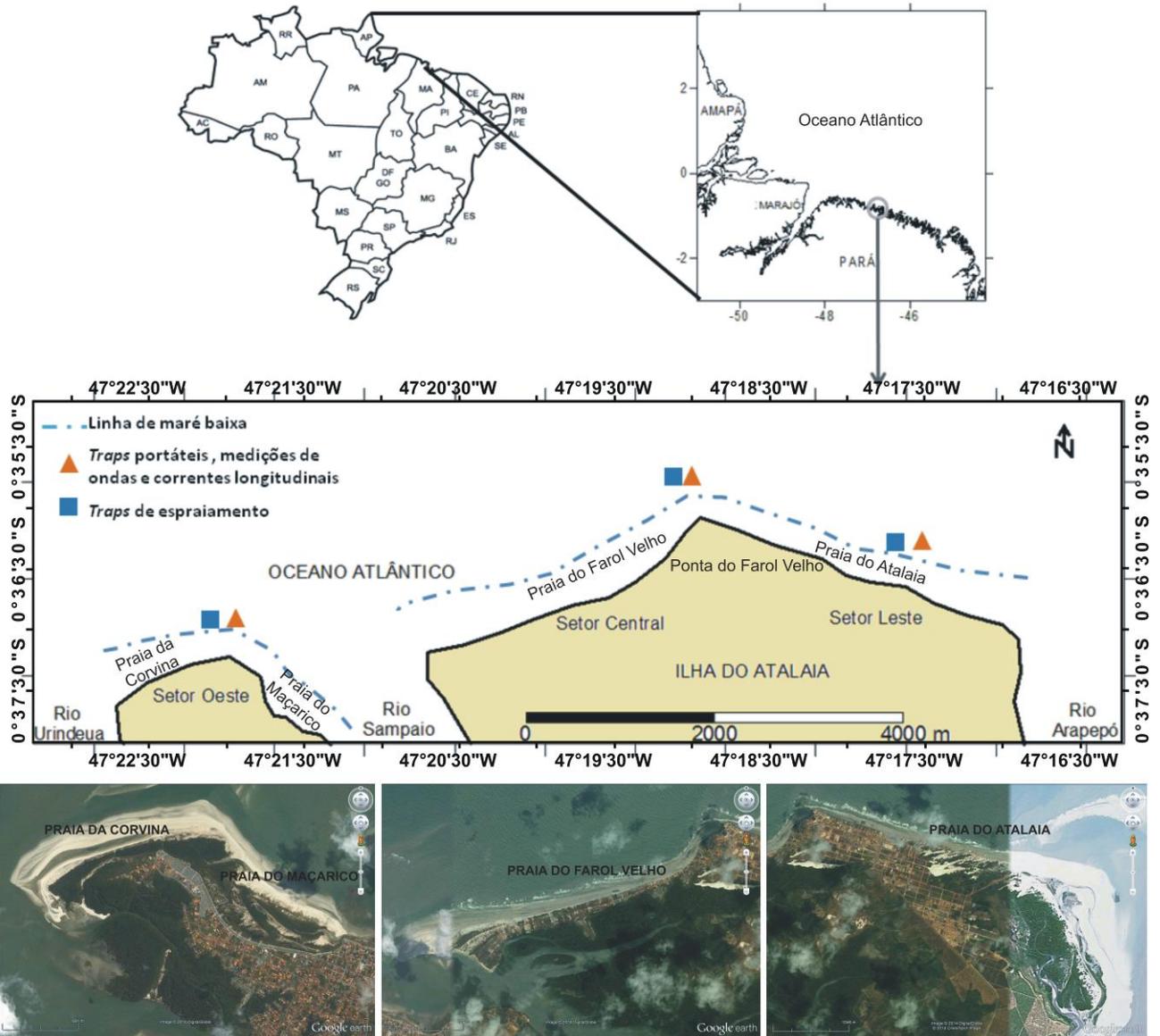
Para divisão transversal das praias, utilizou-se a zonação hidrodinâmica sugerida por Davis (1985), onde a (1) Zona de Espraimento é limitada pela linha de maré alta e baixa de sizígia, e a (2) Zona de *Surf* pela linha de maré baixa de sizígia até a (3) Zona de Arrebentação

Estas armadilhas consistem em: (1) uma rede de captura de sedimentos empregada durante a deriva praias (fluxo e refluxo de ondas) na zona de espraimento e, (2) de um conjunto de redes de captura dispostas à deriva das correntes litorâneas por um suporte metálico colocado na zona de *surf*. Tratam-se de técnicas de medição pontual de transporte de sedimentos, podendo a segunda armadilha medir tanto a distribuição vertical, como a distribuição longitudinal da taxa de transporte de sedimentos e, ambas gerando análise quantitativa e qualitativa dos mesmos. A principal desvantagem do método de armadilhas está associada à necessidade de tempos de coleta muito pequenos (cerca de 5 minutos), podendo refletir uma condição momentânea, sendo estimada a taxa de sedimentos transportados em escala de tempo maior (um ciclo de maré, por exemplo). Apesar destas limitações, o método fornece boa estimativa, especialmente quando aplicado em condições meteorológicas e oceanográficas estáveis.

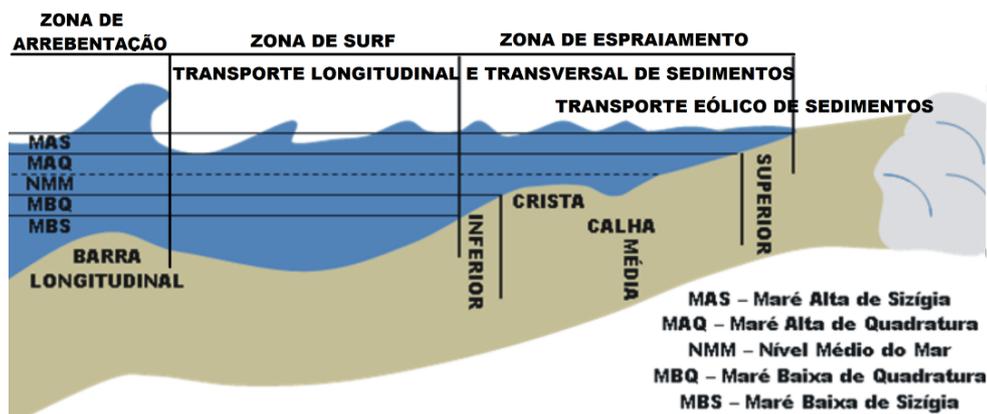
Este artigo mostra a quantificação dos sedimentos circulantes nas praias, visando a identificação de setores erosivos ou deposicionais nas praias oceânicas de Salinópolis. Tal objetivo contribuirá na compreensão do transporte de sedimentos (transversal e longitudinal) na costa amazônica, a luz das condições hidrodinâmicas atuantes.

de ondas (Figura 2). Na primeira ocorrem os fluxos e refluxos de ondas, a propagação das ondas na preamar, o transporte eólico quando a maré está baixa, e os transportes transversal e longitudinal de sedimentos quando a maré está alta. Na segunda zona ocorre a dissipação energética das ondas que quebram nas proximidades da costa na Zona de Arrebentação, conseqüentemente, gerando os transportes transversal e longitudinal de sedimentos.

