

Aspectos sedimentológicos e geoquímicos de um estuário amazônico: estuário do rio Sucuriju, Amapá, Brasil

Sedimentological and geochemical aspects of an Amazon estuary: the Sucuriju River estuary, Amapá, Brazil

Diego de Arruda Xavier^I, Caio Daniel Nascimento dos Reis^{II}, José Francisco Berrêdo Reis da Silva^I

^IMuseu Paraense Emílio Goeldi/MCTIC. Belém, Pará, Brasil

^{II}Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Belém, Pará, Brasil

Resumo: O objetivo deste estudo é analisar o estuário do rio Sucuriju quanto às distribuições dos parâmetros sedimentológicos, geoquímicos e físico-químicos intersticiais, a fim de auxiliar estudos sobre vulnerabilidade a risco ambiental, quanto a um possível impacto decorrente de derrame de óleo na região do Cabo Norte, no estado do Amapá. Foram coletadas 66 amostras de sedimentos superficiais, submetidas a análises das porcentagens granulométricas, de teores de carbono orgânico, nitrogênio total, fósforo total, salinidade intersticial, pH intersticial e potencial redox intersticial. As porcentagens granulométricas apresentaram médias para areia de $19,51 \pm 13,44\%$, para silte de $72,50 \pm 11,17\%$ e para argila de $7,98 \pm 4,49\%$. Salinidade, pH e potencial redox registraram médias de $20,76 \pm 2,59$, $7,20 \pm 0,26$ e $192,32 \pm 129,96$ mV, respectivamente. Os resultados de carbono orgânico, nitrogênio total, fósforo total e a razão C/N apresentaram, respectivamente, médias de $1,34 \pm 0,71 \text{ g.kg}^{-1}$, $0,38 \pm 0,23 \text{ g.kg}^{-1}$, $103,93 \pm 63,89 \text{ g.kg}^{-1}$ e $4,45 \pm 3,96$. As características sedimentares e geoquímicas apresentadas para o estuário do rio Sucuriju, somadas aos processos hidrodinâmicos e climáticos da região, determinaram os possíveis pontos de maior vulnerabilidade do sistema estuarino em relação a incidente com óleo. Estes pontos estão localizados nas áreas marginais e em áreas adjacentes à foz do sistema estuarino. Esse resultado servirá de base para a compreensão e a elaboração de possíveis planos de mitigação a eventos dessa magnitude.

Palavras-chave: Granulometria. Carbono orgânico. Nitrogênio total. Fósforo total. Parâmetros físico-químicos.

Abstract: The study aims to analyze the Sucuriju estuary through sedimentological, geochemical and physical-chemistry parameters, in support of a vulnerability study of environmental risk of a possible oil spill accident in the Cabo Norte region, Amapá, Brazil. Sixty-six samples of surface sediment were employed for grain size percentage characteristics; total organic carbon, total nitrogen and total phosphorus concentrations; salinity, pH, and redox potential in interstitial sediments. The fraction percentages showed for sand an average of $19.51 \pm 13.44\%$, silt $72.50 \pm 11.17\%$, and clay $7.98 \pm 4.49\%$. Salinity, pH, and redox potential registered averages of 20.76 ± 2.59 , 7.20 ± 0.26 , and 192.32 ± 129.96 mV, respectively. The organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, and C/N ratios registered averages of $1.34 \pm 0.71 \text{ g.kg}^{-1}$, $0.38 \pm 0.23 \text{ g.kg}^{-1}$, $103.93 \pm 63.89 \text{ g.kg}^{-1}$ and 4.45 ± 3.96 , respectively. The sedimentary and geochemistry characteristics showed for the Sucuriju estuary, added with hydrodynamic and climatic processes determine a possible high vulnerability of a possible oil spill incident in the Amapá coastal system. This result will serve as a base for the elaboration of mitigation plans for these events.

Keywords: Grain size. Organic carbon. Total nitrogen. Total phosphorus. Physical-chemistry parameters.

XAVIER, D. A., C. D. N. REIS & J. F. B. R. SILVA, 2017. Aspectos sedimentológicos e geoquímicos de um estuário amazônico: estuário do rio Sucuriju, Amapá, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 12(3): 411-422.

Autor para correspondência: Diego de Arruda Xavier. Museu Paraense Emílio Goeldi/MCTIC. Coordenação de Ciências da Terra e Ecologia. Av. Perimetral, 1901 – Terra Firme. Belém, PA, Brasil. CEP 666077-830 (diego.a.xavier@gmail.com).

Recebido em 05/07/2017

Aprovado em 25/08/2017

Responsabilidade editorial: Fernando da Silva Carvalho Filho



INTRODUÇÃO

Os estuários amazônicos são ecossistemas dinâmicos e estão entre os ambientes costeiros mais produtivos (Monteiro *et al.*, 2015). Estes estuários são a principal zona de deposição de material sedimentar, de elementos químicos e biogênicos associados (carbono, nitrogênio e fósforo), com origem primária ou vindos de fontes continentais (Thornton & McManus, 1994; Etcheber *et al.*, 1999; Barcellos *et al.*, 2005). Exibem forte gradiente de salinidade, alta variação do material particulado e são fundamentais na manutenção do ciclo da matéria orgânica (Miranda, 1984; Covelli *et al.*, 2007).

Os parâmetros sedimentológicos são bons instrumentos para a caracterização da distribuição sedimentar e para a interpretação da hidrodinâmica de ambientes estuarinos (Pettijohn, 1975; Suguio, 1980, 2003). Além destas interpretações, a granulometria associada aos teores de matéria orgânica sedimentar fornece base para identificar áreas vulneráveis a possíveis impactos ambientais, ocasionados pela propriedade de adsorção das argilas e da matéria orgânica (Tyson, 1995).

O comportamento da matéria orgânica sedimentar em ambientes estuarinos, bem como as concentrações de carbono, de nitrogênio e de fósforo apresentam particularidades entre cada estuário, determinadas por fatores como gênese e morfologia, condições hidrodinâmicas, físico-químicas, biológicas, climáticas e o aporte de materiais locais (Barcellos *et al.*, 2005).

O estudo da matéria orgânica sedimentar é importante por registrar as mudanças ambientais em escala local e global (Summons, 1993), apresentando-se sensível a algumas condições hidrológicas, químicas e biológicas da coluna d'água; aos aportes de material marinho e continental; e às características sedimentológicas (Bader, 1955; Cifuentes, 1991; Tyson, 1995).

Além dos estudos sedimentológicos e da matéria orgânica, os parâmetros físico-químicos intersticiais (salinidade, pH e potencial redox) são responsáveis pelo desenvolvimento e pela distribuição espacial da

vegetação, bem como pela preservação da matéria orgânica sedimentar. Variações nesses parâmetros ocasionam adaptações no ambiente, modificando os padrões geoquímicos e sedimentológicos (Mckee, 1993; Marchand *et al.*, 2003, 2004). Outros parâmetros, como clima, flutuação da maré, evolução da vegetação e bioturbação, contribuem para a complexidade geoquímica dos ambientes estuarinos amazônicos (Berrêdo *et al.*, 2008; Xavier *et al.*, 2012).

