

Artigo de Pesquisa

CARACTERIZAÇÃO MULTITEMPORAL DE BARRAS FLUVIAIS NO ARQUIPÉLAGO DE MARIUÁ, MÉDIO RIO NEGRO, AMAZONAS**Multitemporal characterization of river bars in the Mariuá Archipelago, Middle River Negro, Amazonas**

Jefferson Jesus de Souza¹, Emílio Alberto Amaral Soares², Sonia Hatsue Tatum³, Ricieri Raimundo Pantoja Tarabossi⁴, Márcio Yee⁵, Rodolfo Dino⁶, Luzia Antonioli⁷, Fábio Leite Dias⁸

¹ Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, Brasil. E-mail: jeff_0110@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9473-8430>

² Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, Brasil E-mail: easoares@ufam.br

 <https://orcid.org/0000-0002-3097-8187>

³ Universidade Federal de São Paulo, Instituto do Mar, Santos, Brasil. E-mail: sonia.tatumi@unifesp.br

 <https://orcid.org/0000-0002-4990-4444>

⁴ Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geociências, Manaus, Brasil E-mail: ricieri.geo@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5857-0709>

⁵ Universidade Federal de São Paulo, Instituto do Mar, Santos, Brasil, E-mail: marcio.yee@unifesp.br

 <https://orcid.org/0000-0002-7639-7265>

⁶ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Rio de Janeiro, Brasil E-mail: dinouerj@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-5310-4685>

⁷ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Estratigrafia e Paleontologia,, Rio de Janeiro, Brasil E-mail: luantonioli7@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7846-6324>

⁸ Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, Brasil E-mail: fabioleitedias7@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7074-4078>

Recebido em 19/02/2023 e aceito em 06/02/2024

RESUMO: Este trabalho apresenta a evolução morfológica de barras arenosas da porção oeste do Arquipélago de Mariuá, médio curso do Rio Negro. Apesar desse arquipélago ser considerado o maior do planeta, estudos referentes à última fase de sedimentação das ilhas e barras ainda são escassos, principalmente relacionados aos processos de erosão e sedimentação. Foram utilizadas ferramentas de sensoriamento remoto, por meio da análise multitemporal de imagens Landsat, para o

entendimento da evolução morfológica das barras arenosas no intervalo temporal de 31 anos (1985 - 1997 - 2016). No primeiro período (1985 - 1997) a taxa de erosão foi maior que a deposição, enquanto no segundo período (1997 - 2016) predominou a dinâmica deposicional acrescionária, ambas relacionadas a variação do aporte sedimentar. Com base nos resultados obtidos, o aumento ou a diminuição do aporte sedimentar foi relacionado com as mudanças morfológicas das barras arenosas, bem como aos períodos de maior e menor precipitação, que refletem as características dos fenômenos El Niño e La Niña na Amazônia. Apesar da análise multitemporal das barras no arquipélago envolverem um intervalo de tempo recente e curto (31 anos), o resultado pontual de datação por Luminescência Opticamente Estimulada (LOE) indica que a sedimentação das barras iniciou há pelo menos cinco (05) séculos.

Palavras-chave: Geomorfologia fluvial; Barras e ilhas; Sedimentação e erosão; Bacia do Rio Negro, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT: This work presents the morphological evolution of sandbars in the western portion of the Mariuá Archipelago, Rio Negro mid-course. Although this archipelago is considered the largest on the planet, studies regarding the last phase of sedimentation of the islands and bars are still scarce, mainly related to erosion and sedimentation processes. Remote sensing tools were used, through the multitemporal analysis of Landsat images, to understand the morphological evolution of the sandbars in the time interval of 31 years (1985-1997-2016). In the first stage (1985-1997) the erosion rate was higher than the deposition rate, while in the second stage (1997-2016) the accretionary depositional dynamics predominated, both related to the variation in the sedimentary input. From the results obtained, an increase or decrease of this contribution was observed and can be related to the morphological changes of the sandbars, as well as to the periods of greater and lesser precipitation, which reflect the characteristics of the El Niño and La Niña phenomena in the Amazon. Despite the multitemporal analysis of the bars indicating a recent and short time interval (31 years), the results obtained by dating by Optically Stimulated Luminescence indicate that the sedimentation of the bars began at least five (05) centuries ago.

Keywords: Fluvial Geomorphology; Bars and islands; Sedimentation and erosion; Rio Negro Basin, Remote Sensing.

INTRODUÇÃO

O Rio Negro é o principal tributário da margem esquerda do sistema fluvial Solimões-Amazonas. Nasce na região pré-andina, percorrendo mais de 1.700 quilômetros, e se conecta com sistemas fluviais do norte, leste, oeste e nordeste da bacia amazônica (GOULDING *et al.* 1989), sendo responsável por aproximadamente 14% do volume da água escoada pela bacia Filizola *et al.* (2009). No seu curso médio, o Rio Negro apresenta um estilo fluvial *anabranching* com multicanais que isolam ilhas alongadas estabilizadas por vegetação, parcialmente encobertas durante as enchentes sazonais, que formam o Arquipélago de Mariuá (LATRUBESSE *et al.*, 2005). Este arquipélago fluvial possui mais de 1.400 ilhas distribuídas em 275 km de extensão e aproximadamente 20 km de largura, sendo considerado o maior do planeta (OLIVEIRA, 2017). Em função da grande extensão em área e isolamento geográfico ainda é pouco estudado quanto aos aspectos sedimentológicos e geocronológicos, onde datação pontual por radiocarbono obtida por Labrubesse & Franzinelli (2005) indica que as ilhas do arquipélago se formaram a cerca de 3.600 anos AP (Antes do Presente). Além das ilhas, barras fluviais predominantemente arenosas de diversos tamanhos e formas apresentam-se isoladas e/ou agregadas as ilhas e margens dos canais. O termo barra fluvial tem

sido empregado para caracterizar feições deposicionais simples e complexas (Collinson, 1986), que exibem taxas de migração variadas, em função de fatores climáticos, topográficos e hidrológicos (SMITH, 1974; SANTOS, 1992) e que exibem relativa instabilidade morfológica (BRIDGE, 2002).

Nos últimos anos, produtos de sensoriamento remoto adquiridos nas várias estações do ano tem enfatizado a dinâmica fluvial dos rios amazônicos, em particular, na evolução morfológica de barras recentes do sistema fluvial Solimões-Amazona (ex. PASSOS & SOARES, 2017), sendo também aplicada localmente em trechos do Baixo Rio Negro (SOARES, 2007; BARBOSA, 2015). Nesse contexto, imagens Landsat, obtidas entre os anos de 1985 e 2016, foram utilizadas para análise multitemporal das barras arenosas recentes na porção oeste do Arquipélago de Mariuá. Neste trecho do rio, as barras se mostraram bem evidentes numa área de aproximadamente 120 km² e representam a última fase de evolução do arquipélago. As mudanças morfológicas das barras, no intervalo temporal de 31 anos, foram relacionadas às etapas de sedimentação, erosão e estabilidade, bem como aos eventos El Niño e La Niña registrados nas últimas décadas na Amazônia.