Foram realizadas campanhas de campo durante um ciclo sazonal: 26, 27 e 28/04/2013 (estação chuvosa) e 04, 05 e 06/10/2013 (estação menos chuvosa) na área de estudo.



**Figura 1.** Mapa de localização das praias dos setores Oeste: Corvina e Maçarico, Central: Farol Velho e Leste: Atalaia, mostrando a metodologia aplicada e os sítios de pesquisa. Imagens dos setores oeste, central e leste, respectivamente (fonte: satélite Spot, em 19/10/2009, retirada do programa Google Earth).



**Figura 2.** Diagrama do perfil de uma praia dissipativa de meso-macromaré segundo a zonação hidrodinâmica de Davis (1985).

Nos 3 setores da costa foram feitas coletas de sedimentos provenientes do transporte transversal na zona de espraiamento utilizando-se uma armadilha (instrumento composto por uma rede de captura de 12,5 x 6 cm) (Figura 3a) ora no sentido contrário ao mar, ora no sentido contrário ao continente. O objetivo foi comparar o volume de sedimentos trazidos e removidos da face praial durante o fluxo e refluxo das ondas.

Também foi aplicado em cada setor, o método dos *traps* portáteis de Kraus (1987) – um conjunto de redes de 63 micrômetros e 15 x 9 cm fixado a uma torre de metal de 1,80 m

(Figura 3d) posicionada em sentido contrário à corrente longitudinal para reter os sedimentos transportados longitudinalmente na zona de *surf*, possibilitando quantificá-los (peso total) e qualificá-los (análise granulométrica) verticalmente, ou seja, ao longo da coluna d'água. O tempo de operação para as duas armadilhas foi de aproximadamente 5 minutos, como sugerido por Fontoura (2004), e realizado durante a maré vazante e maré enchente, como sugerido por Ranieri (2011), visto a grande importância do efeito da maré na costa amazônica.



**Figura 3.** Armadilhas portáteis de coleta de sedimentos. Vista frontal do *trap* de espraiamento (A). Experimentação com *trap* de espraiamento na praia do Farol Velho (B) e com *traps* portáteis na zona de *surf* da praia do Atalaia (C). Suporte com *traps* da zona de *surf*, vista frontal (D). Fotografias retiradas em 28/04/2013.

O fluxo de sedimentos que passa pelos *traps* portáteis é dado por um conjunto de equações (Wang et al., 1998) utilizadas para estimar o cálculo do transporte de sedimentos. O fluxo que passa entre duas redes é calculado pela equação (1). O fluxo total  $I$  que passa através de uma armadilha é calculado pela equação (2).

$$\Delta F_i = \frac{\left( \frac{F_{i+1}}{Z_{i+1}} + \frac{F_{i-1}}{Z_{i-1}} \right) \Delta Z_i}{2} \quad (1)$$

Onde  $\Delta F_i$  é a quantidade de sedimentos que flui no espaço entre dois *traps* adjacentes,  $F_{i+1}$  e  $F_{i-1}$  são as quantidades medidas pelos dois

*traps* em questão (superior e inferior), enquanto que  $Z_{i+1}$  e  $Z_{i-1}$  representam a dimensão vertical da boca do *trap* superior e inferior, respectivamente. A distância  $\Delta Z_i$  é a medida vertical entre dois *traps* adjacentes (Fontoura, 2004).

O fluxo total de sedimentos que passa através de uma estação de medição é dado pela soma dos fluxos individuais ( $F_i$ ) que passam por cada *traps*, somados aos fluxos nos espaços entre cada dois *traps* adjacentes ( $\Delta F_i$ ). O fluxo total é calculado pela equação:

$$I = \sum_{i=1}^N (F_i) + \sum_{i=1}^{N-1} (\Delta F_i) \quad (2)$$

Em laboratório foram realizadas separações por peneiramento, e com auxílio de centrífuga, das diferentes frações granulométricas das amostras de sedimentos coletadas em campo. Utilizou-se a classificação de Wentworth (1922) para definição de sedimentos arenosos e lamosos.

Parâmetros de onda (altura e período) foram observados em cada setor do trecho estudado, através de filmagem de trens de ondas na torre (suporte) dos *traps* portáteis. Utilizando-se a metodologia proposta por Muehe (2002), considerou-se a média das alturas de 1/3 das maiores ondas registradas, obtendo-se assim a altura de onda significativa ( $H_b$ ). Para obtenção do período de ondas ( $T$ ), usou-se o tempo da

passagem das ondas sucessivas filmadas, dividindo este pelo número de ondas.

Para o ângulo de incidência de ondas ( $\alpha$ ) na linha de costa, um observador na face praial com o auxílio de uma bússola Brunton verificou a direção de aproximação delas na zona de arrebentação, obtendo-se dados com média precisão.

Medições complementares de intensidade e direção de correntes longitudinais de superfície foram feitas em cada setor da costa também através de uma bóia de deriva despejada entre o ponto de quebra de onda e a linha de costa, como sugerido por Fontoura (2004). Neste método foram medidas as distâncias percorridas pela bóia em 1 minuto, durante as marés de vazante e enchente. Estas medidas complementam a caracterização pontual da hidrodinâmica durante as experimentações com as armadilhas.

## APRESENTAÇÃO DOS DADOS

Nos experimentos com *traps* portáteis realizados na estação chuvosa, obteve-se maior quantidade de sedimentos transportados longitudinalmente durante a maré enchente (Figura 4a). Nesta fase de maré e nos setores central e leste, as ondas tiveram alturas mais elevadas (>0,76 m) (Figura 4b), menores períodos de propagação (<5,35 s) (Figura 4c) e, as correntes longitudinais de superfície foram mais intensas: 0,30 m/s (setor central) e 0,58 m/s (setor leste) (Figura 4d).

Correntes superficiais para direção E foram verificadas durante a maré enchente, e para direção W durante a maré vazante. Contudo, no setor central, as correntes foram para direção W nas duas fases de maré. Estas situações foram observadas tanto na estação chuvosa como na menos chuvosa, assim como o comportamento do ângulo de incidência das ondas nos setores oeste e leste (Figuras 4e, 4f) que se orientaram em direção oposta (NW) das correntes, durante a maré enchente.

As características dos parâmetros de ondas no momento das experimentações com *traps* portáteis foram similares na estação menos chuvosa (Figura 5).