Devido à carência de estudos sedimentológicos e geoquímicos em estuários amazônicos, esta pesquisa tem como objetivo analisar a distribuição sedimentológica e geoquímica (teores de carbono orgânico total, nitrogênio total e fósforo total) e dos parâmetros físico-químicos (salinidade, pH e potencial redox intersticial) nos sedimentos do estuário do rio Sucuriju, a fim de elaborar cartas de distribuição espacial desses parâmetros, as quais servirão de base para futuros estudos sobre vulnerabilidade ao risco ambiental e ao possível impacto de derrame de óleo na região do Cabo Norte, estado do Amapá.

MATERIAL E METÓDOS

CARACTERÍSTICAS E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A planície costeira do Amapá está inserida no limite de três reservas federais: Reserva Biológica do Lago Piratuba (3.570 km²) (Figura 1B), Parque Nacional do Cabo Orange (6.190 km²) e Estação Ecológica Maracá-Jipioca (720 km²), gerenciadas pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) (Silveira, 1998) (Figura 1A).

O distrito de Sucuriju (01° 39' 49" N e 49° 55' 43" W) está localizado na região do Cabo Norte, no extremo leste do estado do Amapá. Encontra-se à margem direita do rio Sucuriju, com área de 167 km², distante cerca de 220 km da capital do estado, Macapá (Xavier *et al.*, 2012). A vegetação é caracterizada por bosques de manguezal mistos, dominados por *Rhizophora* sp. e *Avicennia* sp., influenciados pela topografia e pelos períodos de inundação (Costa Neto *et al.*, 2007).

O padrão climático para a região registra altos índices térmicos do tipo megatérmico, caracterizado por temperaturas elevadas ao longo do ano, com médias oscilando entre 26 a 28 °C. O regime pluviométrico apresenta-se em torno de 3.000 mm.ano⁻¹. É definido por duas estações sazonais: o período chuvoso ocorre entre os meses de janeiro a julho e o período seco, de agosto a dezembro (Peres *et al.*, 1974; Bezerra *et al.*, 1990).

A planície costeira amapaense é dominada pelo regime de macromarés, que imprime forte hidrodinâmica à região, além da ocorrência esporádica de pororocas, fenômeno associado à ação da maré, caracterizada pela entrada de ondas no estuário. Este fenômeno ocorre, geralmente,

durante as marés de sizígia, potencializadas durante os períodos de equinócios (Chanson, 2005; Santos *et al.*, 2009).

Os processos evolutivos dessa região têm uma relação intrínseca com as evoluções geológica e tectônica regionais (Allison *et al.*, 1995, 1996; Costa & Silveira, 1998). Duas unidades geológicas foram identificadas por Silveira (1998) para a região do Cabo Norte, sendo o período Terciário caracterizado pela Formação Barreiras, com sedimentos argilosos a areno-argilosos, contendo aspecto mosqueado de coloração amarelo-avermelhada a avermelhadas; já o período Quaternário é composto por sedimentos incosolidados quartzosos e lamosos (silte e argila), de coloração cinza-claro a cinza-escuro.

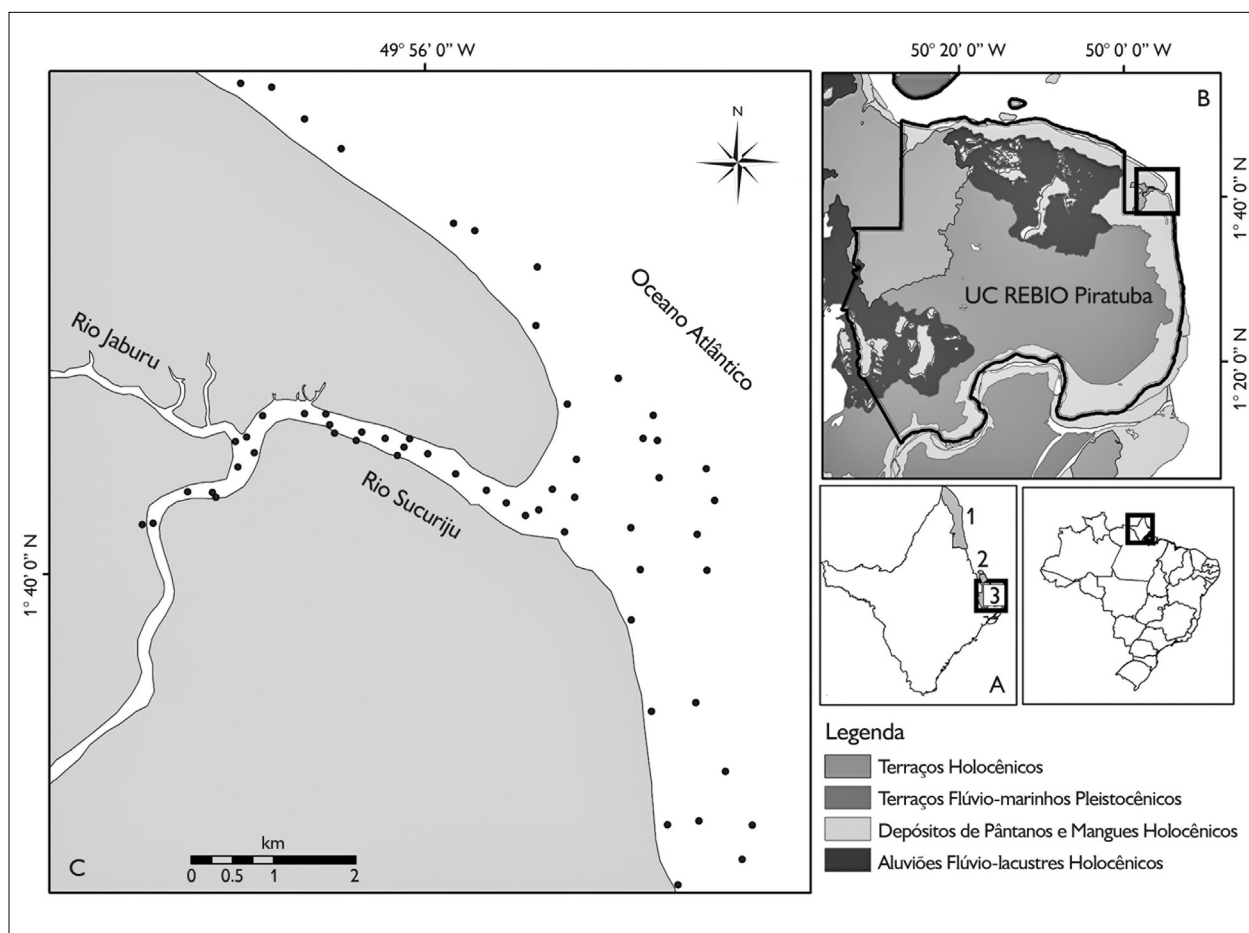


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo: A) localização das reservas federais (1) Parque Nacional do Cabo Orange, (2) Estação Ecológica Maracá-Jipiôca e (3) Reserva Biológica do Lago Piratuba; B) Reserva Biológica do Lago Piratuba; C) estuário do rio Sucuriju.

