

# PROCESSOS SEDIMENTARES EM ÁREA DE MACRO-MARÉS INFLUENCIADOS PELA POROROCA-ESTUÁRIO DO RIO ARAGUARI-AMAPÁ-BRASIL

Valdenira Ferreira dos Santos<sup>1, 2</sup>; Alberto G. Figueiredo Jr. <sup>2</sup>; Odete Fátima M. da Silveira<sup>1</sup>; Laurent Polidori<sup>3</sup>; Denis Marques de Oliveira<sup>1</sup>; Maxley Barbosa Dias<sup>1</sup>; Marcos Henrique de Abreu Martins<sup>1</sup>; Laysa de Oliveira Santana<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá-IEPA ([valdeniraferreira@yahoo.com](mailto:valdeniraferreira@yahoo.com)); <sup>2</sup> UFF/LAGEMAR; <sup>3</sup> IRD/Guiana Francesa

---

## Abstract

Sedimentary processes on macro tidal estuaries under tidal bore influence are not well documented in the literature. A series of observations using satellitary images (Landsat 4 and 7, years 1992 and 2000), tide measurements, suspended sediments and sedimentary processes observation were done at the inferior (lower) part of Araguari estuary. It has a tidal range of 5 m at the river mouth, decreasing throughout the inner part of the estuary reaching 1,80 meters of range. At the satellitary images, the estuary morphology (mouth bars, erosional margin at point bars) follows a different pattern of the depositional and erosional deposits for meandering rivers. The sedimentary structures consist typically of planar silt-mud alternation with oxidized mud drapes. The distribution seems to be affected by the dynamic of the tides and also by the tidal bore that affect the depositional (0.125 cm at a tidal cycle) and erosional (0.375 at a tidal cycle) measurements. The sediment remobilized during the tidal bore has a suspended sediments concentration of 15.614 mg/L. The passage of this phenomenon promotes the generation of mud balls, which can be used as a geoinicator. The variation of the distribution of the sedimentary processes shows that the tidal bore and the presence of tidal channels plays a very important role in the recent sedimentation.

---

**Palavras-chave:** tidal bore, sedimentary processes, Araguari estuary.

## 1. Introdução

Os processos sedimentares em áreas sujeitas a macromarés e sob influência da pororoca são pouco descritos na literatura científica. No Brasil estes depósitos, são ainda menos conhecidos.

A onda da pororoca comporta-se como uma onda solitária sendo sua origem relacionada a presença de macromarés, morfologia e declive suave do fundo do estuário, podendo sua magnitude ser afetada também por vento (Lynch, 1982). As maiores altura da pororoca são encontradas na desembocadura do Amazonas chegando a alcançar 7 m segundo Lynch (1982). Tal altura de onda porém não tem sido confirmada em trabalhos de campo.

Estudos sobre a atuação desse fenômeno nos processos sedimentares são praticamente inexistentes apesar do seu

impacto nos processos de mistura e movimento de sedimentos estuarinos. A maioria das pesquisas estão relacionadas com a compreensão da onda e sua formação (Chanson, 2001). Entretanto, o poder desse fenômeno na remobilização, deposição e erosão de camadas sedimentares são facilmente perceptíveis em campo e resultam na modificação da morfologia de estuários em curto espaço de tempo.

Este trabalho apresenta resultados preliminares sobre os processos de sedimentação e erosão no estuário do rio Araguari através da avaliação de imagens de satélite e medições de campo durante o período de marés de sizígia em época de equinócio, visando melhorar os conhecimentos dos ambientes de sedimentação influenciados por macromarés, especialmente aqueles sob ação da pororoca.

## 2. Área de estudo

O estuário do rio Araguari encontra-se na porção de maior largura da planície costeira do Amapá, numa região de extrema singularidade, o Cabo Norte (Fig. 1).

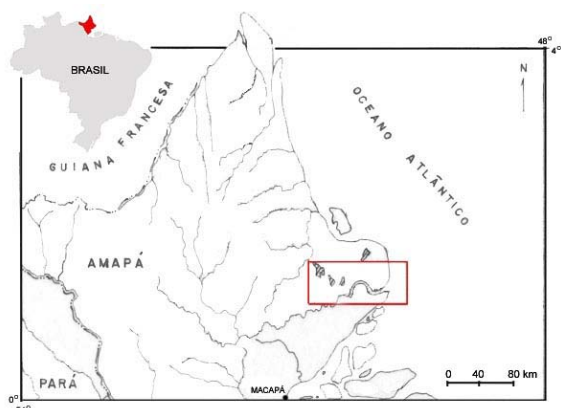


Figura 01 - Localização do estuário do rio Araguari.