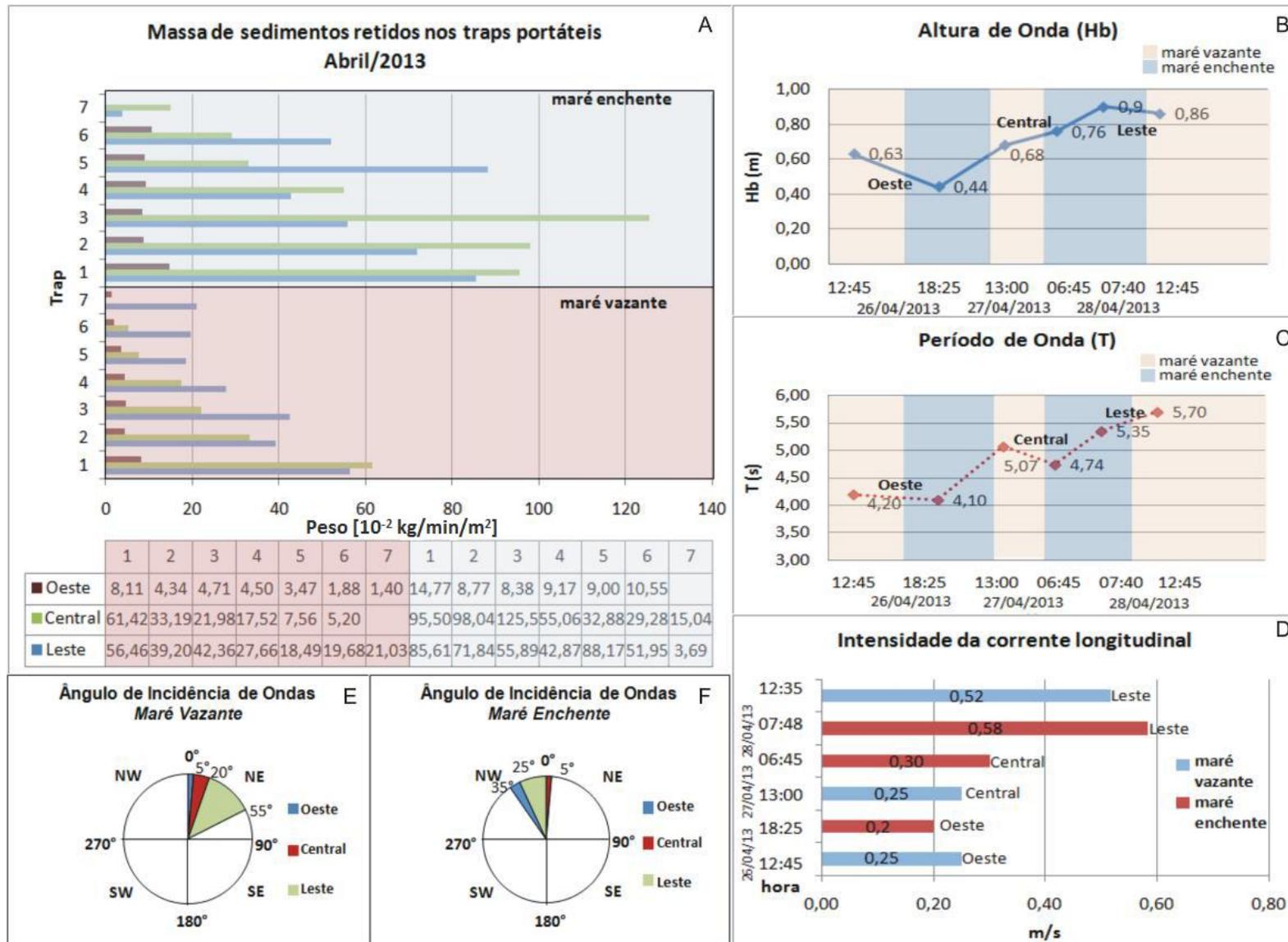
Nesta estação do ano, obteve-se maior fluxo de sedimentos transportados longitudinalmente

do que na estação chuvosa e, principalmente, durante a maré vazante (Figura 5a).

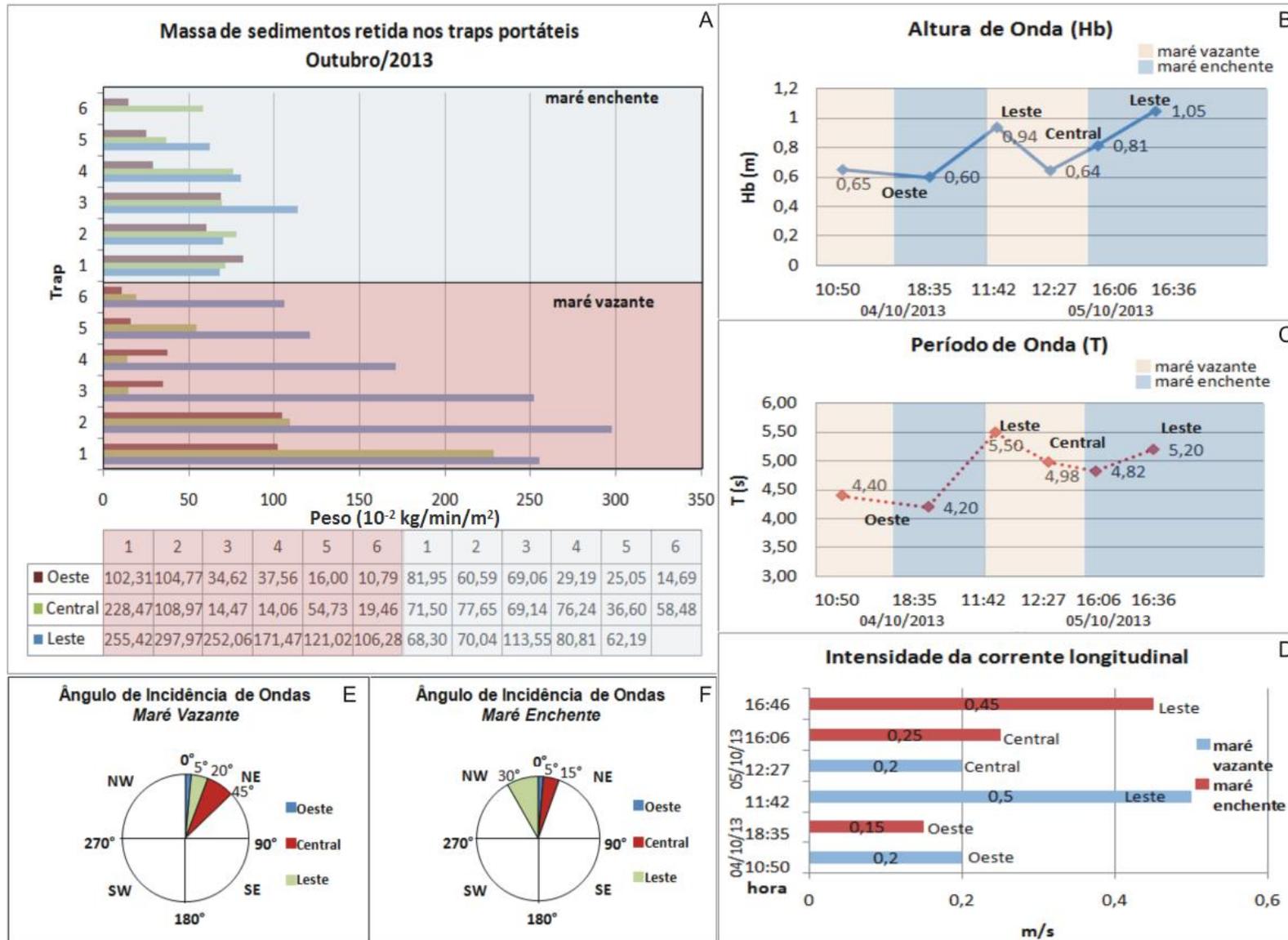
Durante a estação chuvosa a massa de sedimentos retida verticalmente ao longo dos *traps* portáteis foi menos distribuída, a exemplo do que ocorreu nos *traps* do Setor Central, onde se obteve mais sedimentos no fundo do que em suspensão (Figura 4a). Já na estação menos chuvosa, a distribuição vertical exibiu uma tendência um pouco mais aleatória, ou seja, maior quantidade de sedimentos amostrados acima do nível de leito. (Figura 5a).