ETAPA DE CAMPO

A etapa de campo foi realizada no período de 24 de outubro a 3 de novembro de 2007. Os pontos amostrados foram pré-definidos em uma base cartográfica, equidistantes na parte interna do rio Sucuriçu em 250 m; a partir da foz e das margens adjacentes, equidistantes em 500 m. A partir da malha estabelecida em campo, foi utilizado um amostrador pontual de sedimento superficial (*Van Veen*) e um GPS Garmin, totalizando 66 amostras representativas para a área (Figura 1C).

MÉTODOS ANALÍTICOS

Quantificação granulométrica

Os pontos sub-amostrados foram secados em estufa a 50 °C, sendo pesadas 100 g de sedimentos para a análise. O fracionamento das porções de areia, silte e argila foi baseado no método proposto por Suguio (1980), consistindo na separação da fração areia da lama (silte e argila) pelo método de peneiramento por via úmida, em malha de 0,062 mm. Em seguida, as porções silte e argila foram fracionadas por centrifugação a 1.500 rpm por 3 minutos. Ao final, as frações foram secadas e devidamente pesadas, a fim de serem efetuados os cálculos da determinação de suas porcentagens com base no peso inicial.

Quantificação das concentrações de carbono orgânico, nitrogênio total e fósforo total

As concentrações de carbono orgânico (CO) obedeceram ao método proposto por Nelson & Sommers (1996), que é baseado na oxidação da matéria orgânica presente em 0,1 g de sedimento em 10 ml de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ - 0,5 N) e 10 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Após repouso de 30 minutos, foram adicionados 10 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4), 50 ml de água destilada e 1 ml de indicador difenilamina, em seguida titulado com sulfato ferroso amoniacal ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ - 0,5N).

As concentrações de nitrogênio total (NT) obedeceram ao método Micro-Kjeldhal, no qual o nitrogênio presente

em 0,5 g de sedimento foi digerido por uma solução digestora, composta por ácido sulfúrico (H_2SO_4), acrescida de sais (K_2SO_4 ou Na_2SO_4) para aumentar a temperatura de ebulição do H_2SO_4 , e de catalisadores, tais como Se, Hg ou Cu, que promovem aumento da velocidade de oxidação da matéria orgânica (Bremner, 1965; Silva, 1991). A captação dos gases amoniacais foi obtida em um erlenmeyer de 100 ml, com 25 ml de ácido bórico a 4% e titulado com ácido sulfúrico a 0,02 N.

As concentrações de fósforo total (FT) seguiram o método proposto por Cavalcante (1995), no qual o sedimento é lixiviado com ácido clorídrico (1N) durante 16 horas. A quantificação da concentração de fósforo obedeceu à metodologia do azul de molibdato, com o auxílio de um espectrofotômetro da marca *Spectro Vision DB1880S Double Beam*. As leituras no espectrofotômetro foram realizadas no comprimento de onda de 830 nm e, por meio de cálculos, foram obtidas as concentrações de fósforo total nos sedimentos (Camouze, 1994).

Parâmetros físico-químicos intersticiais

Os dados de salinidade foram obtidos por meio de um refratômetro manual (ATAGO), mediante a extração, sob pressão, de algumas gotas de água intersticial. Os registros dos valores de pH e do potencial redox (mV) foram obtidos através da inserção direta de eletrodo de vidro e de platina no sedimento, respectivamente, e mensurados em um equipamento da marca Metrom 744 (Berrêdo *et al.*, 2008).

Métodos estatísticos

A obtenção dos valores de média e de desvio padrão para todos os parâmetros analisados foi feita por meio de cálculos estatísticos, efetuados no *software* BioEstat 5.0.

RESULTADOS

GRANULOMETRIA

A fração areia variou entre 0,60 a 62,81%, com média de $19,51 \pm 13,44\%$, e as maiores porcentagens foram

localizadas na foz e no canal do estuário. As porcentagens de silte variaram de 35,77 a 92,73%, com média de $72,50 \pm 11,17\%$, apresentando-se predominante em todo o estuário. A fração argila variou de 1,42 a 30,58%, com média de $7,98 \pm 4,49\%$, e suas maiores porcentagens foram localizadas nas margens do estuário (Figura 2).

CARBONO ORGÂNICO, NITROGÊNIO TOTAL E FÓSFORO TOTAL

Os resultados de carbono orgânico (CO) variaram de 0,01 a $2,92 \text{ g.kg}^{-1}$, com média de $1,34 \pm 0,71 \text{ g.kg}^{-1}$; os de nitrogênio total (NT) variaram de 0,01 a $1,20 \text{ g.kg}^{-1}$, com média de $0,38 \pm 0,23 \text{ g.kg}^{-1}$; os de fósforo total (PT), de

5,81 a $400,99 \text{ g.kg}^{-1}$, com média de $103,93 \pm 63,89 \text{ g.kg}^{-1}$. A razão C/N de Redfield *et al.* (1958) variou de 0,00 a 17,88, com média de $4,45 \pm 3,96$ (Figura 3).

PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Os parâmetros físico-químicos das águas intersticiais do estuário do rio Sucuriçu apresentaram valores de salinidade variando de 15 a 27, com média de $20,76 \pm 2,59$. O pH variou de levemente ácido (6,65) a levemente alcalino (7,68), com média de $7,20 \pm 0,26$, e o potencial redox de levemente redutor (-117 mV) a levemente oxidante (306 mV), com média de $192,32 \pm 129,96 \text{ mV}$ (Figura 4).