ASPECTOS GEOLÓGICOS E FISIAGRÁFICOS

O arquipélago se desenvolveu sobre rochas siliciclásticas (siltitos e/ou argilitos com intercalações de arenitos conglomeráticos) da Formação Iça, posicionada por palinologia no Pleistoceno (SILVEIRA, 2005; SILVEIRA, 2015; SILVEIRA & SOUZA, 2015) e Plioceno (NOGUEIRA et al., 2013). Dados de datação por LOE (Luminescência Opticamente Estimulada) resultaram em idades entre $219,6 \pm 25,1$ a $65,4 \pm 16,9$ ka, indicando que a sedimentação ocorreu no Pleistoceno Médio-Superior (ROSSETTI et al., 2015). Na porção leste do arquipélago, próximo a confluência com o Rio Branco, afloram rochas cristalinas paleoproterozóicas do Complexo Jauaperi, representadas por ortognaisses, migmatitos, metagranitos, granitos, diques de anfíbolito e bolsões de charnockitóides (CPRM, 2006).

O relevo da área de estudo é compartimentado em duas unidades geomorfológicas principais: **a)** Tabuleiros da Amazônia Centro-Occidental, caracterizados por superfícies relativamente planas, pouco dissecadas, sulcadas por drenagem predominantemente dentrítica e, em menor quantidade, treliça ou retangular e recobertas por vegetação arbórea densa, **b)** Planícies Amazônicas, representadas por terraços fluviais de relevo plano a ondulado, remodelados por drenagem dentrítica-subdentrítica e recobertos por vegetação arbórea e arbustiva densa, além das planícies aluviais desenvolvidas por drenagem de alta sinuosidade, característicos de rio *anabranching*, sendo recobertas por vegetação do tipo igapó. Essa última unidade está associada a planície ativa da bacia do Rio Negro, sendo evidenciada em diferentes sub-ambientes, como: furos, paranás, planícies de acreção em barras de pontal, planícies de decantação, ilhas fluviais, barras arenosas, lagos, diques marginais etc. (DANTAS & MAIA, 2010).

O clima na região é classificado como Tropical Chuvoso com Floresta (Af), de acordo com a escala de Köppen, com valores médios de precipitação em torno de

3.000 mm por ano, sendo os meses de abril e maio os mais chuvosos. A temperatura média anual é de 25° e a umidade relativa do ar é de aproximadamente 90% ao longo do ano (GUYOT *et al.* 1993).

Quanto as características hidrológicas, o Rio Negro é classificado como rio de águas pretas, pobre em nutrientes e de baixa alcalinidade, devido a presença de matéria orgânica dissolvida (RÍOS-VILLAMIZAR *et al.* 2020). Apresenta velocidade média baixa, 0,4 m/s, e pouca capacidade de transporte de partículas em suspensão, quando comparado a outros rios da Amazônia. O aporte de sedimentos finos em suspensão varia entre 7.106 e 8.106 ton ano⁻¹, a partir de medições obtidas próximo a foz (FILIZONA E GUYOT, 2009; 2011) . Os sedimentos grosseiros, compostos predominantemente por areia e granulos, são transportados no fundo e ficam retidos, em grande parte, no curso médio do Rio Negro (MARINHO *et al.*, 2021), dando origem as barras arenosas do Arquipélago de Mariuá, objeto de estudo deste trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo se localiza na porção oeste do Arquipélago de Mariuá, médio curso do Rio Negro, nas proximidades da sede municipal de Barcelos (Estado do Amazonas), distante cerca de 400 km a oeste de Manaus, (Figura1).

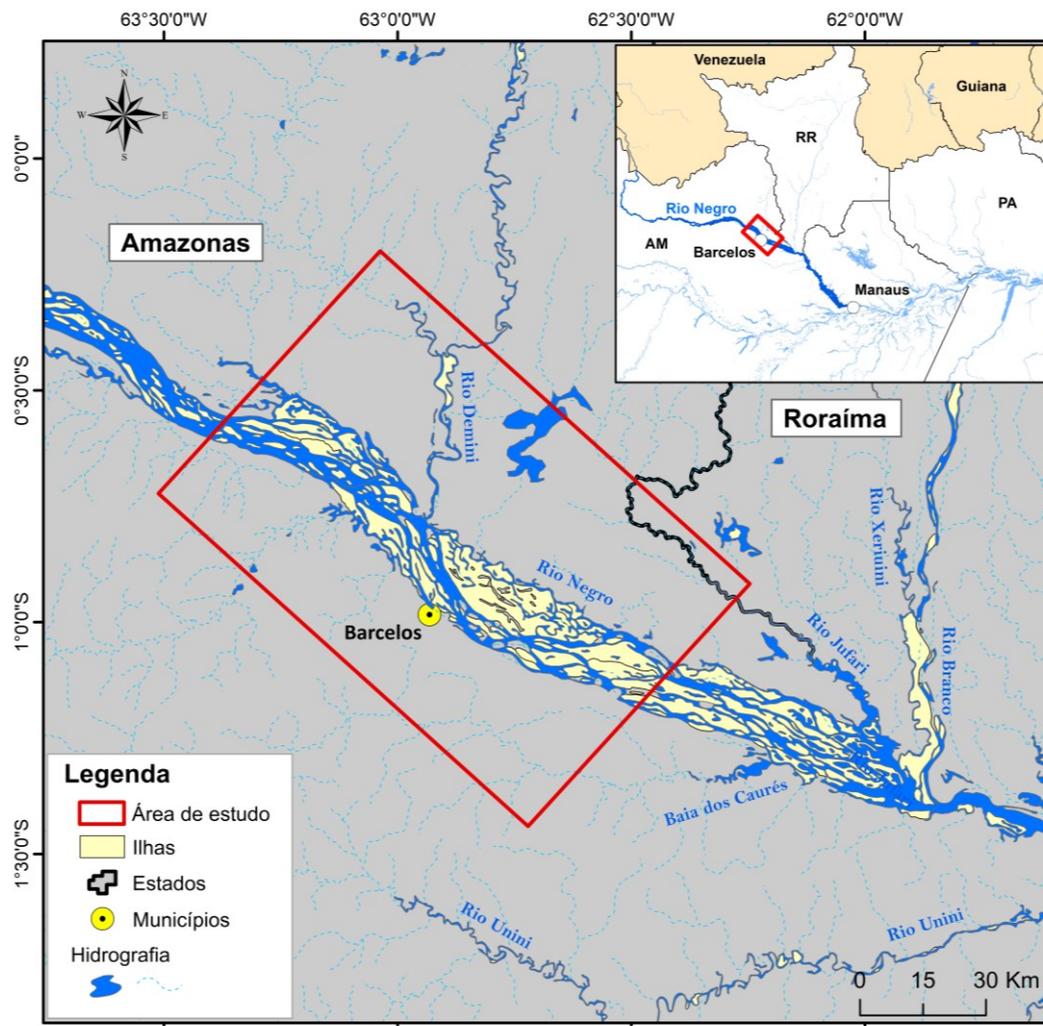


Figura 1. Mapa do Estado do Amazonas com destaque para a porção oeste do Arquipélago de Mariuá, Médio Rio Negro (retângulo Vermelho), mostrando a distribuição dos multicanais e ilhas que compõem o arquipélago. **Fonte:** autores (2023).

Na análise temporal das barras fluviais foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao processamento e interpretação de imagens de satélite *Landsat*, no período de aproximadamente 31 anos, considerando os intervalos de 1985-1997 e 1997-2016, individualizados em função da disponibilidade de imagens em períodos e cotas semelhantes e percentual de cobertura de nuvens, conforme sugerido por PASSOS et al. (2017). As mudanças morfológicas das barras foram definidas por meio da delimitação em área ao longo da série temporal proposta, permitindo definir trechos erosivos, deposicionais e com maior estabilidade. Foram consideradas as medições da série histórica da estação fluviométrica de Barcelos, que possui dados desde a década de 1960 até o presente, obtidas no site da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) - Agência Nacional de Águas (ANA). Foram obtidas imagens dos períodos de estiagem mais severos, que apresentassem cotas altimétricas

semelhantes, para que a área emersa das barras fosse equivalente ao período estudado. Foi também considerada a visibilidade em função do percentual de cobertura de nuvens, já que a área se mostra encoberta na maior parte do ano.