A massa de sedimentos amostrada nos *traps* portáteis foi bem maior na estação menos chuvosa (Figura 5a). Tanto nesta estação como na chuvosa, os *traps* no setor oeste tiveram menor fluxo de sedimentos coletados e, os do setor leste, o maior fluxo (Figuras 4a e 5a).

Diferentemente do que aconteceu na estação chuvosa, as correntes longitudinais foram mais intensas durante a vazante e, nos setores oeste (0,2 m/s) e leste (0,5 m/s) (Figura 5d).



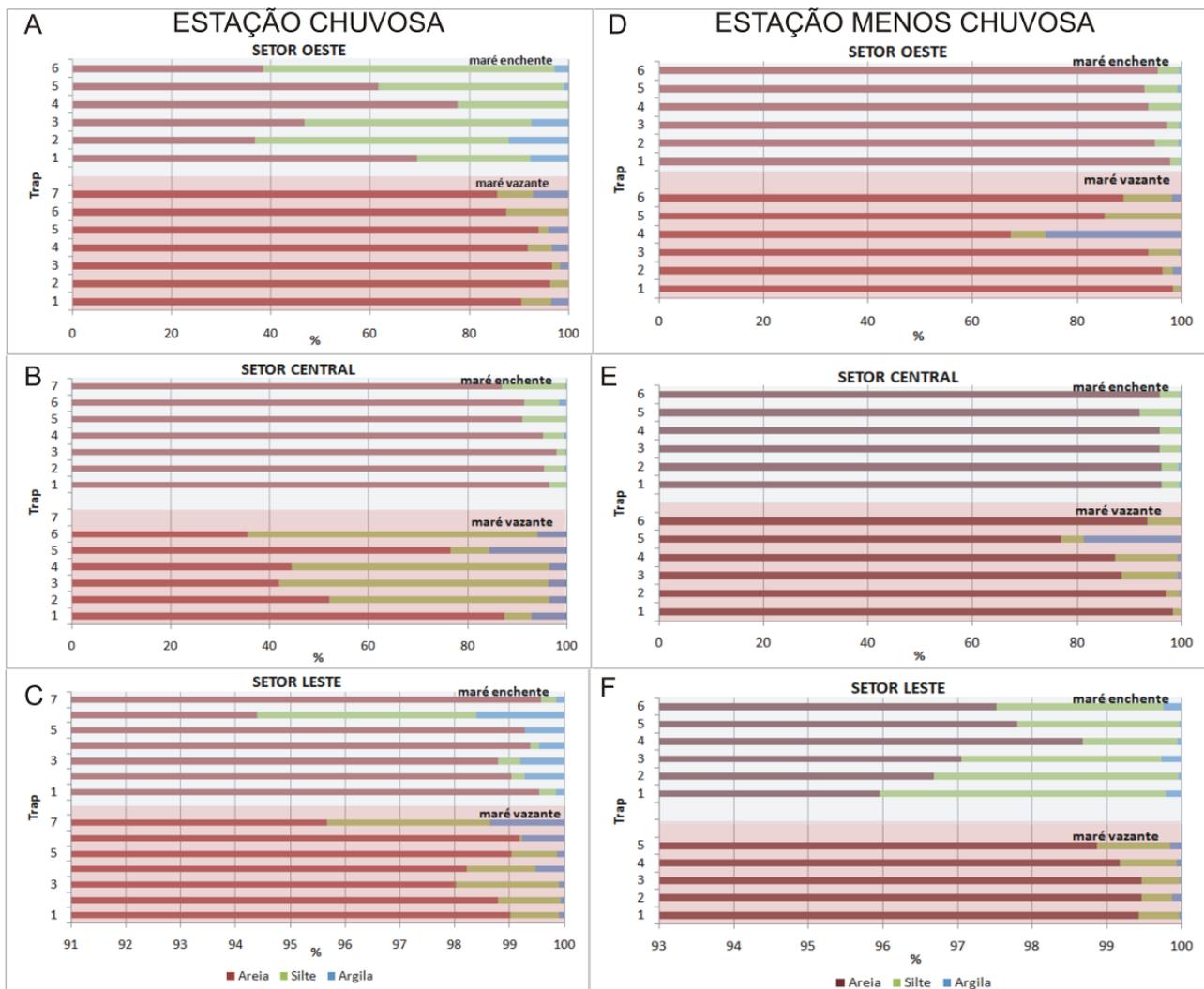
**Figura 4.** Massa de sedimentos obtida com os *traps* portáteis na estação chuvosa (A) e as condições da hidrodinâmica no momento das coletas: Altura (B) e período de ondas (C), Correntes longitudinais de superfície (D) e Ângulo de incidência de ondas durante as marés vazante (E) e enchente (F).



**Figura 5.** Massa de sedimentos obtida com os *traps* portáteis na estação menos chuvosa (A) e as condições da hidrodinâmica no momento das coletas: Altura (B) e período de ondas (C), Correntes longitudinais de superfície (D) e Ângulo de incidência de ondas durante as marés de vazante (E) e enchente (F).

Durante a estação chuvosa verificaram-se percentuais elevados de areias coletadas nos *traps* portáteis (Figura 6). No setor oeste, este percentual foi elevado apenas durante a vazante: 85 % (*trap* 7) a 96 % (*trap* 3) (Figura 6a). Já no setor central, este percentual foi bem maior durante a enchente: 86 % (*trap* 7) a 98 % (*trap* 3) (Figura 6b). O percentual de silte e argila coletado foi mais significativo nos setores oeste e central (Figuras 6a e 6b, respectivamente). Já no setor leste verificou-se as maiores concentrações de areia, sendo desde 94 % (*trap* 6) a quase 100 % (*trap* 5), durante a enchente (Figura 6c).

Durante a estação menos chuvosa o percentual de areia nos três setores da costa foi maior que na estação chuvosa. No setor oeste foi mais elevado durante a enchente: 92 % (*trap* 5) a 98 % (*trap* 1) (Figura 6d). Assim como no setor central: 91 % (*trap* 5) a 96 % (*trap* 2) (Figura 6e). O percentual de areia foi de quase 100 % em todos os *traps* durante a vazante, no setor leste (Figura 6f). Já o percentual de silte e argila dos sedimentos foi mais significativo novamente no setor oeste e central (Figuras 6d e 6e, respectivamente).



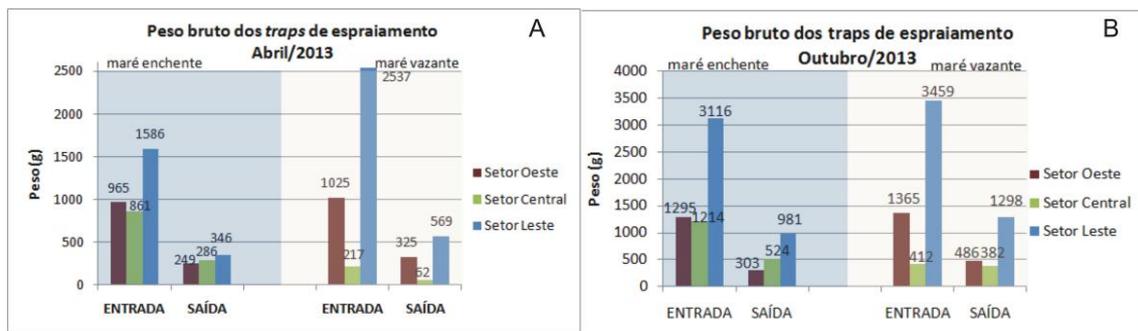
**Figura 6.** Análise granulométrica da massa de sedimentos obtida com os *traps* portáteis durante a estação chuvosa: setores oeste (A), central (B) e leste (C), e durante a estação menos chuvosa: setores oeste (D), central (E) e leste (F).