O estuário é limitado a sul pelo rio Amazonas e a norte pela Região dos Lagos do Amapá. O clima é caracterizado por elevados índices de precipitação apresentando totais anuais oscilando entre 1.500 e 3.500 mm (Bezerra *et al.* 1990) com 70% das chuvas concentradas no período chuvoso (dezembro a maio). Isto auxilia para que grande parte da planície do estuário permaneça inundada por vários meses. À semelhança de outros estuários no mundo, sua formação está associada com a transgressão holocênica (Costa, 1996) possuindo uma história geológica pouco conhecida e distinguindo-se da maioria dos estuários brasileiros em função dos processos hidrodinâmicos serem influenciados pelo fenômeno da pororoca.

Os sedimentos deste estuário são essencialmente lamosos, tornando-se siltosos e com granulometria de areia muito fina em direção a foz (Santos, 1994).

Com base na altura da maré medida pela DHN (1970) o estuário do rio Araguari pode ser classificado como de macromaré o que constitui um potencial para ocorrência de pororoca.

## 3. Materiais e Métodos

A metodologia constou das seguintes fases:

- Recuperação de obras bibliográficas de trabalhos realizados nesse estuário e em outros locais no mundo referentes a influência da pororoca na sedimentação;
- Análise multitemporal de duas imagens de satélite Landsat 4 (1992) e Landsat 7 (2000) a fim de avaliar as modificações morfológicas nas margens do estuário;
- Sobrevôo com registros fotográficos e tomada de vídeos;
- Levantamento de campo, executados principalmente durante os períodos de sigízia, em época de equinócio. Nesses levantamentos foram realizadas medidas de sedimentação e erosão, registro fotográfico, observação da onda e da atuação das marés com coletas de água superficial para análise da concentração de sedimentos em suspensão antes, durante e após a passagem da pororoca (Santos & Santana, 2005).

As medidas de erosão e sedimentação foram realizadas utilizando-se placas de metal no tamanho de 20 x 30 cm dispostas em locais previamente estabelecidos a partir dos resultados de observações anteriores (Santos & Santana, *op cit.*).

O registro fotográfico foi realizado seguindo-se a onda no estuário e posicionando-se com um GPS para posterior plotagem em imagem de satélite.

O monitoramento da influência das marés no estuário foi realizado com um sensor de pressão (Orphimedes) calibrado para medição a cada 15 minutos (Santos *et al.*, 2005), como através de observações visuais da chegada do fenômeno no estuário.

Para determinação da concentração de sedimentos em suspensão utilizou-se o método de filtração utilizando filtros GF/C através de bomba de vácuo seguindo os procedimentos descritos em APHA (1992).

O posicionamento dos pontos em campo foi realizado utilizando um GPS (Global Positioning System) com média de precisão de 5 metros.

### 3. Resultados

#### 3.1 Distribuição dos processos sedimentares ao longo do estuário

Os processos sedimentares que ocorrem ao longo do baixo curso do rio Araguari deveriam seguir o preconizado pela literatura para os rios meandantes, isto é processos deposicionais no lado côncavo da curva do meando (barras em pontais) e erosional na parte convexa. Todavia a reversão do fluxo do rio pelas correntes de marés modifica estes modelos.

Assim, no Araguari, os **processos deposicionais** estão ligados não somente ao crescimento de barras em pontais, marcadas por linhas acrescionárias de vegetação, mas também a desembocadura dos inúmeros canais que cortam essa planície mesmo que estes representem áreas de erosão no estuário (Fig. 2). Locais de atenuação da onda da pororoca também são propícios para a deposição, resultando na criação de barras estuarinas e plataformas agradacionais em frente a terraços erosivos.

Os **processos erosionais** da mesma forma fogem ao modelo deposicional pois atuam não somente na porção côncava dos meandros. A observação das imagens mostra um recuo do estuário em sua margem esquerda de aproximadamente 750 m onde deveria existir processos acrescionários devido a localização propícia para o início de crescimento de barras em pontal.

Mesmo nas áreas acrescionárias, associadas as barras em pontal do estuário, ocorrem patamares erosionais que podem ser decorrentes das variações nas amplitudes de marés durante os ciclos de quadratura e sigízia. Tais formas já foram observadas por Costa *et al.* (1994) que destaca a existência de variação na altura desses terraços em função da ocorrência da pororoca. Os autores chegaram a chamar esses patamares de "micro-falésias" tal é sua expressão na área. Estes terraços chegam a alcançar 40 cm de altura.