A aquisição e processamento das imagens ocorreu no ambiente de programação da plataforma *Google Earth Engine*, denominado *code*, que permite acesso as coleções de dados orbitais e que podem ser manipulados por códigos nas linguagens de programação *Java script* ou *Python* e processados virtualmente, em nuvem. Foi criado um código para filtrar as imagens por data, considerando as datas de menor cota altimétrica, percentual de cobertura de nuvem e órbita/ponto (*path/row* - identificador de imagens Landsat). Com isso, foram selecionadas imagens Landsat 5 (LT05 233061_19850314, cota média: 203 cm), Landsat 7 (LT05 233061_19971009, cota média: 216 cm) e Landsat 8 (LC08 233061_20160303, cota média: 266 cm). Posteriormente, foi efetuada a composição colorida (RGB) das bandas com intervalo espectral no infra-vermelho (próximo e médio) e vermelho, que foram recortadas de acordo com a área de interesse. A fotointerpretação das imagens foi efetuada no *software ArcGis 10.3*, onde foram criados *shapefile* para cada ano escolhido e extraídos os limites das barras nos intervalos temporais selecionados. Por fim, foram aplicadas análises espaciais de intersecção e diferença entre os arquivos vetoriais de cada ano (1985, 1997 e 2015) para determinação das áreas de erosão, deposição e estabilidade ao longo da série temporal e, finalmente, a determinação da taxa dos processos para cada período, seguindo a metodologia de Passos et al. (2017).

O trabalho de campo foi realizado entre os dias 08 até 20/12/2021, com a descrição de afloramentos e registro fotográfico. A análise granulométrica foi processada no granulômetro a laser Malvern Instruments, modelo Mastersizer 2000 com acessório Hydro 2000MU do Laboratório de Sedimentometria do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), pelo método de dispersão de partículas em fase líquida associado com um processo de medida óptica através de difração de laser dos grãos com intervalos 0,062-250mm. Grãos foram fotografados na lupa trinocular Olympus SZ61 (aumento de 10x e 16x) do Laboratório de Técnicas Mineralógicas do Departamento de Geociências (DEGEO/UFAM) e, posteriormente, analisados quanto ao grau de arredondamento e esferecidade, segundo a tabela de Powers (1953).

Uma amostra de areia foi coletada em tubo de alumínio (30 cm x 5 cm) e submetida a datação por Luminescência Opticamente Estimulada (LOE) no Laboratório de Datação e Dosimetria da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP). As amostras foram irradiadas com fonte beta selada de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e com taxa de dose 0,067 Gy/s. Os conteúdos de radioisótopos naturais foram determinados por espectroscopia-gama, os espectros medidos com um detector de Germânio Hiper Puro da Canberra e comparadas com resultados obtidos por padrões de solos (JR-1, JB-3, JG1a e JG-3) e as contribuições das radiações cósmicas foram calculadas teoricamente com as equações de Prescott e Hutton (1994). Finalmente, os valores de taxa de dose anual (*DA*) foram calculadas com os valores de U, Th e K-40 e a tabela de conversão para a taxa de dose de Adamiec e Aitken (1998). As doses equivalentes (*D_e*) são determinadas pelo protocolo SAR ("Single Aliquot Regeneration", WINTLE and MURRAY, 2006), aplicado em 24-48 alíquotas (~3mg) de cada amostra a ser datada. As alíquotas que passaram pelos testes de

reciclagem com valores menores de 10% e de recuperação menor de 5%, são utilizadas para o cálculo final da dose. Para a determinação de D_e foi usado o “Radial Plot” (GALBRAITH *et al.* 1999), com a ajuda do Programa NumOSL (PENG *et al.* 2013). Nos casos em que a dispersão é maior que 30% usa-se o modelo da Idade mínima, e se for menor que 30% utiliza-se o Modelo da Idade Central (GALBRAITH & ROBERTS, 2012).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A porção oeste do Arquipélago de Mariuá se destaca pela ocorrência de barras arenosas, onde foram definidas aproximadamente 90 unidades de macroformas expostas nos canais principais que contornam as ilhas, assim como nos canais secundários localizados principalmente no interior das ilhas, os quais ajudam a definir o estilo fluvial *anabanching* do Rio Negro no trecho analisado. O uso do termo barra tem sido associado a múltiplos eventos de deposição e erosão, com predominância de uma dinâmica de migração relativamente alta que pode variar de dias a dezenas de anos, sendo relacionado principalmente a eventos topográficos, hidrológicos e climáticos (COLLINSON, 1986; SMITH, 1974; SANTOS, 1992; ALVES, 2013; BARBOSA, 2015; LELI, 2015; QUEIROZ, 2022). Os depósitos de barras são importantes formas de leito que ocorrem ao longo de toda a extensão do Rio Negro (LATRUBESSE & FRANZINELLI, 2005; BARBOSA, 2015; SOARES, 2007; ALVES, 2013; QUEIROZ, 2022). Comparativamente, barras arenosas fluviais (laterais e centrais) foram também descritas nos leitos do rio Jaguaribe, Bacia do Rio Jaguaribe (QUEIROZ *et al.* 2018) e Paraná, Bacia do Rio da Prata (LELIS, 2015), associadas principalmente as ilhas estabilizadas.

Na área de estudo, as barras foram quantificadas e classificadas morfogeneticamente, seguindo a proposta de Santos *et al.* (1992) como centrais, laterais e de soldamento, que perfazem 60%, 30% e 10%, respectivamente. Os depósitos apresentam formas e dimensões variadas, com comprimento e largura máximos de aproximadamente 2.300 e 1.000 metros, respectivamente. Internamente, exibem laminação plano-paralela, sendo constituídas principalmente por grãos de quartzo finos (77%) a médios (23%), moderadamente a bem-selecionados, que variam de angulosos a sub arredondados, segundo a classificação de Wentworth (1922) e Powers (1953) (Figuras 2 e 3).

Datação por LOE foi realizada em uma barra arenosa fitoestabilizada, disposta na margem esquerda do Rio Negro, que indicou idade de deposição em torno de 0.512 ± 0.03 anos (Figura 02 A e B).