Nos experimentos com os *traps* de espriamento houve mais sedimentos coletados nos setores oeste e leste (Figura 7), tanto na estação chuvosa como na menos chuvosa e, principalmente, durante a vazante. No setor central foi menor o balanço sedimentar

(diferença entre a entrada e saída de sedimentos das praias) proveniente do transporte transversal e os maiores pesos amostrados ocorreram durante a enchente (balanço: 575 g – estação chuvosa; 690 g – estação menos chuvosa). Nota-se a semelhança das

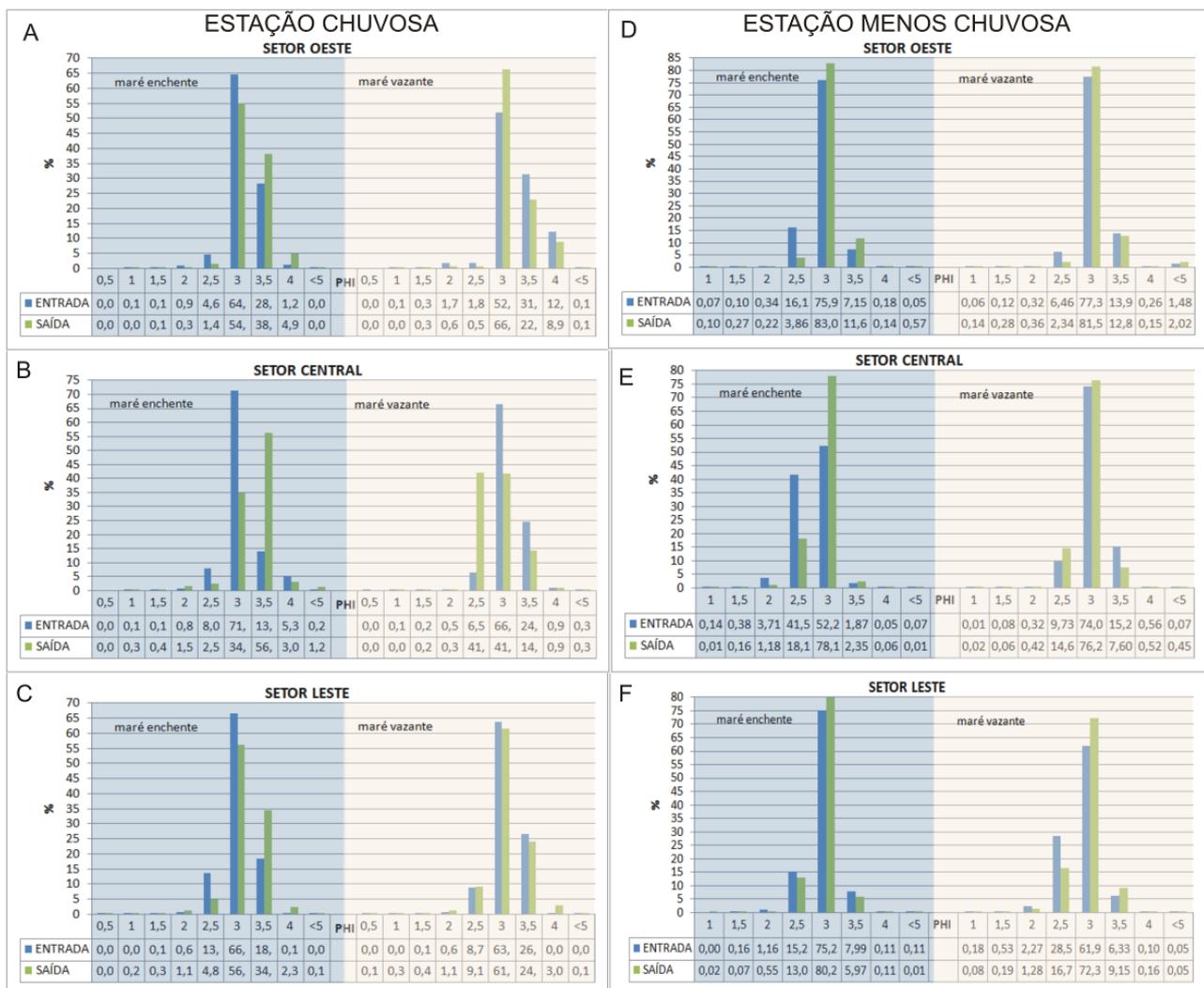
experimentações nos três setores ao verificar que a quantidade de sedimentos entrando nas

praias foi maior que a quantidade de sedimentos saindo (Figura 7).



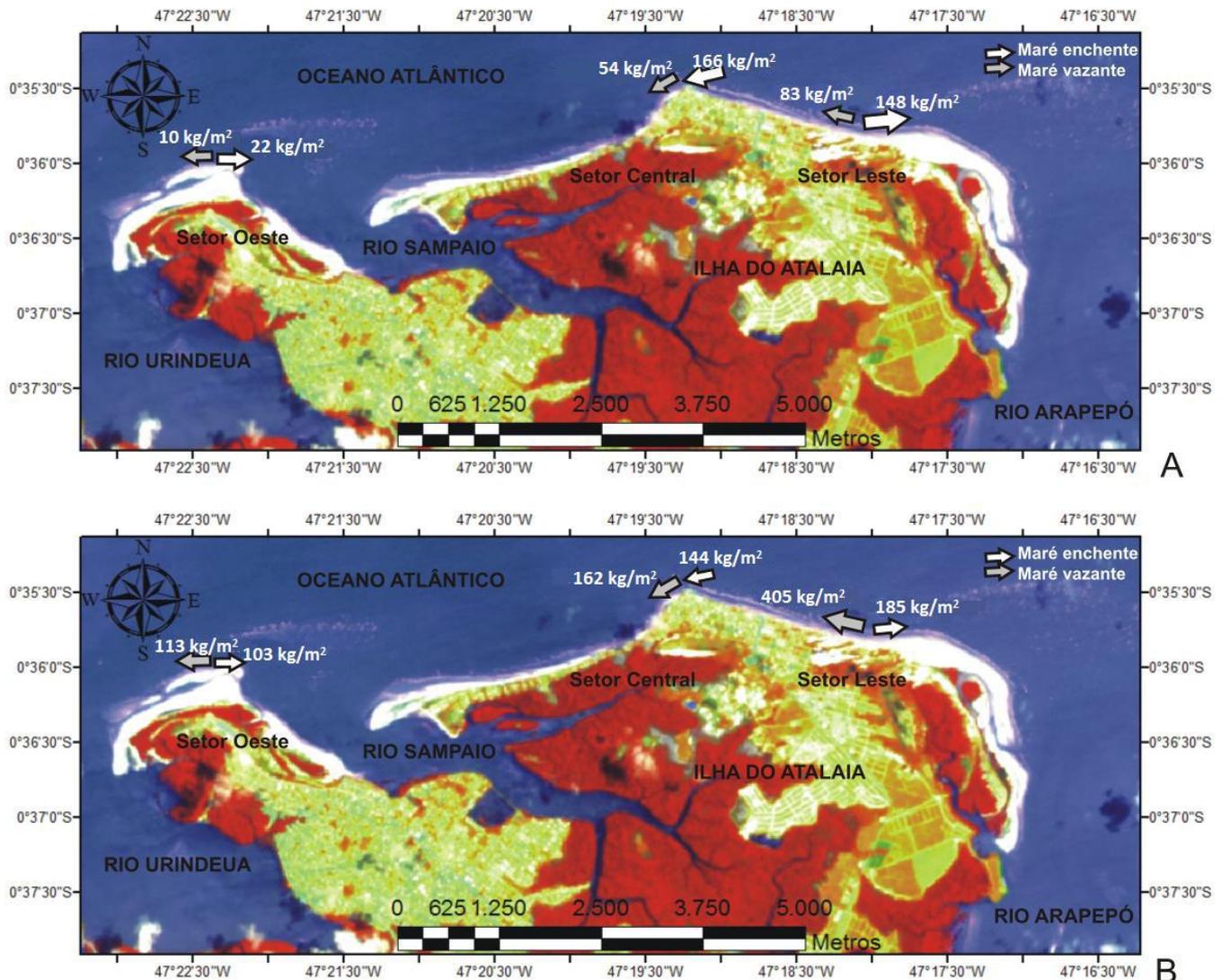
Nos três setores e durante as duas estações do ano a predominância de sedimentos mobilizados durante o transporte transversal foi de areia fina (2,5 a 3 phi) e muito fina (3,5 a 4