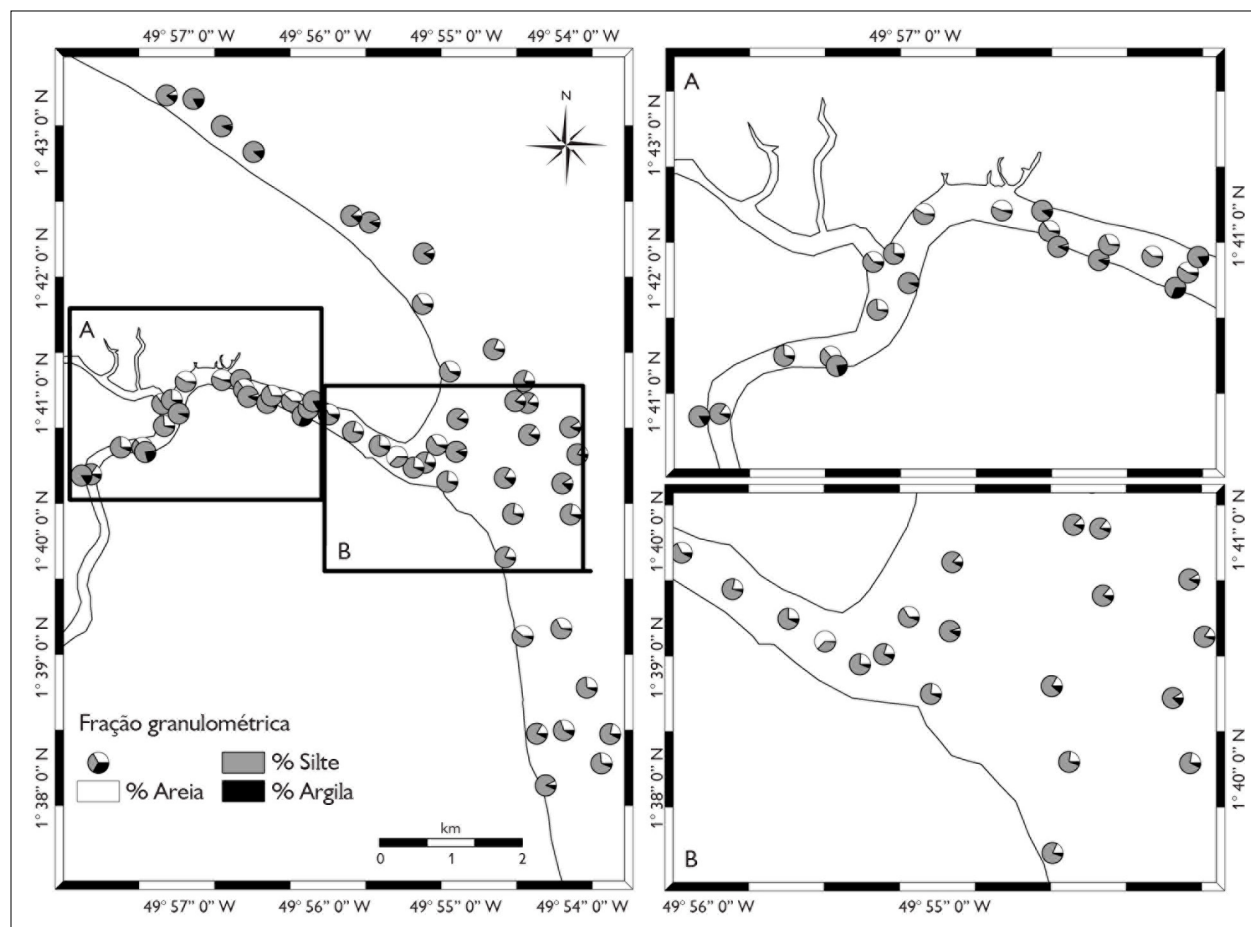


Figura 2. Mapa de distribuição horizontal das porcentagens das frações granulométricas: A) médio estuário do rio Sucuriçu; B) baixo estuário do rio Sucuriçu.

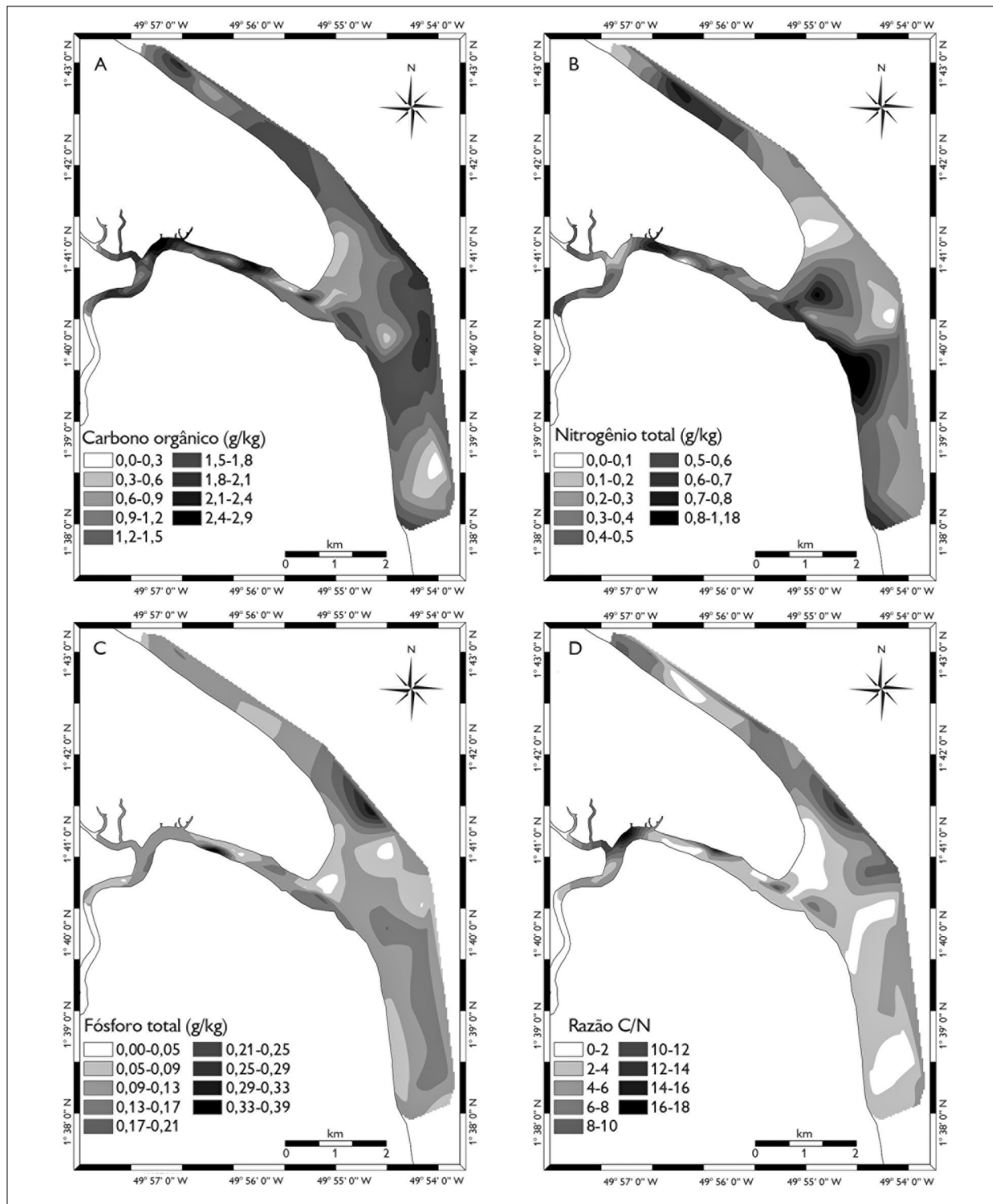


Figura 3. Mapa de distribuição horizontal com dados de carbono orgânico (A), nitrogênio total (B), fósforo total (C) e razão C/N (D).