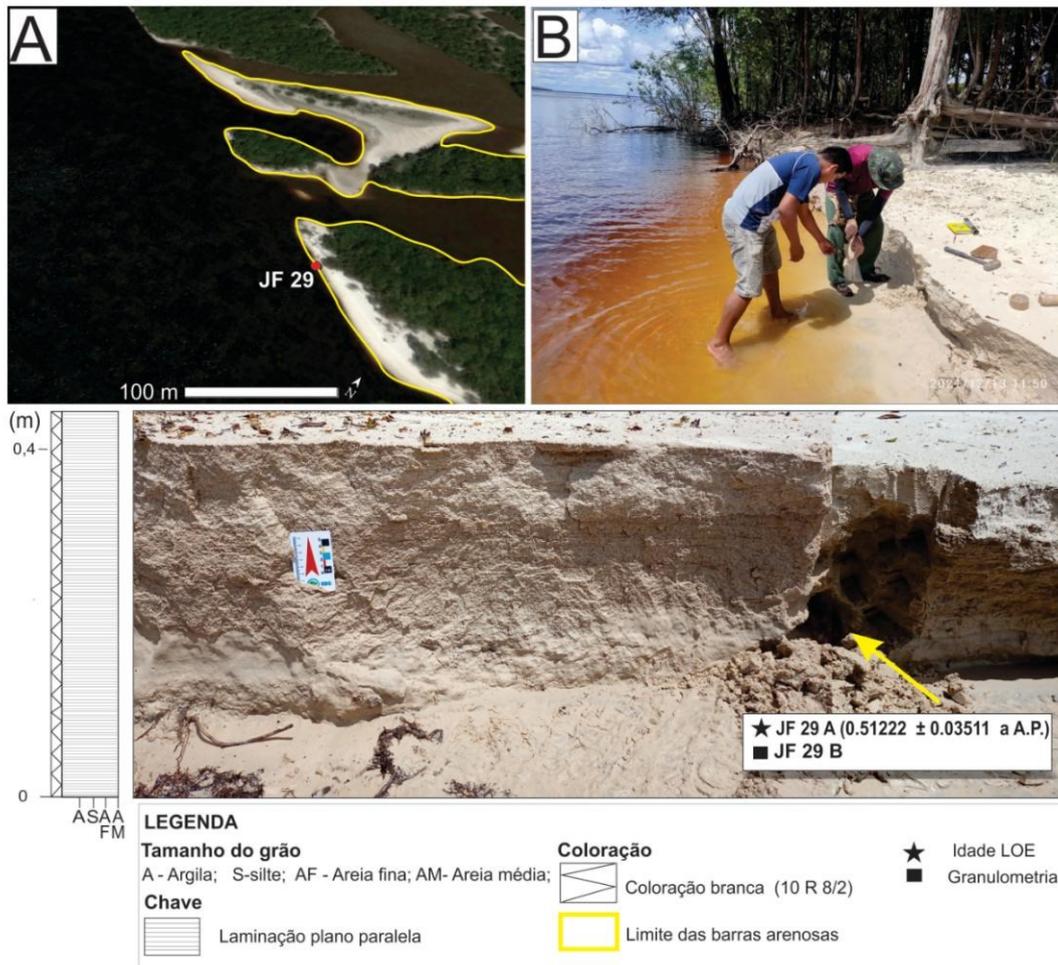


Figura 2. (A) Vista geral da barra de soldamento analisada (Ponto JF 29) (imagem do Google Earth). (B) Detalhe da barra arenosa com laminação plano-paralela e composição predominantemente quartzosa, com indicação do local de coleta da amostra (seta amarela) para LOE e granulometria. **Fonte:** autores (2023).

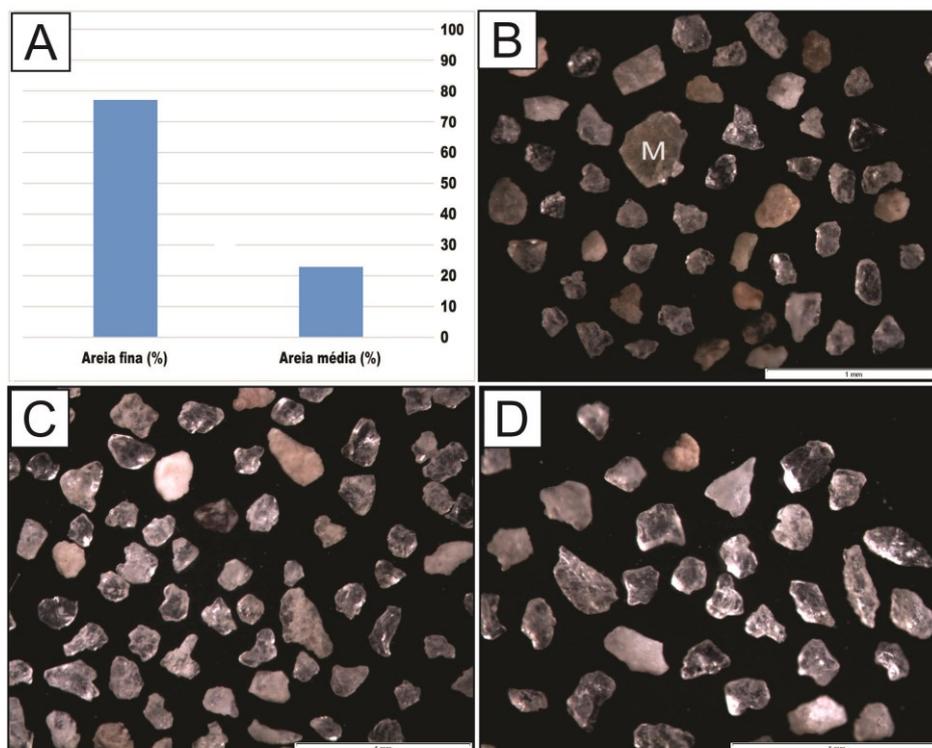


Figura 3. Histograma com indicação da predominância das classes granulométricas fina e média da barra arenosa analisada (Detalhe A). Predominância de grãos sub-arredondados a angulosos de quartzo, além de plaqueta de mica branca (M) isolada (Detalhes B, C e D). **Fonte:** autores (2023).

Devido a baixa capacidade do Rio Negro de transportar material grosseiro, como cascalhos, os sedimentos arenosos são transportados como carga de fundo pelo rio e depositados principalmente nas porções oeste dos arquipélagos de Mariuá e Anavilhanas, que funcionam como barreira natural, capturando esses sedimentos e dando origem aos depósitos de barras atuais (MARINHO, 2021). A morfogênese desses depósitos ainda é pouco estudada, entretanto os aspectos genéticos e morfológicos dos depósitos de barras arenosas do Arquipélago de Mariuá, identificados nesse estudo, se assemelham aos descritos por Alves (2013) para as barras arenosas centrais e laterais do Arquipélago de Anavilhanas, indicando que o regime hidrodinâmico do Rio Negro é similar nos dois arquipélagos.

A predominância de areia fina a média na composição das barras do Arquipélago de Mariuá é condizente com a granulometria identificada por Queiroz (2022) para o trecho médio do Rio Negro e, apesar desse autor ter identificado localmente frações de areia grossa, a análise granulométrica a laser utilizada neste trabalho se limita a partículas de até 250 μm e não permite a identificação de partículas mais grosseiras. Comparativamente, dados granulométricos de barras arenosas do Arquipélago de Anavilhanas, obtidos por Alves (2013), mostram a predominância de areia fina a média, além de frações de areia muito fina a siltosa. Em geral, os dados granulométricos apresentados corroboram com os estudos de Marinho (2021, 2019)

que demonstram que os trechos do alto e médio do Rio Negro transportam material mais grosseiro que o trecho inferior devido a influência de seus principais tributários das margens esquerda e direita. Além disso, os grãos sub-arredondados a angulosos das barras são característicos de ambiente de transporte com baixa energia, que caracterizam as condições hidrosedimentares do Rio Negro (MARINHO *et al.* 2021). As barras atuais representam o último estágio deposicional do Arquipélago de Mariuá, sendo posterior ao desenvolvimento das ilhas, datadas entre 1.450 ± 60 e 3.650 ± 90 anos BP, conforme dado geocronológico de Latrubesse & Franzinelli (2005).