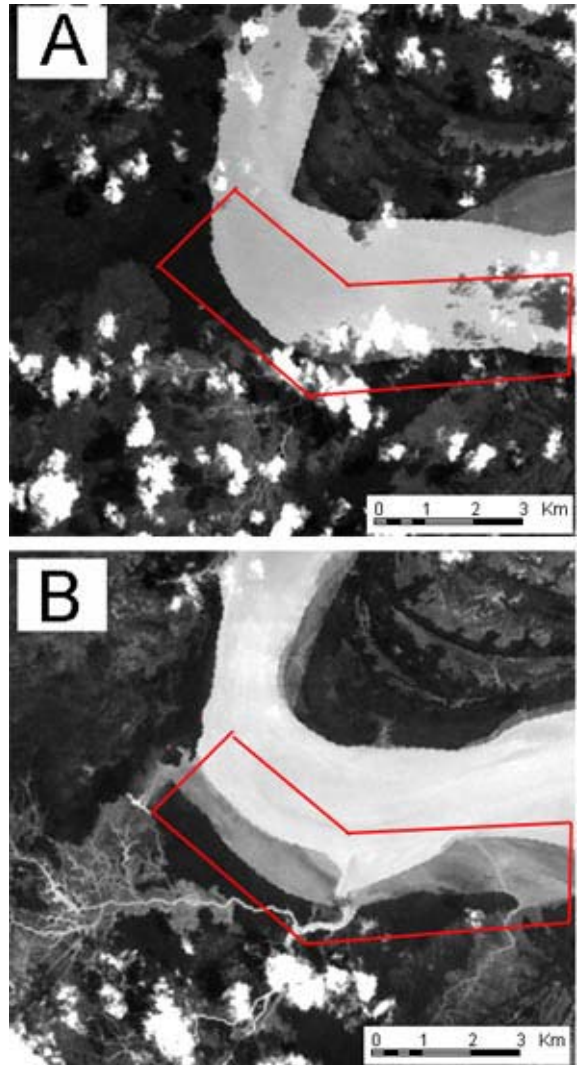


Fig. 2. Crescimento de barras de desembocadura de canal associadas a áreas potenciais de erosão em ambientes de rios meandantes. **A)** Imagem de 1992 mostrando a inexistência das barras. **B)** Imagem de 2000 mostrando barras nos dois lados do igarapé.

#### 3.2 A onda da pororoca no estuário e sua influência na sedimentação e erosão

A pororoca no estuário do Araguari ocorre com amplitude de onda de 1 a 2 m. Tem como característica sua formação ainda no oceano, o que constitui um processo raro, ocorrendo de forma semelhante somente na Baía do Monte Saint-Michel, na França (Hirsch, 2004). O tipo de onda de pororoca é o ondular quando está nas porções mais fundas do

estuário, e possui formato de macaréu ("breaking") nas porções mais rasas. A onda chega adentrar mais de 45 km no estuário, viajando a uma velocidade variável de 2.8 a 5 m/s (10 a 18 km/hora) estendendo-se de uma margem a outra, o que já permitiu sua observação em imagens de radar por Santos (2005). Dentro do estuário a onda viaja rio acima e pode dividir-se entre os bancos e ilhas, diminuir de tamanho quase desaparecendo e reaparecendo várias vezes de acordo com a morfologia das áreas por onde passa e da dissipação da energia da onda. A massa d'água da onda é capaz de encher grande parte do estuário em poucos minutos. As observações de campo têm demonstrado que em 5 minutos uma lâmina de água de 2 metros pode inundar o canal estuarino do Araguari.

O fenômeno constitui-se num dos principais mecanismos de modificação no estuário em função da magnitude dos processos sedimentares (Santos *et al.* 2003). Os efeitos mais notáveis podem ser vistos na turbidez das águas, bem evidente nas imagens de satélite, em decorrência da alta concentração de sedimentos em suspensão. O efeito da onda também pode ser sentido na distribuição da microfauna, a exemplo do que ocorre com as caparaças dos foraminíferos bentônicos (Laut *et al.*, 2004), coincidentes com as áreas influenciadas pela pororoca. Contudo, a influência da onda se faz sentir mais visivelmente na modificação da morfologia da planície e nos processos sedimentares, influenciados pelo alto potencial de erosão e deposição principalmente das porções mais rasas do estuário, quando a onda deformada passa a atuar com maior poder sobre o fundo, remobilizando e transportando sedimentos.