phi). Percentuais de areia fina foram maiores nos setores central e leste durante a estação chuvosa (Figuras 8b e 8c), assim como na estação menos chuvosa (Figuras 8e e 8f).



A figura 9 mostra a taxa estimada de material sedimentar transportado, inferido para cada setor da costa considerando o período de maré enchente, bem como o de maré vazante e, a partir da massa de sedimentos coletado nos *traps* portáteis. A taxa de sedimentos resultante

foi maior durante a enchente na estação chuvosa (Figura 9a), e durante a maré vazante na estação menos chuvosa (Figura 9b), sendo mais elevado principalmente no setor leste (mín. 83 Kg/m<sup>2</sup>; máx. 405 kg/m<sup>2</sup>).



**Figura 9.** Mapa indicativo da direção do transporte longitudinal de sedimentos e a taxa de material sedimentar inferido para cada setor da costa durante todo o período de marés enchente e vazante. (A) Estação chuvosa e (B) Estação menos chuvosa. As setas indicam a direção preferencial do transporte em cada fase de maré.

## DISCUSSÃO

### Processos físicos costeiros

Em abril de 2013, durante a enchente, as correntes longitudinais foram mais intensas nos setores central e leste (Figura 4), demonstrando a grande influência da corrente de maré enchente na costa de Salinópolis durante a estação chuvosa. O período de ondas, conseqüentemente, foi menor nesta fase de maré devido à alta aceleração causada no fluxo das águas. A energia de ondas geradas por

ventos tem maior efeito sobre a corrente longitudinal durante a maré vazante, na estação menos chuvosa e, principalmente, no setor central. Estas ondas são mais fortes neste setor e no leste (Figura 4) e podem sofrer adição também em sua altura pelo efeito da onda de maré. Isto pode ter sido a causa das ondas mais altas durante a enchente nos referidos setores, pois na medida em que se aproxima a preamar a energia da maré eleva-se.

Em um estudo realizado nas praias de macromaré do norte da França, durante condições de energia mais altas, Cartier & Héquette (2015) constataram que as alturas de onda são fortemente moduladas pela profundidade da água seja qual for a localização de praia, superior ou inferior, sendo as alturas de onda mais elevadas sempre registradas próximo da maré alta, enquanto que alturas das ondas mais baixas foram observadas durante a maré vazante ou início da enchente.

Áreas mais expostas, como os setores central e leste, são propícias à maior energia e refração das ondas. O setor oeste fica adjacente à foz do rio Sampaio e durante a enchente adquire características mais restritas de interação oceano-rio, com face praial mais limitada aos efeitos da hidrodinâmica oceânica, o que explica alturas de onda menores neste setor durante a enchente (Figuras 4 e 5).

As correntes longitudinais na área de estudo são provenientes, principalmente, do efeito das marés, com direção governada pela enchente e vazante dos rios que atravessam a costa de Salinópolis. Ranieri e El-Robrini (2012) e Oliveira et al. (2014) constataram características semelhantes, atribuindo particularidades restritas da costa amazônica, cuja influência de grandes sistemas estuarinos prevalece sobre os padrões oceanográficos dominantes das demais regiões costeiras.

Um exemplo disto é o que acontece com o ângulo de incidência de ondas com a costa que sofre influência em sua direção por conta do comportamento de empuxo das águas que acontece nas embocaduras fluviais. No momento da enchente as correntes de superfície fluem principalmente para direção E devido o fluxo das águas está direcionado à enchente dos rios que atravessam a costa. O ângulo de incidência de ondas apresenta, então, orientação NW, não concordante com a direção dos ventos que geram ondas de longo período (de águas profundas), predominantemente de NE. Ainda nos locais mais afastados das adjacências dos rios este comportamento prevalece, estendendo-se, portanto, por longos segmentos de praia.

Durante o fluxo de vazante as correntes de maré são direcionadas principalmente para W, que é concordante com a direção das correntes geradas por ondas oriundas dos ventos. Por este fato, no setor central, onde a morfologia

comporta um suave pontal arenoso (Ponta do Farol Velho) com refração de ondas, a direção W é mantida tanto na fase de enchente de maré como na fase de vazante. Na primeira, pode haver acresção das correntes de maré fluindo em direção ao rio Sampaio (direção W).

Tais mudanças nos padrões de circulação das águas costeiras podem ser explicadas pela contribuição variável das ondas, das marés e dos ventos para as correntes longitudinais durante variações na profundidade da água na subida e descida das marés. Correntes longitudinais são essencialmente forçadas pelas marés sob condições de baixa energia das ondas, com as correntes de enchente e vazante fluindo em direções opostas, especialmente no meio da praia e na parte inferior. A circulação paralela a costa induzida pela maré, com correntes alternadas regularmente em direção a uma frequência semi-diurna típica, tende a desaparecer durante condições mais energéticas de ondas, sendo substituída por correntes longitudinais que fluem na mesma direção (Cartier & Héquette, 2015).

Na costa oceânica de Salinópolis, durante a estação menos chuvosa, correntes de enchente dos rios, que representam a maior forçante da área de estudo na estação chuvosa, foram menos efetivas, demonstrado pelos dados de intensidade das correntes longitudinais de superfície para cada setor (Figura 5). As velocidades das correntes durante a vazante foram mais elevadas nos setores oeste e leste, indicando o maior efeito das ondas no desenvolvimento das correntes longitudinais.

Contudo, apesar da maior influência destas ondas, nota-se ainda o predomínio das correntes de maré enchente dirigindo-se aos rios da região ao analisar o ângulo de incidência das ondas com direção preferencialmente de NW durante a maré enchente, nos setores oeste e leste (Figura 5).