A análise multitemporal das macroformas arenosas do Arquipélago de Mariuá, no período de 31 anos, que inclui os intervalos temporais entre 1985 a 1997 e 1997 a 2016, permitiu identificar as principais mudanças morfológicas ocorridas nesse período, bem como sua associação aos processos de erosão e deposição. Entre 1985 e 2016 houve predominância dos processos deposicionais em relação aos erosivos, resultando em uma área de deposição de $34,7 \text{ Km}^2$ com taxa média de deposição de $1,1 \text{ Km}^2/\text{ano}$, enquanto a área erodida correspondeu a $18,5 \text{ Km}^2$ com taxa média de erosão de $0,6 \text{ Km}^2/\text{ano}$ (Tabela 1). Essas mudanças ocorreram principalmente em barras localizadas ao longo dos multicanaís principais que compõem o estilo fluvial *anabranching* desse trecho do Rio Negro, que apresentam largura em torno de 6 km. A vazão nesses canais é maior e, conseqüentemente, prevalecem os processos de remobilização e transporte de sedimentos, com a migração contínua de barras, em função da erosão de sedimentos da porção frontal e deposição na porção distal, com preservação de um núcleo estável que pode ou não ser vegetado, além de erosão total e/ou surgimento de novas macroformas nos canais, conforme ilustrado na figura 4.

Entretanto, a análise temporal individual dos dois intervalos analisados, entre 1985-1997-2016, constatou a alternância dos regimes erosivos e deposicionais na dinâmica de desenvolvimento das barras arenosas do arquipélago, em função do aumento e/ou diminuição das áreas de deposição e erosão (Tabela 1). Entre 1985 e 1997 a área de deposição foi em torno de $11,7 \text{ Km}^2$ com taxa de deposição de $0,9 \text{ Km}^2/\text{ano}$, enquanto a área erodida foi de $18,9 \text{ Km}^2$ com taxa de erosão de $1,5 \text{ Km}^2/\text{ano}$. O predomínio dos processos erosivos é evidente na análise da diminuição da área das barras, que mudou de $42,8 \text{ Km}^2$ (1985) para $35,6 \text{ Km}^2$ (1997), resultando numa perda de aproximadamente 7 Km^2 . De forma contrária, entre 1997 a 2016, foi observado um aumento das áreas depositadas em relação as erodidas, com incremento médio anual de $1,1 \text{ Km}^2$ por ano. A área das barras aumentou de $35,6 \text{ Km}^2$ para $59,01 \text{ Km}^2$, tendo um acréscimo de aproximadamente 25 Km^2 no intervalo de 19 anos, enquanto a taxa de erosão teve um decréscimo quando comparado ao período de 1985-1997, assumindo o valor de $0,8 \text{ Km}^2$ por ano (Tabela 1).

Tabela 1. Áreas e taxas de erosão e deposição na porção oeste do Arquipélago de Mariuá.

Período	Acresção (km ²)	Erosão (Km ²)	Área estável (Km ²)	Taxa de erosão (Km ² /ano)	Taxa de deposição (Km ² /ano)
1985 a 1997	11,7	18,9	23,8	1,5	0,9
1997 a 2016	31,3987	7,9747	23,3065	0,4	1,6
1985 a 2016	34,7661	18,5496	24,3036	0,6	1,1

Fonte: autores (2023).

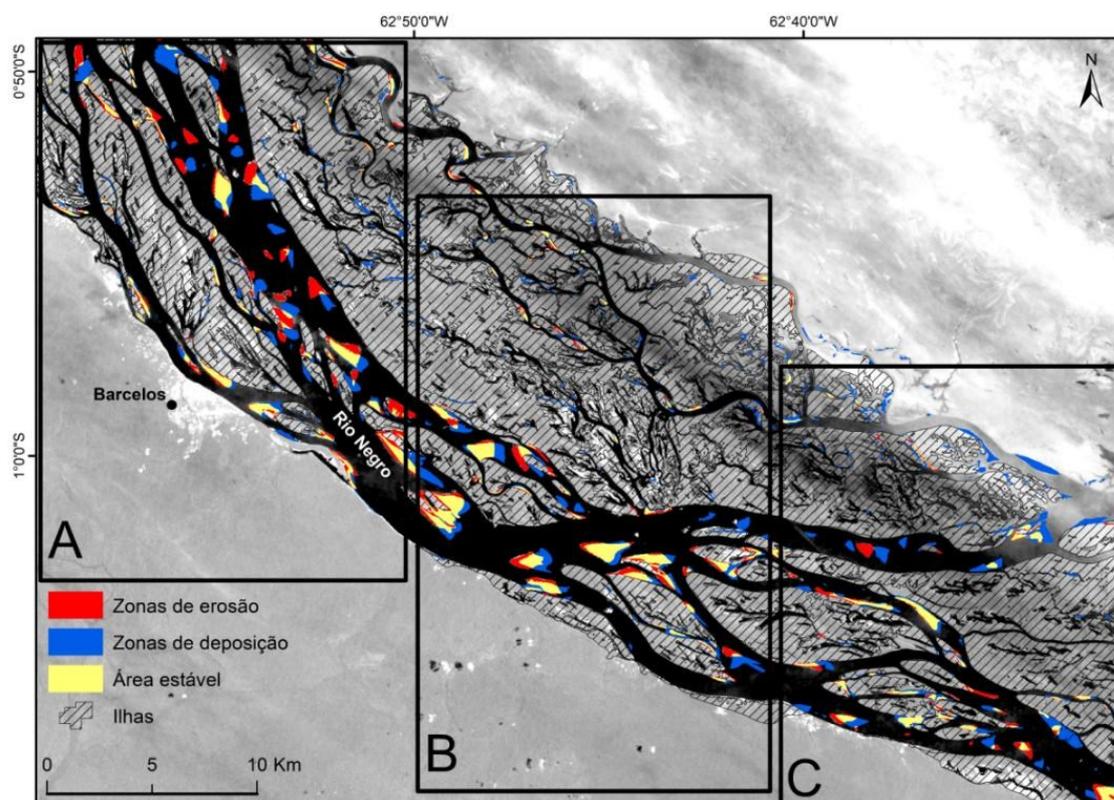


Figura 4. Imagem Landsat 8/OLI (banda 5) do trecho oeste do Arquipélago de Mariuá, com indicação das áreas de erosão (vermelho), deposição (azul) e estabilidade (amarelo) no período de 1985 a 2016. Os detalhes A, B e C mostram a dinâmica das barras e estão indicados na figura 5. Fonte: autores (2023).

As mudanças morfológicas, relacionadas aos processos de erosão e deposição das barras nos 02 períodos citados, ocorreram predominantemente ao longo dos multicanais principais, conforme indicados na figura 5 (detalhes A, B e C). No detalhe A, entre 1985 (tracejado amarelo) e 1997 (tracejado verde) ocorreu principalmente migração da barra lateral, com sedimentos sendo remobilizados da

região frontal para a distal da barra, além da preservação de um núcleo central estável (área rachurada em amarelo), que resultou numa barra com área menor que a observada inicialmente. Em contrapartida, entre 1997 (tracejado verde) e 2016 (tracejado vermelho), apesar da dinâmica de migração permanecer semelhante, houve um acréscimo da área da barra depositada, além da formação de novas barras centrais nos limites dos multicanaís principais. No detalhe B, destaca-se a contínua migração de uma barra central, nos intervalos temporais de 1985, 1997 e 2016, além da deposição e crescimento de barras do tipo soldamento, acopladas as ilhas, que promoveram localmente o assoreando dos canais menores que seccionam as ilhas (setas amarelas). As barras de soldamento apresentam maior estabilidade, com núcleos mais estáveis nos períodos analisados. O detalhe C destaca a evolução contínua de uma barra central (semelhante ao detalhe A), além da erosão e deposição de outras barras nas proximidades, entre 1985, 1997 e 2016.