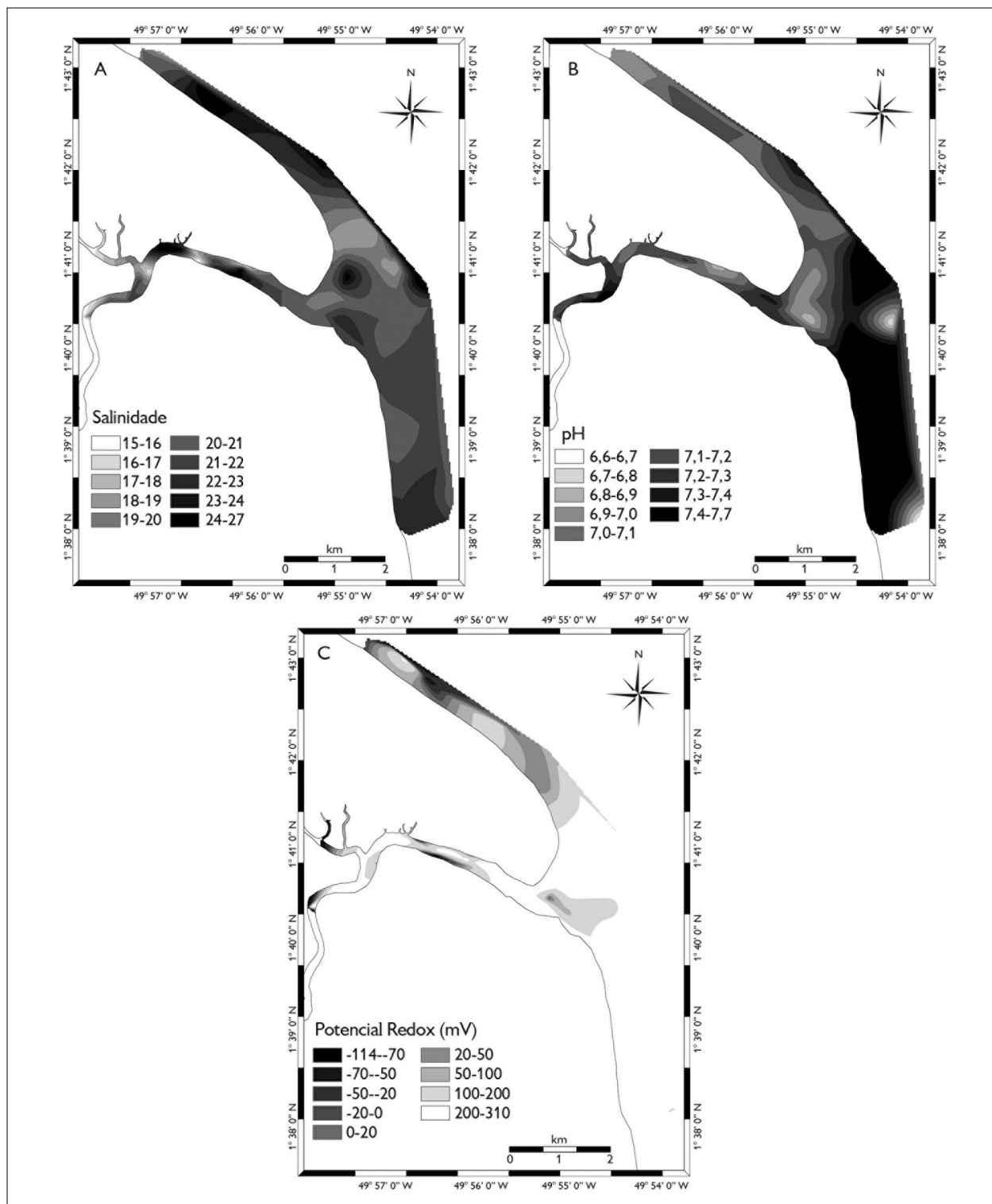
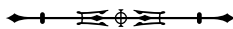


Figura 4. Mapa de distribuição horizontal de salinidade (A), de pH (B) e de potencial redox (C).



DISCUSSÃO

Para o estuário do rio Sucuriju, o período climático provavelmente foi o principal fator que contribuiu para a variação de alguns parâmetros registrados. Mudanças neste regime acarretaram, principalmente, variações na intensidade de vazão do rio (Xavier *et al.*, 2012, 2015). As maiores porcentagens de areia localizadas no interior do estuário (Figuras 2A e 2B) foram reflexos de alta intensidade hidrodinâmica, influenciadas pelo baixo regime pluviométrico e pela alta dinâmica de maré dentro do sistema estuarino (Perillo, 1995), além de estarem associadas à calha principal do sistema estuarino, local das maiores intensidades de corrente de maré (Suguio, 1980; Nichols & Biggs, 1985).

Associadas a essa maior porcentagem de areia, as concentrações de CO, de NT e de PT apresentaram os menores valores (Figuras 3A a 3C). Neste caso, a matéria orgânica sedimentar é dificilmente adsorvida pelas partículas de areia (Marchand *et al.*, 2003), mesmo que depositadas. Uma parte deste material experimenta intenso processo de oxidação, ocasionado pela entrada de águas marinhas mais oxigenadas no sistema estuarino (Marchand *et al.*, 2004), o qual influencia a variação dos valores de pH e o potencial redox intersticial (Krauskopf, 1972; Alongi, 1996; Franchi, 2004; Suguio, 2003; Marchand *et al.*, 2004; Berrêdo *et al.*, 2008). Esta variação nos parâmetros de pH e de potencial redox é observada na área interna do sistema estuarino, com valores de pH ligeiramente ácidos e de potencial redox levemente oxidantes, indicativos de áreas sob processos de oxidação da matéria orgânica (Berrêdo *et al.*, 2008; Xavier *et al.*, 2012) (Figuras 4B e 4C).

As maiores porcentagens de sedimentos finos (silte e argila), juntamente com os valores de CO, NT, PT e pH levemente alcalinos e potencial redox ligeiramente redutor foram localizados nas margens do estuário do rio Sucuriju (Figuras 2A e 2B, 3A a 3C e 4B e 4C). As áreas marginais do estuário são colonizadas por bosques de manguezais (Costa Neto *et al.*, 2006), ecossistema importante por reter grande parte de sedimentos finos e de matéria orgânica presente

no estuário (Schaeffer-Novelli *et al.*, 1990). Sua característica anóxica, apresentando baixa oxidação, influencia os valores de pH e de potencial redox, com resultados ligeiramente alcalinos e levemente redutores, respectivamente (Marchand *et al.*, 2004; Berrêdo *et al.*, 2008). Marchand *et al.* (2004) afirmam que o tipo de bosque de mangue pode influenciar na concentração da matéria orgânica sedimentar, sendo encontrados maiores valores de matéria orgânica sedimentar em bosque de *Rhizophora*. Os bosques de *Avicennia* são predominantes na região do Sucuriju (Costa Neto *et al.*, 2006) e evidenciam características de solo mais compactado, com baixa retenção de matéria orgânica quando comparado aos bosques de *Rizophora* (Marchand *et al.*, 2004).

Além da espécie predominante nos bosques de manguezais, a idade destes influencia a variação dos parâmetros físico-químicos, como o potencial redox e o pH nas concentrações de matéria orgânica sedimentar (CO, NT e PT) (Meyers, 1993, 1997; Marchand *et al.*, 2004; Magalhães *et al.*, 2008; Santos *et al.*, 2013; Bernini *et al.*, 2006; Onofre *et al.*, 2007). Manguezais jovens apresentam maior concentração de oxigênio gasoso nas camadas superficiais, ou seja, o processo de oxidação diminui em relação à profundidade. Apesar dessa característica ser bem expressiva em áreas com bosques de *Rhizophora*, os bosques de marginais do estuário do rio Sucuriju apresentaram características semelhantes (Krauskopf, 1972; Marchand *et al.*, 2003, 2004; Delaune & Reddy, 2005; Berrêdo *et al.*, 2008). Bosques de manguezais com essa característica apresentam correlações negativas entre os parâmetros pH e Eh, ocasionadas pela oxidação da matéria orgânica e de minerais sulfatados, aumentando a acidez no sedimento (Krauskopf, 1972; Alongi, 1996; Middelburg *et al.*, 1996; Clark *et al.*, 1998; Marchand *et al.*, 2003, 2004; Berrêdo *et al.*, 2008).