As taxas de concentração de sedimentos nessas áreas passam de 274 mg/L antes do evento para 8.108 mg/L durante o evento e 1.653 mg/L, 50 minutos após o evento para um mesmo dia. Em outro ciclo de maré anterior a essas medidas, a concentração de sólidos durante a passagem do fenômeno chegou a alcançar

15.614 mg/L. Tais valores atestam o poder das correntes geradas pela onda na remobilização do sedimento, tornando a massa d'água muito viscosa e com alto poder de erosão, sendo essas medidas inferiores aquelas encontradas por Kineke & Sternberg (1992) para a camada lama fluida do Amazonas (320 g/l).

A erosão decorrente do fluxo turbulento agindo sobre as camadas sedimentares consolidadas resulta na retirada de até 3 cm de sedimentos argilosos. Por outro lado a deposição de sedimentos atinge cerca de 1 cm (Fig.3). Tais resultados são decorrentes de medidas em 8 ciclos de marés durante o período de equinócio e conseqüentemente de maior atuação do fenômeno.



Fig. 3. Deposição de 1 cm de sedimentos em 8 ciclos de maré (A). Erosão vertical de (B).

Processos de erosão também atuam através da quebra e queda por gravidade de blocos de dimensões métricas retirados dos terraços marginais ao canal do estuário. Na porção superior desses terraços, blocos com dimensões menores (centimétricas) são jogados terraço acima, em decorrência do embate da onda principal e das ondas secundárias sobre as margens do baixo estuário.

### 3.3. A influência das marés e da pororoca representada nas estruturas sedimentares

No estuário são encontradas estruturas típicas de ambientes de macromaré com presença de laminações e camadas plano paralelas siltico-argilosas compostas por lâminas milimétricas a centimétricas de areia fina e/ou silte capeadas por argilas. Em direção a foz do estuário as espessuras

das camadas são maiores, chegando a alcançar dimensões centimétricas e diminuindo a medida que adentra o estuário. São comuns sobre as camadas mais arenosas a oxidação de películas argilosas que acabam por serem preservadas no registro sedimentar.

Além da presença típica dessas estruturas sedimentares associadas as macromarés, bolas de lama descritas no item anterior são dispostas sobre as camadas sedimentares principalmente nas áreas de maior atuação do fenômeno da pororoca, não sendo registradas nas porções mais interiores do estuário.

As medidas das amplitudes de marés em dois pontos do estuário mostram uma variação vertical de aproximadamente 35 cm em 45 km. Essa diferença de amplitude na distribuição das marés ao longo do estuário pode controlar a altura dos terraços ao longo do rio, assim como a espessura das camadas e dos depósitos ao longo do estuário, em função dos processos diferenciais de acreção vertical.

#### **4. Conclusões**

Os resultados apresentados neste trabalho indicam que a pororoca e ação das macromarés parecem ser um dos principais responsáveis pelas altas taxas de sedimentação e erosão e conseqüentemente pela modificação morfológica das margens no baixo curso do estuário do rio Araguari, embora com a presença de fatores antrópicos como a criação de búfalos.

A espacialização horizontal dos processos erosionais e deposicionais ao longo do estuário sugere que os mesmos não são apenas controlados pelos fluxos típicos dos ambientes de rios meandrantés, mas também pela influência da onda da pororoca no estuário, bem como pelos canais de marés que funcionam como um molhe hidráulico barrando as correntes e facilitando a deposição. O resultado da extrema dinâmica desses processos, causa modificações constantes nas rotas de navegação e nos acessos aos canais de

marés em curto espaço de tempo.

As medidas de deposição e sedimentação, embora pontuais e nos períodos de equinócio, precisam ser confirmadas através de monitoramento contínuo. Porém a alta taxa de sedimentação pode ser comprovada por depósitos de acreção vertical encontrados na planície do estuário, com indícios de pelo menos 35 cm de sedimentação em 7 anos, o que resultaria em uma taxa de deposição de aproximadamente 5 cm/ano. Altas taxas de sedimentação (0.24-2 cm/ano) já foram confirmadas por Allison *et al.* (1995) para outras porções da planície costeira do Amapá. Essas taxas seguramente associam-se a grande disponibilidade de sedimentos em suspensão na coluna d'água e os processos de floculação que são um dos responsáveis por essa deposição.

A influência das variações de amplitude das marés nas espessuras dos depósitos, nas estruturas sedimentares e na altura dos terraços erosivos necessitam ainda de maiores investigações nas medidas de marés através da distribuição homogênea de sensores, concomitante com coleta de dados topográficos para estabelecer o gradiente da planície estuarina e sua relação com a espessura dos depósitos e dos terraços..