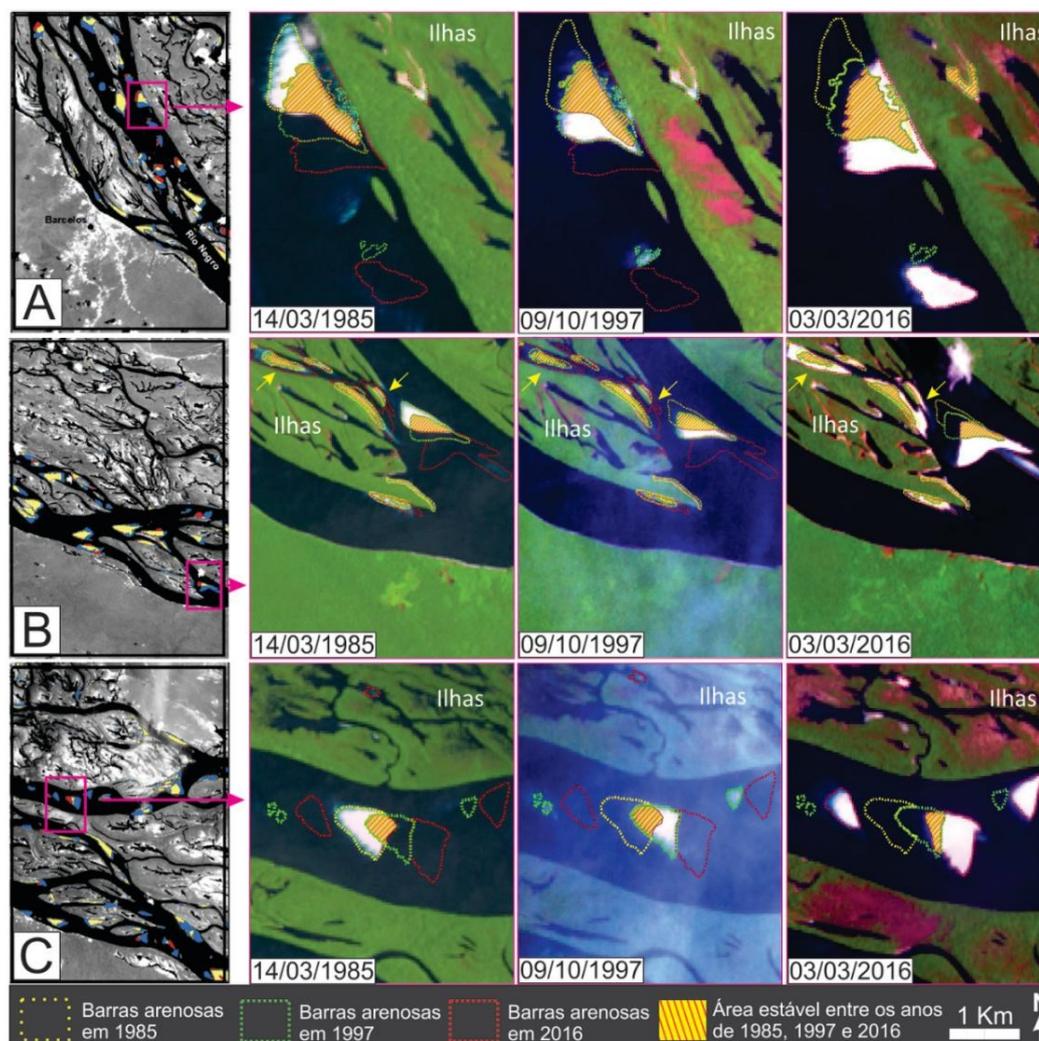


Figura 5: Imagens Landsat 5/TM (1985), Landsat 7/ETM (1997) e Landsat8/OLI (2016), com composição colorida das bandas 5, 3 e 4 de trechos da porção oeste do Arquipélago de

Mariuá. Os retângulos (rosa) das áreas A, B e C (indicados na figura 4) mostram a dinâmica das barras arenosas entre 1985 a 2016, com mudanças de áreas delimitadas por linha tracejada amarela (1985), verde (1997) e vermelha (2016), enquanto as áreas estabilizadas mostram-se rachurada (amarelo). As setas (amarelas) indicam locais de deposição de barras menores em canais secundários que seccionam ilhas. **Fonte:** autores (2023).

Mudanças morfológicas de barras recentes em sistemas fluviais de mundo, como nos rios Qiantang (China), Colorado (Estados Unidos) e Jaguaribe (Brasil) tem sido associadas, em parte, a fatores climáticos (HUANG *et al.* 2022; QUEIROZ *et al.* 2018; WRIGHT *et al.* 2011), os quais são diretamente vinculados às variações nas taxas de precipitação ao longo dos anos e podem ocasionar mudanças no padrão de sazonalidade da rede de drenagem.

Na Amazônia, diversos estudos (MOURA *et al.* 2019, PEREIRA JUNIOR *et al.* 2020, OLIVEIRA *et al.* 2022, SOUZA *et al.* 2000) demonstram variações nas taxas de precipitação nas últimas décadas e associam os eventos de secas severas e cheias intensas aos fenômenos El Niño e La Niña, respectivamente. Souza *et al.* (2000) associaram esses fenômenos a dinâmica hidrológica entre os anos de 1960 e 1998, onde nos períodos com predominância do fenômeno El Niño ocorreram eventos de secas mais intensas, entretanto, as cotas mínimas medidas não se distanciaram de forma significativa da média anual observada na série histórica de medições. Contudo, nos anos em que o fenômeno La Niña se manifestou (1961, 1964, 1967, 1970, 1971, 1973, 1975, 1984, 1985, 1988, 1995), as medições de cotas máximas se mantiveram iguais ou acima, ocasionando períodos chuvosos mais prolongados. Considerando o período de 2000 a 2016, o tempo de duração do fenômeno La Niña tem aumentado e, conseqüentemente, os impactos sobre a região amazônica também se intensificaram (MOURA *et al.* 2019). Os impactos são evidenciados pelo aumento significativo no valor das precipitações, que ocasionaram cheias mais severas, culminando na máxima cota de cheia observada no ano de 2021.

O escoamento superficial se dá em direção aos rios, então o sistema fluvial tende a responder rapidamente as alterações climáticas e/ou antrópicas, que podem ser observadas pela variação na proporção mensal de sólidos em solução ou na concentração média anual de sólidos em suspensão (FILIZOLA *et al.* 2011). Nesse contexto, entre 1985 a 1997, os eventos El Niño foram predominantes e ocasionaram estiagens mais duradouras, prolongando também o período de vazante e, conseqüentemente, elevando o nível de material transportado pelo rio. Dados do estudo de Marinho *et al.* (2022) indicam que durante a vazante a capacidade de transporte do Rio Negro aumenta, favorecendo os processos erosivos que foram observados principalmente pela diminuição na área das barras na porção oeste do Arquipélago de Mariuá (Figura 5, Tabela 1). Por outro lado, entre 1997 e 2016 foram registrados fenômenos La Niña com durações mais prolongadas, que ocasionaram aumento da precipitação na Amazônia e, conseqüentemente, cheias mais intensas, que favoreceram o regime deposicional. Esse regime reflete na dinâmica fluvial, que pode ser definida nas imagens desse período, por meio do crescimento em área significativo das barras, bem como na migração e formação de novas barras (Figura 5, Tabela 1).