Além da granulometria, o regime de maré e a intensidade hidrodinâmica influenciam as características geoquímicas, o acúmulo e a deposição da matéria orgânica sedimentar no estuário do rio Sucuriju (Xavier *et al.*, 2015), o qual apresenta regime de macromaré assimétrica, com período de enchente menor do que o de vazante, além

de intensidade hidrodinâmica maior durante o período de enchente (Takiyama, 2004). Segundo Takiyama (2004), essa característica de maior intensidade hidrodinâmica no estuário é intensificada durante o período seco, indicando que o aumento na intensidade da energia hidrodinâmica na calha principal do estuário poderia ter potencializado o processo de ressuspensão do material sedimentar fino, principalmente da matéria orgânica sedimentar, possivelmente transportada para áreas mais a montante do rio (Figura 3A).

O regime de maré também pode ter influenciado o comportamento da salinidade ao longo do estuário do rio Sucuriju, demonstrando a influência marinha sobre a descarga fluvial durante o período analisado. Durante o período seco, ocorrem registros esporádicos de eventos de pororoca na região, os quais podem provocar alterações também nos valores de salinidade intersticial e nas porcentagens de areia ao longo do estuário. O aumento na intensidade hidrodinâmica pode carrear sedimentos de granulometria mais grossa, fazendo com que as áreas intersticiais cresçam e facilitando a percolação de águas marinhas nestes interstícios (Suguio, 2003; Xavier *et al.*, 2012) (Figuras 2A e 4A). Berrêdo *et al.* (2008) demonstraram que essa relação entre os índices pluviométricos e a intrusão da cunha salina em águas intersticiais apresentam-se de forma negativa, nas quais o aumento dos índices pluviométricos causa diminuição dos valores de salinidade intersticial (Figura 4A).

Xavier *et al.* (2012) observaram, para o rio Sucuriju, a presença de duas zonas com propriedades físico-químicas diferentes: uma zona oxidante, localizada na foz do rio, apresentando valores mais salinos, potencial redox levemente oxidante e pH levemente alcalino, características de ambiente influenciado pelo contato direto com o oceano; outra zona redutora, situada nas proximidades do lago Piratuba, com menor salinidade, potencial redox levemente redutor e pH levemente ácido, sendo este um ambiente influenciado por características

de águas continentais. Entre essas duas zonas, pode-se observar uma área mista, com características estuarinas.

Em relação à razão C/N de Redfield (1958), o estuário do rio Sucuriju foi classificado como um ambiente predominantemente de origem marinha, apresentando, entretanto, pontos de origem continental principalmente nas áreas marginais do estuário (Figura 3D). Marchand *et al.* (2004) observaram características similares em estuários da Guiana Francesa. Vale ressaltar que as concentrações de PT presentes nos sedimentos do estuário do rio Sucuriju estão associadas aos processos de oxidação da matéria orgânica sedimentar (Li *et al.*, 2001; Hou *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2006; Yue *et al.*, 2007; Dao & Schwartz, 2010), aspecto confirmado por Lima *et al.* (1974, 1991), que afirmaram a inexistência de rochas fosfatadas no estado do Amapá.

As áreas de maior deposição de sedimentos finos e de matéria orgânica dentro do sistema estuarino são propícias para o acúmulo de poluentes, em especial de óleo (Föstner & Wittmann, 1981). Zonas com essas características apresentam grande capacidade de adsorção de óleo e de metais, o que as torna alvo para avaliar o nível de contaminação e elaborar planos de mitigação, a fim de diminuir os impactos relacionados a esses eventos (Santos *et al.*, 1997; Jesus *et al.*, 2004; Marques *et al.*, 2011). No caso do estuário do rio Sucuriju, as margens do sistema são colonizadas por bosques de manguezais, áreas de grande acúmulo de sedimento fino e de matéria orgânica, sendo estas propícias à maior retenção de poluentes e de óleo, devido à propriedade de adsorção das argilas e da matéria orgânica. A própria predominância de silte para todo o sistema estuarino o torna bastante sensível ao impacto de poluentes, tanto de óleo quanto de metais pesados.

CONCLUSÕES

As características sedimentares e geoquímicas apresentadas para o estuário do rio Sucuriju, somadas aos processos hidrodinâmicos e climáticos, foram os responsáveis por determinar os pontos de maior

vulnerabilidade a um possível incidente com óleo no sistema estuarino amapaense.

Um dos fatores que contribuiu para a dinâmica sedimentar e geoquímica dentro do sistema foi o período climático. Em períodos de menor pluviosidade, como o da pesquisa realizada, a vazão dos rios diminui e aumenta a intensidade hidrodinâmica de maré, intensificando a intrusão marinha no sistema estuarino. Com essa característica, a intensidade do transporte de sedimentos aumenta, depositando sedimentos de granulação grossa na área do canal principal do estuário, bem como sedimentos finos e matéria orgânica nas áreas marginais e de menor hidrodinâmica. Além de influenciar a distribuição sedimentar, este processo pode provocar alterações também no transporte de poluentes para o sistema estuarino, aumentando a deposição e a concentração destes em regiões mais a montante do estuário e nas zonas de maior sedimentação de granulação fina e de matéria orgânica.

A região costeira amapaense apresenta muitas particularidades, entre elas a mais importante é a influência da pluma do rio Amazonas na sedimentação da região costeira. Como a região do Cabo Norte está na rota de grandes companhias de transporte aquaviário, o estudo das características sedimentológicas e geoquímicas para a zona costeira amapaense servirá de base para compreender e planejar ações mitigatórias referentes a um possível impacto decorrente do derrame de óleo.