### **Quantificação e qualificação dos sedimentos transportados**

Tanto na maré vazante como na maré enchente durante a estação chuvosa, os *traps* portáteis no setor oeste foram os que obtiveram menor fluxo de sedimentos, indicando um enfraquecimento de célula de circulação costeira e uma zona de deposição de sedimentos (Figura 4). Na estação menos

chuvosa a oferta de sedimentos na zona de *surf* foi maior, aumentando a quantidade destes nos *traps* portáteis (Figura 5).

Esta situação também foi verificada nos outros setores, sendo a massa de sedimentos amostrada bem maior na estação menos chuvosa, indicando uma notável influência dos ventos locais na área de estudo, que foram intensos durante outubro, com média de 5 m/s (Cptec, 2014), proporcionando maior energia de ondas e maior mobilidade de sedimentos.

A quebra da onda induz turbulência em grande escala que é responsável pelo aumento da remobilização do sedimento do leito e concentrações de sedimentos suspensos (Yu et al., 1993; Beach & Sternberg, 1996; Voulgaris & Collins, 2000; Ogton & Sternberg, 2002).

Soares (2005) ao aplicar o método de armadilhas portáteis na zona de *surf* da praia de Camburi/ES, constatou que os picos de transporte em camadas subsequentes à camada do fundo estão relacionados às situações de maior energia de ondas, gerando grandes turbulências que pode ter sido a causa da aleatoriedade da distribuição vertical das concentrações de sedimentos e, conseqüentemente, das taxas de transporte.

Ainda, a disponibilidade de sedimentos na zona de *surf* e zonas subsequentes de praia durante a estação menos chuvosa está relacionada ao transporte de sedimentos em direção à linha de costa evidenciado, por exemplo, pela migração de bancos arenosos, anteriormente submersos na plataforma continental interna durante a estação chuvosa, quando a energia das ondas geradas por ventos é menor.

A extensa ocorrência de ondulações de pequena escala (*ripples*) em depressões ou canais longitudinais pode também favorecer a suspensão de sedimentos, mesmo se a tensão de cisalhamento no leito for substancialmente reduzida como resultado da dissipação de energia de onda sobre a barra arenosa precedente e do aumento da lâmina d'água (Cartier & Héquette, 2015).

Como a massa de sedimentos amostrada na coluna d'água com *traps* portáteis foi bem maior na estação menos chuvosa, implica-se inferir numa maior taxa de transporte sedimentar para todo período de enchente e vazante em cada setor da costa também (Figura

9). Esta taxa na estação chuvosa foi mais elevada durante a enchente, sendo os sedimentos transportados principalmente para leste. Na estação menos chuvosa, o transporte longitudinal foi mais elevado durante a vazante e, principalmente para oeste, devido o efeito mais intenso das correntes geradas por ondas oriundas dos ventos, que incidem na costa com direção NE originando correntes para oeste.

Os sedimentos coletados nos *traps* portáteis foram avaliados qualitativamente por frações granulométricas e verificou-se o percentual de silte e argila coletado foi mais significativo nos setores oeste e central (Figura 6), indicando uma competência de transporte regular. Sugere-se que este seja mais elevado no setor leste, pois há grande quantidade de sedimentos menos finos (areia) suspensos sendo transportados.

No transporte de sedimentos ao longo da costa, Komar (1977) propôs que o aumento do tamanho dos grãos de areia esteja relacionado à maior velocidade da corrente. Quando a velocidade da corrente diminui, o transporte atua principalmente sobre os sedimentos mais finos, o que gera uma tendência à diminuição do diâmetro no sentido do transporte de sedimentos pela corrente longitudinal.

A quantidade de silte e argila mobilizada na coluna d'água está relacionada também com a maior ou menor energia das ondas. Nas fases de maré onde as alturas de ondas foram mais elevadas, obteve-se melhor competência na mobilização de sedimentos arenosos, por isso baixo percentual de silte e argila. Como as maiores energias de ondas foram verificadas no setor leste, maior percentual de areia também foi obtido nos sedimentos coletados com *traps* portáteis neste setor.

Esta condição mais energética também confere a ele maior capacidade de transporte transversal, demonstrado pelas experimentações com os *traps* de espraiamento, cujos valores da massa de sedimentos coletados foram os mais elevados (Figura 7). O espraiamento de ondas gera a deriva praial que é caracterizada por correntes transversais de fluxo e refluxo. Nos três setores a quantidade de sedimentos chegando à praia (proveniente do fluxo da deriva praial) foi maior que a quantidade de sedimentos saindo (proveniente do refluxo da deriva praial), caso contrário não se estabeleceriam praias na área de estudo.

Contudo, o balanço entre a entrada e saída de sedimentos foi mais desfavorável no setor central (Figura 7), indicando características mais erosivas a este setor, que é desprovido, numa extensa proporção, de ambientes de sedimentação no pós-praia, devido às atividades antrópicas de urbanização nesta zona. A presença destes ambientes poderia suprir a perda causada pela erosão. Esta é também elevada no setor leste, pois o fluxo de sedimentos durante o espraiamento é muito grande não somente na entrada de sedimentos na praia mas também na retirada, porém, o setor leste é limitado por campo de dunas conferindo grande disponibilidade de sedimentos no transporte transversal. Os valores elevados de sedimentos entrando ao sistema praiial indicam o importante papel da plataforma continental

como uma das principais fontes de sedimentos à zona costeira de Salinópolis, especialmente para o setor leste.

Maiores percentuais de areia fina nos *traps* de espraiamento aplicados nos setores leste (Figuras 8c e 8f) e central (Figuras 8b e 8e) podem também indicar grande competência de transporte transversal. Cornish (1898) apontou que o transporte transversal é mais efetivo com os sedimentos mais grossos.

Apesar de verificados percentuais um pouco maiores de silte e argila nos *traps* de espraiamento do setor oeste (Figuras 8a e 8d), notou-se que neste setor o transporte transversal é mais eficiente no retrabalhamento dos sedimentos de praia comparado ao transporte longitudinal.

## CONCLUSÕES

Conclui-se, desta forma, a importante função do transporte transversal de sedimentos da plataforma continental interna em direção à linha de costa. Sedimentos depositados nesta plataforma por meios fluviais (rios) e distribuídos por correntes transversais geradas pela incidência de ondas.

Conclui-se também que o transporte longitudinal de sedimentos é mais elevado nos setores central e, principalmente, leste, indicando zonas de erosão ou início de células de circulação costeira. O setor oeste caracteriza-se por uma zona de deposição de sedimentos ou término de célula de circulação. A favorável adjacência com o rio Sampaio, cuja embocadura direciona-se às praias do setor oeste (Corvina e Maçarico), propicia um maior aporte fluvial, especialmente de sedimentos

mais finos. Destacando o importante papel desempenhado pelos sistemas estuarinos no litoral amazônico, sendo grandemente responsáveis, tal como a plataforma continental, pela oferta de sedimentos e estabilidade das praias. Além de influenciar na hidrodinâmica local.

Esta é consideravelmente alterável durante condições climáticas normais à extremas e, também sazonalmente, ou seja, durante a estação chuvosa e menos chuvosa amazônica. Na primeira, as correntes de maré governam a praia e a sedimentação, porém quantidades substanciais maiores de sedimentos arenosos podem ser transportadas ao longo destas praias durante condições de elevada energia de onda na estação menos chuvosa.