Particularmente, este estudo não considerou fatores antrópicos, já que os dados de desmatamento e de cobertura e uso do solo emitidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) demonstram que nos últimos 10 anos os municípios circundantes, como Barcelos, Santa Izabel do Rio Negro e São Gabriel da Cachoeira, foram responsáveis por menos de 1% do desmatamento do Estado do Amazonas. Nessas áreas, predominam florestas nativas, sendo pouco provável que ações antrópicas contribuam de maneira significativa para as mudanças morfológicas observadas nesse estudo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise multitemporal de imagens Landsat (1985 e 2016) da porção oeste do Arquipélago fluvial de Mariuá permitiu definir mudanças morfológicas das barras arenosas recentes, classificadas principalmente como central, lateral e de soldamento. Dado geocronológico pontual por LOE indica que a sedimentação das barras iniciou acerca de 500 anos, correspondendo a última fase de sedimentação do arquipélago, sendo portanto, posterior a deposição e fitoestabilização das ilhas. Entretanto, o alcance de variação temporal das barras pode ser ampliado em função de novos dados geocronológicos na Bacia do Médio Rio Negro.

A análise multitemporal efetuada no período de 31 anos mostra que a alternância de processos erosivos e deposicionais influenciaram a morfologia das barras arenosas do Arquipélago de Mariuá. A alternância desses processos foi associada principalmente a dados climáticos dos fenômenos de La Nina e El Nina, já que influências antrópicas não foram consideradas em função do elevado grau de preservação da área estudada. Nesse contexto, foram analisados dois intervalos temporais distintos entre 1985 e 2016. O primeiro, entre 1985 e 1997, indicou a predominância dos processos erosivos em relação aos deposicionais, provavelmente em função do El Nino, predominante nesse período. No segundo, entre 1997 e 2016, ocorreu a predominância de processos deposicionais, os quais puderam ser diretamente associadas a variações climáticas ocasionadas pela intensificação dos períodos de duração da La Nina. Essas variações climáticas induziram a uma rápida resposta do regime hidrológico e sedimentar da Bacia do Rio Negro.

Aparentemente, a predominância de processos erosivos sobre os deposicionais parece ser um fator importante para a evolução das barras centrais, que são moldadas continuamente em função da contínua migração a jusante. Já os processos deposicionais parecem ser mais importantes que os erosivos no desenvolvimento das barras laterais e de soldamento, as quais são formadas em ambientes de mais baixa energia, em “áreas de sombra” ao fluxo principal, onde a velocidade é menor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP-FAPEAM, edital nº 001/2020 “CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO GEOLÓGICO, ARQUEOLÓGICO E BIOLÓGICO DO ARQUIPÉLAGO DE MARIUÁ, MÉDIO RIO NEGRO-AM” pelo apoio financeiro no trabalho de campo e análises laboratoriais. Somos gratos também a FAPESP, projeto nº 2020/08592-8, pelo suporte financeiro principalmente relacionado aos dados de datação por LOE. Gratos ao Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas pelo suporte de salas e laboratórios durante a pesquisa. Gratos ainda ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq processo 422354/2023-6 (Monitoramento e Avisos de Mudanças de Cobertura da Terra nos Biomas Brasileiros – Capacitação e Semiautomatização Do Programa BiomasBR), sediado e executado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela concessão da bolsa 384868/2023-1. Por fim, agradecemos aos revisores da revista GEONORTE pelas substanciais contribuições ao artigo.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Concepção: Jefferson Souza, Emílio Soares e Ricieri Tarabossiri. **Metodologia:** Jefferson Souza, Emílio Soares, Ricieri Tarabossiri, Sonia Tatumi e Marcio Yee. **Análise formal:** Jefferson Souza, Emílio Soares, Ricieri Tarabossiri, Sonia Tatumi e Marcio Yee. **Pesquisa:** Jefferson Souza, Emílio Soares, Ricieri Tarabossiri, Sonia Tatumi, Marcio Yee, Rodolfo Dino, Luzia Antoniulli e Fábio Dias. **Recursos:** Emílio Soares e Sonia Tatumi. **Preparação de dados:** Jefferson Souza, Emílio Soares, Ricieri Tarabossiri, Sonia Tatumi e Marcio Yee.. **Escrita do artigo:** Jefferson Souza, Emílio Soares, Ricieri Tarabossiri Rodolfo Dino e Luzia Antoniulli. **Revisão:** Emílio Soares, Márcio Yee, Rodolfo Dino, Luzia Antoniulli. **Aquisição de financiamento:** Emílio Soares e Sonia Tatumi. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

REFERÊNCIAS

ADAMIEC, G.; AITKEN, M.J. Dose-rate conversion factors: update. **Ancient TL**, v.16, n. 2, p. 37- 50, 1998.

ALVES, N.S. **Mapeamento Hidromorfodinâmico do Complexo Fluvial de Anavilhanas: Contribuição aos Estudos de Geomorfologia Fluvial de Rios Amazônicos**. Tese de Doutorado (Universidade de São Paulo - USP) São Paulo, Brasil, 2013

ANA -AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Hidro Web -Sistema de Informações Hidrológicas. Séries históricas – ano de 1959 a 2022. 2017. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 23 Nov. 2022.

- ASSIS, P.; BAYER, M. **Análise multitemporal do sistema fluvial do rio Araguaia, Aruanã** – Goiás, Brasil. *Élisée - Revista de Geografia da UEG*, v. 9, n. 2, p. e922003, 3 ago. 2020.
- BARBOSA, R.O. **Estudos Sedimentológicos e Estratigráficos dos Depósitos Sedimentares Quaternários do Arquipélago de Anavilhanas, Município de Novo Airão (Amazônia Central)**. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal do Amazonas-UFAM) Manaus, Brasil, 2015
- BRIDGE, J.S. **Rivers and floodplains: forms, processes, and sedimentary record**. Blackwell Publishing, 2002.
- CAMPOS, C. **Diversidade Socioambiental de Roraima: Subsídios para Debater o Futuro Sustentável da Região**. Instituto Socioambiental, 2011.
- COLLINSON, J. D. Alluvial sediments. In READING, H.G. **Sedimentary Environment and Facies**. Oxford, Blackwell Scientific Publications, p. 20-62, 1986.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. IPH-UFRGS, v. 8, 2008.
- CPRM. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas, Programa Geologia do Brasil. Brasília: Ministério de Minas e Energia/CPRM/Serviço Geológico do Brasil. 2006.
- DANTAS, M. E.; MAIA, M. A. M. Compartimentação geomorfológica. In: MAIA, M. A. A.; MARMOS, J. L. (Org.). **Geodiversidade do estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, p. 27-44, 2010
- FILIZOLA, N.; Guyot, J.L.. **Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set**. *Hydrological Processes* 23: 3207–3215, 2009.
- FILIZOLA, N.; GUYOT, J.L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos Rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, v.41, p. 566–576, 2011.
- FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Research**, v. 27, n. 1, p. 3–26, 1957.
- GALBRAITH, R. F. et al. Optical dating of single and multiple grains of quartz from jinnium rock shelter, northern australia: Part I, experimental design and statistical models. **Archaeometry**, v. 41, n. 2, p. 339–364, 1999.
- GALBRAITH, R. F.; ROBERTS, R. G. Statistical aspects of equivalent dose and error calculation and display in OSL dating: An overview and some recommendations. **Quaternary Geochronology**, v. 11, p. 1–27, 2012.
- GOULDING, M., CARVALHO, ML., FERREIRA, E. J. C. **Rio Negro, rich life in poor water: Amazonian diversity and food chain ecology as seen through fish communities**. The Hague: SPB Academic Publishing, 1989.