REFERÊNCIAS

- ALLISON, M. A., C. A. NITTRouer & G. C. KINEKE, 1995. Seasonal sediment storage on mudflats adjacent to the Amazon River. *Marine Geology* 125(3-4): 303-328. DOI: <[https://doi.org/10.1016/0025-3227\(95\)00017-S](https://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00017-S)>.
- ALLISON, M. A., C. A. NITTRouer, L. E. C. FARIAS JR., O. F. M. SILVEIRA & A. C. MENDES, 1996. Sources and sinks of sediments to the Amazon margin: the Amapá coast. *Geo-Marine Letters* 16(1): 36-40. DOI: <<https://doi.org/10.1007/BF01218836>>.
- ALONGI, D. M., 1996. The dynamics of benthic nutrients pools and fluxes in tropical mangrove forests. *Journal of Marine Research* 54(1): 123-148. DOI: <<https://doi.org/10.1357/0022240963213475>>.
- BADER, R. G., 1955. Carbon and nitrogen relations in surface and subsurface marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 7(5-6): 205-211. DOI: <[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(55\)90032-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(55)90032-6)>.
- BARCELLOS, R. L., G. B. B. BERBEL, E. S. BRAGA & V. V. FURTADO, 2005. Distribuição e características do fósforo sedimentar no sistema estuarino lagunar de Cananéia - Iguape, Estado de São Paulo, Brasil. *Geochimica Brasiliensis* 19(1): 22-36.
- BERNINI, E., M. A. B. SILVA, T. M. CARMO & G. R. F. CUZZUOL, 2006. Composição química do sedimento e de folhas das espécies do manguezal do estuário do Rio São Mateus, Espírito Santo, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica* 29(4): 689-699. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-84042006000400018>>.
- BERRÊDO, J. F., M. L. COSTA & M. P. S. PROGENE, 2008. Efeito das variações sazonais do clima tropical úmido sobre as águas e sedimentos de manguezais do estuário do rio Marapanim, costa nordeste do estado do Pará. *Acta Amazonica* 38(3): 473-482. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672008000300012>>.
- BEZERRA, P. E. L., W. OLIVEIRA, W. D. E. REGIS, J. E. M. BRAZÃO, J. GAVINHO & R. C. P. COUTINHO, 1990. Amazônia Legal: zoneamento das potencialidades e dos recursos naturais. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE)/SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA (SUDAM) (Ed.): **Projeto zoneamento das potencialidades dos recursos naturais da Amazônia Legal: geologia, solos e vegetação: 9-89**. IBGE, Rio de Janeiro.
- BREMNER, J. M., 1965. Inorganic forms of nitrogen. *Agronomy* 9: 1179-1237.
- CAMOUZE, J. P., 1994. **O metabolismo dos ecossistemas aquáticos: fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas: 1-254**. Edgard Blucher/FAPESP, São Paulo.
- CAVALCANTE, P. R. S., 1995. **Etude sur la mobilisation de phosphore, des formes et azotées et de quelques métaux associés dans les vases eutrophes: expérimentation sur les vases de l'Erdre "in situ" et laboratoire: 1-187**. Tese (Doutorado) – Université de Nantes, Nantes.
- CHANSON, H., 2005. Mascaret, Aegir, Pororoca, Tidal Bore. Quid? Où? Quand? Comment? Pourquoi? *La Houille Blanche* (3): 103-114. DOI: <<https://doi.org/10.1051/lhb:200503014>>.
- CIFUENTES, L. A., 1991. Spatial and temporal variations in terrestrially derived organic matter from sediments of the Delaware estuary. *Estuaries* 14(4): 414-429. DOI: <<https://doi.org/10.2307/1352266>>.
- CLARK, M. W., D. MCCONCHIE, D. W. LEWIS & P. SAENGER, 1998. Redox stratification and heavy metal partitioning in Avicennia - dominated mangrove sediments: a geochemical model. *Chemical Geology* 149(3-4): 147-171. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00034-5)>.

- COSTA, L. T. R. & O. F. M. SILVEIRA, 1998. The Araguari Estuary: an example of a Tide Dominated Estuary. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** 70(2): 201-211.
- COSTA NETO, S. V., C. SENNA & R. D. S. COUTINHO, 2006. **Vegetação das áreas Sucuriju e regiões dos lagos, no Amapá**. Disponível em: <http://www.iepa.ap.gov.br/probio/relatorios/Relatorio_Cap03.pdf>. Acesso em: 15 junho 2017.
- COSTA NETO, S. V., C. S. F. SENNA, L. C. L. TOSTES & S. R. M. SILVA, 2007. Macrófitas aquáticas das regiões dos lagos do Amapá, Brasil. **Revista Brasileira de Biociências** 5(supl. 2): 618-620.
- COVELLI, S., R. PIANI, A. ACQUAVITA, S. PREDONZANI & J. FAGANELI, 2007. Transport and dispersion of particulate Hg associated with a river plume in coastal Northern Adriatic environments. **Marine Pollution Bulletin** 55(10-12): 436-450. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.09.006>>.
- DAO, T. H. & R. C. SCHWARTZ, 2010. Mineralizable phosphorus, nitrogen, and carbon relationships in dairy manure at various carbon-to-phosphorus ratios. **Bioresource Technology** 101(10): 3567-3574. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.070>>.
- DELAUNE, R. D. & K. R. REDDY, 2005. Redox potential. In: D. HILLEL (Ed.): **Encyclopedia of soils in the environment**: 366-371. Academic Press, Oxford.
- ETCHEBER, H., J. C. RELEXANS, M. BELIARD, O. WEBER, R. BUSCAIL & S. HEUSSNER, 1999. Distribution and quality of sedimentary organic matter on the Aquitanian Margin (Bay of Biscay). **Deep Sea Research Part II** 46(10): 2249-2288. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(99\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(99)00062-4)>.
- FRANCHI, G. F., 2004. **Utilização de turfa como adsorvente de metais pesados**: 1-190. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- FÖSTNER, U. G. & G. T. W. WITTMANN, 1981. **Metal pollution in the aquatic environmental**: 1-486. Springer-Verlag, Berlin.
- HOU, L. J., J. J. LU, M. LIU & S. Y. XU, 2006. Species and bioavailability of phosphorus in surface sediments from the shoals in the Yangtze estuary. **Acta Scientiae Circumstantiae** 26: 488-494.
- JESUS, H. C., E. A. COSTA, A. S. F. MENDONÇA & E. ZONDONADE, 2004. Distribuição de metais pesados em sedimentos estuarinos da Ilha de Vitória – ES. **Química Nova** 27(3): 378-386. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422004000300004>>.
- KRAUSKOPF, K. B., 1972. **Introdução à geoquímica I**: 1-294. Polígono S. A., São Paulo.
- LI, R. W., H. LI, Y. LI, S. K. ZHANG, Z. QIAN, Z. P. MA & Z. X. JIANG, 2001. Study of the heavy metals, nitrogen and phosphorus contaminants in the sediments of the Yellow river delta. **Acta Sedimentologica Sinica** 19(4): 622-629.
- LIMA, M. I. C., R. M. MONTALVÃO, R. S. ISSLER, A. S. OLIVEIRA, M. A. S. BASEI, J. F. V. ARAÚJO & G. G. SILVA, 1974. Levantamento exploratório de solos. In: BRASIL. **Projeto RADAMBRASIL**: Folha NA/NB.22 - Macapá: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra: 9-85. Programa de Integração Nacional (Levantamento de Recursos Naturais, 6), Rio de Janeiro.
- LIMA, M. I. C., P. E. L. BEZERRA & H. J. T. ARAÚJO, 1991. Sistematização da geologia do estado do Amapá. **Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia** 3: 322-335.
- MAGALHÃES, C., C. TEIXEIRA, R. TEIXEIRA, A. MACHADO, I. AZEVEDO & A. A. BORDALO, 2008. Dissolved organic carbon and nitrogen dynamics in the Douro River estuary, Portugal. **Ciencias Marinas** 34(3): 271-282.
- MARCHAND, C., E. LALLIER-VERGÈS & F. BALTZER, 2003. The composition of sedimentary organic matter in relation to the dynamic features of a mangrove-fringed coast in French Guiana. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 56(1): 119-130. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00134-8)>.
- MARCHAND, C., F. BALTZER, E. LALLIER-VERGÈS & P. ALBÉRIC, 2004. Pore-water chemistry in mangrove sediments: relationship with species composition and developmental stages (French Guiana). **Marine Geology** 208(2-4): 361-381. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.04.015>>.
- MARQUES, J. S. J., T. P. RANGEL, F. P. BRITO, M. G. ALMEIDA, M. S. M. B. SALOMÃO, A. A. R. GOBO, L. P. SOUZA-SANTOS, C. M. V. ARAÚJO-CASTRO, M. F. COSTA & C. E. REZENDE, 2011. Geoquímica de metais em sedimentos da zona estuarina do complexo industrial Porto de Suape, PE - Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada** 11(4): 379-387.
- MCKEE, K. L., 1993. Soil physico-chemical patterns and mangrove species distribution: reciprocal effects? **Journal of Ecology** 81(3): 477-487. DOI: <<https://doi.org/10.2307/2261526>>.
- MEYERS, P. A., 1993. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. **Chemistry Geology** 144(3-4): 289-302. DOI: <[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90059-0)>.
- MEYERS, P. A., 1997. Organic geochemical proxies of paleogeographic, paleolimnologic and paleoclimatic processes. **Organic Geochemistry** 27: 213-250.
- MIDDELBURG, J. J., J. NIEUWENHUIZE, F. J. SLIM & B. OHOWA, 1996. Sediment biogeochemistry in an East African mangrove forest (Gazi Bay, Kenya). **Biogeochemistry** 34(3): 133-155. DOI: <<https://doi.org/10.1007/BF00000899>>.
- MIRANDA, L. B., 1984. **Cinemática e dinâmica dos estuários**: 1-360. BSP, São Paulo.
- MONTEIRO, S. M., M. EL-ROBRINI & I. C. C. ALVES, 2015. Dinâmica sazonal de nutrientes em um estuário amazônico. **Mercator** 14(1): 151-162. DOI: <<http://dx.doi.org/10.4215/RM2015.1401.0010>>.