## AGRADECIMENTOS

Aos membros do Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros (GEMC) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pela parceria na realização deste trabalho. Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) da UFPA e à Fundação do Amparo à Pesquisa do Estado do Pará (FAPESPA) pelo financiamento de bolsa de estudos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AAGAARD, T.; GREENWOOD, B. Suspended sediment transport and morphological response on a dissipative beach. *Continental Shelf Research*, v. 15, p. 1061-1086, 1995.
2. ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Sistema de monitoramento hidrológico. Disponível em: <http://bancodedados.cptec.inpe.br>. Acessado em: 03jun2013.
3. BATTISTO, G.M.; FRIEDRICHS, C.T.; MILLER, H.C.; RESIO D.T. Response of OBS to mixed grain-size suspensions

- during Sandyduck'97. In: KRAUS, N.C. & McDOUGAL, W.G. (Coordenadores), **Coastal Sediments 1999**. Reston: American Society of Civil Engineers, p.: 297-312, 1999.
4. BEACH, R.A. & STERNBERG, R.W. Suspended sediment transport in the surf zone: response to breaking waves. **Continental Shelf Research**, v. 16, p. 1989-2003, 1996.
  5. CARTIER, A. & HÉQUETTE, A. Vertical distribution of longshore sediment transport on barred macrotidal beaches, northern France. **Continental Shelf Research**, v. 95, p. 1-16, 2015.
  6. CHAPALAIN, G. & THAIS, L. Tide turbulence and suspended sediment modelling in the eastern English Channel. **Coastal Engineering**, v. 41, p. 295-316, 2000.
  7. CORNISH, V. On sea beaches and sand banks. **Geological Journal**, v. 11, p. 628-651, 1898.
  8. CPTEC – CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Banco de dados meteorológico (Modelo WWATCH). Disponível em: <http://bancodedados.cptec.inpe.br>. Acessado em: 14jan2013.
  9. CPTEC – CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Banco de dados meteorológico (Estação Synop). Disponível em: <http://bancodedados.cptec.inpe.br>. Acessado em: 25jul2014.
  10. DAVIS, R.A. (Coordenador). **Coastal Sedimentary Environments**. New York: Springer-Verlag, 716 p, 1985.
  11. FONTOURA, J.A.S. **Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não-coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da barra do Rio Grande, RS, Brasil**. Porto Alegre, 2004, 273 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
  12. GEYER, W.R.; BEARDSLEY, R.C.; LENTZ, S.J.; CANDELA, J.; LIMBURNER, R.; JOHNS, W.E.; CASTRO, B.M.; SOARES, I.D. Physical oceanography of the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, v. 16, p. 575-616, 1996.
  13. KOMAR, P.D. Selective longshore transport rates of different grain-size fractions within a beach. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 47, n. 4, p. 1444-1453, 1977.
  14. KRAUS, N.C. Application of portable traps for obtaining point measurements of sediment transport rates in the surf zone. **Journal of Coastal Research**, v. 3, n. 2, p. 139-152, 1987.
  15. LEONT'YEV, I. O. Calculation of Longshore Sediment Transport. **Oceanology**, v. 54, n. 2, p. 205-211, 2014.
  16. MACHADO, G.M.V. **Análise morfo-sedimentar da praia, antepraia e plataforma continental interna da linha de costa do Parque Nacional de Jurubatiba-RJ**. Rio de Janeiro, 2007, 170 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
  17. MUEHE, D. Geomorfologia Costeira. In: CUNHA, S.B. & GUERRA, A.J.T. (Coordenadores), **Geomorfologia: Exercícios, Técnicas e Aplicação**, 2. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.: 191-238, 2002.
  18. OGTON, A.S. & STERNBERG, R.W. Effect of wave breaking on sediment eddy diffusivity, suspended-sediment and longshore sediment flux profiles in the surf zone. **Continental Shelf Research**, v. 40, p. 599-622, 2002.
  19. OLIVEIRA, S.M.O.; PEREIRA, L.C.C.; VILA-CONCEJO, A. Morphodynamic processes in a macrotidal beach in the Amazon littoral. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 5, n. 2, p. 125-136, 2014.
  20. OSBORNE, P.D. & GREENWOOD, B. Sediment suspension under waves and currents, time scales and vertical structures. **Sedimentology**, v. 40, p. 599-622, 1993.
  21. PULEO, J.A.; JOHNSON, R.V.; BUTT, T.; KOONEY, T.N.; HOLLAND, K.T. The effect of bubbles on optical backscatter sensors. **Marine Geology**, v. 230, p. 87-97, 2006.
  22. RANIERI, L.A. & EL-ROBRINI, M. Avaliação experimental de métodos de armadilhas de sedimentos para determinação do transporte costeiro da Praia da Romana, Ilha dos Guarás (Nordeste do Pará). **Geociências**, v. 31, p. 103-116, 2012.
  23. SEGUNDO, G.H.C. **Processos oceanográficos na região costeira e estuarina do rio Caeté, Pará, Brasil**. Rio de Janeiro, 2007, 139 p. Tese (Doutorado em Geociências (Geoquímica)) – Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense.
  24. SOARES, S.B. **Avaliação experimental da taxa longitudinal de transporte de sedimentos e sua previsão usando formulações globais na zona de surfe da Praia de Camburí, Vitória-ES**. Espírito Santo, 2005, 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo.
  25. SOUZA FILHO, P.W.M. & PARADELLA, W.R. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. **Wetlands Ecology and Management**, v. 10, n. 2, p. 123-132, 2002.
  26. SOUZA FILHO, P.W.M. & PARADELLA, W.R. Use of synthetic aperture radar for recognition of Coastal Geomorphological Features, land-use assessment and shoreline changes in Bragança coast, Pará, Northern Brazil. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 75, n. 3, p. 341-356, 2003.
  27. VANTREPOTTE, V.; BRUNET, C.; MÉRIAUX, X.; LÉCUYER, E.; VELLUCCI, V.; SANTER, R. Bio-optical properties of coastal waters in the Eastern English Channel. **Estuarine Coastal Shelf Science**, v. 72, p. 201-212, 2007.
  28. VINCENT, C.E. & OSBORNE, P.D. Predicting suspended sand concentration profiles on a macrotidal beach. **Continental Shelf Research**, v. 15, p. 1497-1514, 1995.
  29. VOULGARIS, G. & COLLINS, M.B. Sediment resuspension on beaches: response to breaking waves. **Marine Geology**, v. 167, p. 167-187, 2000.
  30. WANG, P.; KRAUS, N.C.; DAVIS, R.A. Total longshore sediment transport rate in the surf zone: Field measurements and empirical predictions. **Journal of Coastal Research**, v. 14, n. 1, p. 269-282, 1998.
  31. WENTWORTH, C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal of Geology**, v. 30, p. 377-392, 1922.
  32. YU, Y.; STERNBERG, R.W.; BEACH, R.A. Kinematics of breaking waves and associated suspended sediment in the nearshore zone. **Continental Shelf Research**, v. 13, p. 1219-1242, 1993.

*Manuscrito recebido em: 24 de Julho de 2015  
Revisado e Aceito em: 10 de Maio de 2016*