GUYOT, J.-L.; Molinier, M.; Guimarães, V.; Cudo, K.J.; Oliveira, E. **Balço Hídrico da Bacia do Rio Negro**. Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul: 535–544. 1993

HUANG, J.; SUN, Z.; XIE, D. Morphological evolution of a large sand bar in the Qiantang River Estuary of China since the 1960s. **Acta Oceanologica Sinica**, v. 41, n. 2, p. 156–165, 2022.

INPE/PRODES. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Programa de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia Brasileira por Satélite. 2022. http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates. Último acesso em 05/01/2023.

LATRUBESSE, E. M.; FRANZINELLI, E. The late quaternary evolution of the negro river, amazon, brazil: Implications for island and floodplain formation in large anabranching tropical systems. **Geomorphology**, v. 70, n. 3-4, p. 372–397, 2005.

LELI, I.T. **Gênese, Evolução e Geomorfologia das Ilhas E Planície de Inundação do Alto Rio Paraná, Brasil**. Tese (Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho), Rio Claro, 2015.

MARINHO, R.R. **Integração de Dados de Campo e Sensoriamento Remoto no Estudo do Fluxo de Água e Matéria no Arquipélago de Anavilhanas, Rio Negro – Amazonas, Brasil**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Clima e ambiente – CLIAMB, UEA, INPA), Manaus, 2019.

MARINHO, R.R. Estudo Morfodinâmico em Ambiente Lacustre no Arquipélago de Anavilhanas, Rio Negro, Bacia Amazônica. **Geotemas**, v. 10, n. 3, pp. 81-105, 2020.

MARINHO, R.R.; ZANIN, P.R.; FILIZOLA, N.P. The Negro river in the Anavilhanas Archipelago: streamflow and geomorphology of a complex anabranching system in the Amazon. **EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS**, v. 47, p. 1-16, 2021.

MARINHO; R.R.; VIEIRA, A.F.S.G.; MACIEL, F.S. Análise Montante-Jusante da Granulometria dos Sedimentos de Fundo e Suspenso do Rio Negro e Tributários (Bacia Amazônica, Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.02, pp. 997-1008, 2021

MOURA, M. M. et al. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 1639–1651, 2019.

NOGUEIRA, A.C.R.; SILVEIRA R.R.; GUIMARÃES, J.T.F. Neogene-Quaternary sedimentary and paleovegetation history of the eastern Solimões Basin, central Amazon region. **Journal of South American Earth Sciences**; v. 46, p. 89-99. 2013.

OLIVEIRA, S. S.; OLIVEIRA, K. A.; JOSÉ, T. **Análise da influência dos fenômenos el niño e la niña na oscilação da precipitação na bacia do rio miarin, maranhão.**

Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/encob2022/509859-ANALISE-DA-INFLUENCIA-DOS-FENOMENOS-EL-NINO-E-LA-NINA-NA-OSCILACAO-DA-PRECIPITACAO-NA-BACIA-DO-RIO-MIARIN-MARANHAO>>. Acesso em: 9 nov. 2022.

OLIVEIRA, M. L. DE. Mariuá: a flora, a fauna e o homem no maior arquipélago fluvial do planeta. **repositorio.inpa.gov.br**, 2017.

PASSOS, M. S.; SOARES, E. A. A. Análise multitemporal do sistema fluvial Solimões-Amazonas entre os tributários Purus e Negro, Amazônia Ocidental, Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 17, n. 1, p. 61, 2017.

PEDREIRA JUNIOR, A. L. et al. Influence of El Niño and La Niña phenomena on seasonality of the relative frequency of rainfall in southern Amazonas mesoregion. **RBRH**, v. 25, 2020.

PENG J.; DONG Z. B.; HAN F. Q.; LONG H.; LIU X.J. R package numOSL: numeric routines for optically stimulated luminescence dating. **Ancient TL**, v. 31, n.2, p. 41-48, 2013.

PRESCOTT, J.; STEPHAN, L. The contribution of cosmic radiation to the environmental dose for thermoluminescence dating. Latitude, altitude and depth dependences. Latitude, altitude and depth dependences. **FACT**, v. 21, n.6, p.17-25, 1982.

POWERS, M. C. A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. **SEPM Journal of Sedimentary Research**, v. 23, 1953.

QUEIROZ, P. H. B. et al. Caracterização multitemporal de barras e ilhas fluviais no baixo curso do rio jaguaribe, Ceará-Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 1, 2018.

QUEIROZ, M. S. **Dinâmica Geomorfológica do Complexo Fluvial de Mariuá, Rio Negro, Bacia Amazônica**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2022.

QUEIROZ, M. S.; CARVALHO, J.A.L ; MARINHO, R. R. . CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SEDIMENTOS DO ARQUIPÉLAGO FLUVIAL DE MARIUÁ, RIO NEGRO, BACIA AMAZÔNICA. In: Rogério Ribeiro Marinho; Geraldo Alves de Souza; João Cândido André da Silva Neto. (Org.). **A geografia amazônica em múltiplas escalas**. 2ed. Manaus: Edua, 2022, v. 2, p. 179-196) .

RÍOS-VILLAMIZAR, E.A.; ADENEY, J.M.; PIEDADE, M.T.F.; JUNK, W.J.; Hydrochemical Classification of Amazonian Rivers: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia-MG, v. 21, n. 78, p. 211- 226, 2020

ROSSETTI D.F., Cohen M.C.L., TATUMI S.H., SAWAKUCHI A.O., CREMON ,E.H., MITTANI J.C.R., BERTANI T.C., MUNITA C.J.A.S., TUDELA D.R.G., YEE M, MOYA G. Mid-Late Pleistocene OSL chronology in western Amazonia and implications for the transcontinental Amazon pathway, **Sedimentary Geology**, 330:1-15, 2015.

SANTOS, M. L.; Fernandez, O. V. Q.; Stevaux, J. C. Aspectos Morfométricos das Barras de Canal no Rio Paraná, trecho de Porto Rico. **Boletim de Geografia de Maringá**. v.1, p.11 – 24, 1992.

SMITH, N.D. The braided stream depositional environment: comparison of the Platte river with some Silurian clastic rocks: north-central Appalachians. **Geol. Soc. Am. Bull.**, v. 81, p. 2993-3041, 1974.

SILVEIRA, R.R. & SOUZA, P.A. Palinologia (Grãos de pólen de angiospermas) das Formações Solimões e Iça (Bacia de Solimões), nas regiões de Coari e Alto Solimões, Amazonas. **Rev. Bras. Paleontol.** v. 18, n. 3, p. 455-474, 2015.

SILVEIRA, Rosemary Rocha da. **Bioestratigrafia e paleoecologia de depósitos Neógenos e Pleistocenos aflorantes na porção central e ocidental da Bacia Solimões, Estado do Amazonas, Brasil**. Porto Alegre. 264 p. Tese (Doutorado). Programa de Pósgraduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

SOARES, E. A. A. **Depósitos Pleistocenos da região de confluência dos rios Negro e Solimões, Amazonas**. Tese de Doutorado (Instituto de Geociências - USP), São Paulo, Brasil, 2007.

SOUZA, E. B. et al. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. **Acta Amazonica**, v.30, p.305-318, 2000.

VANONI, V.A. **Sedimentation Engineering**. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY, 1977.

WINTLE, A. G.; MURRAY, A. S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. **Radiation Measurements**, v. 41, n. 4, p. 369–391, 2006.

WRIGHT, S. A.; KAPLINSKI, M. **Flow structures and sandbar dynamics in a canyon river during a controlled flood, Colorado River, Arizona**. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, v. 116, n. F1, p. n/a-n/a, 2011.



Revista Geonorte, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus-Brasil. Obra licenciada sob Creative Commons Atribuição 3.0