- NELSON, D. W. & L. E. SOMMERS, 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: C. A. BLACK (Ed.): **Methods of soil analysis**: 961-1010. Soil Science of America and American Society of Agronomy, Madison.
- NICHOLS, M. M. & R. B. BIGGS, 1985. Estuaries. In: R. A. DAVIS JR. (Ed.): **Coastal sedimentary environments**: 77-186. Springer-Verlag, New York.
- ONOFRE, C. R. E., J. J. CELINO, A. F. S. QUEIROZ & R. M. W. NANO, 2007. Biodisponibilidade de metais traços nos sedimentos de manguezais da porção norte da Baía de Todos os Santos, Bahia, Brasil. **Revista de Biologia e Ciências da Terra** 7(2): 65-82.
- PERES, R. N., N. M. SERRUYA & L. S. VIEIRA, 1974. Levantamento exploratório de solos. In: BRASIL. **Projeto RADAMBRASIL**: Folha NA/NB.22 - Macapá: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra: 1-120. Programa de Integração Nacional (Levantamento de Recursos Naturais, 6), Rio de Janeiro.
- PERILLO, G. E., 1995. **Geomorphology and sedimentology of estuaries**: 1-470. Elsevier Science, New York/Amsterdam.
- PETTIJOHN, F. J., 1975. **Sedimentary rocks**: 1-628. Harper and Row Publishers, New York.
- REDFIELD, A. C., 1958. The biological control of chemical factors in the environment. **American Scientist** 46(3): 205-221.
- SANTOS, A. L. F., A. F. S. QUIROZ & L. S. MASCARENHAS, 1997. Concentrações de metais pesados em sedimentos de manguezais do estuário do rio Joanes – BA, subsídios para estudos de monitoramento em regiões do litoral norte do estado da Bahia. **Sitientibus** (17): 197-204.
- SANTOS, V. F., L. POLIDORI, O. F. M. SILVEIRA & A. G. FIGUEIREDO JR., 2009. Contribuição do RADARSAT-1 para estudos do fenômeno da pororoca no estuário do rio Araguari, Amapá. **Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto** 14: 7425-7431. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.18.03.23/doc/7425-7431.pdf>>. Acesso em: 15 junho 2017.
- SANTOS, D. C., M. O. FARIAS, C. L. R. LIMA, R. J. KUNDE, C. N. PILLON & C. A. FLORES, 2013. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural** 43: 838-844.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y., G. CINTRÓN-MOLERO, R. R. ADAIME & T. M. CAMARGO, 1990. Variability of mangrove ecosystems along the Brazilian coast. **Estuaries** 13(2): 204-218.
- SILVA, S. B., 1991. **Análise química de solos**: 1-41. FCAP (Informe Didático, 11), Belém.
- SILVEIRA, O. F. M., 1998. **A planície costeira do Amapá: dinâmica de ambiente costeiro influenciado por grandes fontes fluviais quaternárias**: 1-215. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- SUGUIO, K., 1980. **Rochas sedimentares**: propriedade, gênese e importância econômica: 1-499. Edgar Blücher Ltda., São Paulo.
- SUGUIO, K., 2003. **Geologia sedimentar**: 1-416. Edgard Blücher Ltda., São Paulo.
- SUMMONS, R. E., 1993. Biochemical cycles: a review of fundamental aspects of organic matter formation, preservation and composition. In: M. H. ENGEL & S. A. MACKO (Ed.): **Organic geochemistry**: 3-21. Springer, Boston. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2890-6_1>.
- TAKIYAMA, L. R., 2004. Caracterização espacial dos parâmetros de qualidade da água na região do Lago Piratuba e Vila do Sucuriçu. **Anais do Workshop Técnico-Científico Projeto PETRORISCO** 3: 1 CD-ROM.
- THORNTON, S. F. & J. MCMANUS, 1994. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay Estuary, Scotland. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 38(3): 219-233. DOI: <<https://doi.org/10.1006/ecss.1994.1015>>.
- TYSON, R. V., 1995. **Sedimentary organic matter**: 1-589. Chapman & Hall, London.
- WANG, S., X. JIN, H. ZHAO & F. WU, 2006. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China. **Colloids and Surfaces A** 273(1-3): 109-116. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.08.015>>.
- YUE, W. Z., X. P. HUANG & C. C. SUN, 2007. Distribution and pollution of nitrogen and phosphorus in surface sediments from the Pearl river estuary. **Oceanologia et Limnologia Sinica** 38(2): 111-117.
- XAVIER, D. A., N. C. GUERRA, J. F. BERRÊDO & O. F. M. SILVEIRA, 2012. Análise do comportamento físico-químico da água intersticial do sedimento do rio Sucuriçu – Cabo Norte – Amapá. **Tropical Oceanography** 40(1): 119-132.
- XAVIER, D. A., R. L. BARCELLOS, J. F. BERRÊDO & O. F. M. SILVEIRA, 2015. Caracterização sedimentar subsuperficial recente da planície costeira amazônica: o exemplo da Região do Cabo Norte – AP. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology** 19(2): 38-46.