Os blocos resultantes dos processos erosionais em função da pororoca, se preservados sobrejacente a terraços com estruturas de macromarés, poderiam ser utilizados como um indicador da presença de pororoca em ambientes sedimentares antigos.

#### **5. Agradecimentos**

Os resultados deste trabalho são provenientes da execução do projeto "Avaliação de Processos Dinâmicos no Estuário do Rio Araguari", apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e a Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia - SETEC através do convênio 610093/03-7 MCT/CNPq, e do



desenvolvimento da tese de doutorado da primeira autora.

Agradecemos aos pesquisadores e bolsistas e ao Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá-IEPA pelo apoio e colaboração durante nossas etapas de campo; ao Departamento de Geologia/LAGEMAR/UFF e ao Institut de Recherche pour le Développement - IRD.

## 6. Referências

- ALLISON, M. A., NITTRouer, C. A.; FARIA Jr., L.E. do C. 1995. Rates and Mechanisms of Shoreface Progradation and Retreat Downdrift of the Amazon River Mouth. *Mar Geol* **125**(3-4): 373-392.
- BEZERRA, P. E. L., CUNHA, B.C.C. da; DEL'ARCO, J.O.; DRAGO, V.A.; MONTALVÃO, R.M.G. de; EULÁLIO, H.N.; SOUZA Jr.; J.J.de; PRADO, P./ AMARAL FILHO, Z.P.do; NOVAES, A.S.; VIEIRA, P.C.; FRAGA, A.Y.C; COSTA, J.R.S.; SALGADO, L.M.G.; BRAZÃO, J.F.M. 1990. Projeto Zoneamento das potencialidades dos recursos naturais da Amazônia Legal. Rio de Janeiro: IBGE/SUDAM, 221 p.
- CHANSON, H. 2001. Flow Field a Tidal Bore: A Physical Model. Proc. 29th IAHR Congress, Beijing, China:Tsinghua Univers Press, p. 365-373.
- COSTA, L. T. da R.;SILVEIRA, O. F. M. da.; FARIA Jr., L.E. do C. 1994. Sedimentação Holocênica no Vale do Rio Araguari (Amapá)-Resultados preliminares. IV Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém:SBG-Norte, p.142-143.
- DHN. 1970. Dados de Marés Observadas. Marinha do Brasil.
- HIRSCH, N. 2004. Le Mascaret: Histoire, Géographie et Mécanique d'une Vague Solitaire. *Met Mar* 204: 10-13.
- KINEKE, G. C. & STERNBERG, R. W. 1992. Measurements of High Concentration Suspended Sediments using the Optical Backscatterance Sensor. *Mar Geol* 108(3-4):253-258.
- LAUT, L. ; FIGUEIREDO JR, A. G. ; SANTOS, V. F. dos. 2004. Foraminíferos e Tecamebas Recentes do Estuário do Araguari-Amapá, Brasil. *Recueil des Resumes VII Congresso ECOLAB-Ecosystemas Costeiros Amazônicos*. Caiena: IRD, p. 11-12.
- LYNCH, D.K. 1982. Tidal Bores. *Scient Amer* 247 (4): 134-143.
- SANTOS, V.F. dos. 1994. Análise Textural e Mineralógica dos Sedimentos Arenosos do Baixo Curso do Rio Araguari, Cabo Norte, Amapá. Trabalho de Conclusão de Curso. Belém: UFPA, 71p.
- SANTOS, V.F. dos. 2005. Rapport de Stage. Bourse de Formation Continue (BFC). Cayenne: IRD-LRT/IEPA/UFF-LAGEMAR, 19p.
- SANTOS, V. F. dos.; SANTANA, L. de O. 2005. Relatório de Atividades de Campo. Rel de Projeto (Convênio 610093/03-7 MCT/CNPq): IEPA.14p.
- SANTOS, V. F. dos, OLIVEIRA, D. M.; ABREU, M. H. de.; FIGUEIREDO Jr., A.G. de. 2005. Levantamento e Avaliação de Dados de Marés. Rel. de Projeto (Convênio 610093/03-7 MCT/CNPq): IEPA,11p.
- SANTOS, V. F. dos ; FIGUEIREDO JR, A. G. ; SILVEIRA, O. F. M. ; POLIDORI, L. 2003. Mecanismos de Modificações de Curto Período na Planície Costeira do Amapá. *Bol. de Resumos IX Congr. da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*. Recife: ABEQUA, Cd-Rom.
- American Public Health Association-APHA. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17<sup>th</sup> ed. Washington: APHA.