Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Análise Montante-Jusante da Granulometria dos Sedimentos de Fundo e Suspenso do Rio Negro e Tributários (Bacia Amazônica, Brasil)

Rogério Ribeiro Marinho¹, Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira², Feliciano de Souza Maciel³

¹ Dr. em Clima e Ambiente, Professor Adjunto, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Amazonas, Ave. General Rodrigo Otávio, Jordão Ramos, 6200, CEP 69077-000, Manaus, Amazonas. rogeo@ufam.edu.br (autor correspondente). ² Dr. em Geografia, Professor Associado, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Amazonas, Ave. General Rodrigo Otávio, Jordão Ramos, 6200, CEP 69077-000, Manaus, Amazonas. fabiovieira@ufam.edu.br. ³ Graduando em Geografia e bolsista de iniciação científica - Universidade Federal do Amazonas, Ave. General Rodrigo Otávio, Jordão Ramos 6200, Campus Universitário, Coroado I, Manaus CEP 69077-000, Brasil. macielfeliciano7@gmail.com.

Artigo recebido em 13/05/2020 e aceito em 11/02/2021

RESUMO

O conhecimento das características físicas de sedimentos transportados por grandes sistemas fluviais possui significativa importância para o entendimento de processos geomorfológicos e hidrológicos. O nível de conhecimento dos grandes sistemas fluviais da Amazônia e sua relação com o transporte de sedimentos ainda é limitado, resultando em lacunas de conhecimento sobre a dinâmica da paisagem nesta complexa região. Este trabalho teve como objetivo avaliar a distribuição espacial da granulometria de sedimentos de fundo e suspenso do Rio Negro e tributários. Realizou-se análise da distribuição do tamanho dos sedimentos em seções amostrais localizadas no alto, médio e baixo curso do Rio Negro. Os resultados da análise granulométrica da carga de fundo indicam a predominância de sedimentos com tamanho variando de 0,25 a 1,0 mm (principalmente areia fina, areia média e areia grossa) enquanto no baixo curso as amostras oscilaram de areia fina a partículas lamosas (< 0,50 mm). No Rio Negro os sedimentos suspensos são compostos principalmente de partículas finas de silte (90% menor que 80 µm) com diâmetro mediano (D50) de 25 µm. As características granulométricas apresentadas neste trabalho fornecem subsídios para o entendimento de processos hidrodinâmicos de transporte e deposição dos sedimentos de fundo e suspenso neste gigante sistema fluvial.

Palavras-chave: transporte de sedimentos, planície amazônica, rio multicanal.

Upstream-downstream Granulometry Analysis of bed and suspended sediments in the Negro River Basin (Amazon Basin, Brazil)

ABSTRACT

The knowledge of the physical characteristics of sediments transported by large river systems has significant importance for the understanding of geomorphological and hydrological processes. The level of knowledge of the large rivers of the Amazon basin and their relationship with sediment transport is limited, resulting in gaps about the dynamics of the landscape in this complex region. This article analyzes the spatial distribution of granulometry of bed and suspended sediments in the Negro River and tributaries. An analysis of the sediment size distribution was carried out in sample sections located in the upper, middle and lower reaches of the Negro River. The results of the granulometric analysis of the bed load indicate the predominance of sediments with sizes ranging from 0.25 to 1.0 mm (mainly fine sand, medium sand and coarse sand) while in the low course they showed oscillated from fine sand to muddy particles (<0.50 mm). In the Negro River basin the suspended sediments are composed mainly of fine silt particles (90% less than 80 µm) with a median diameter (D50) of 25 µm. The granulometric characteristics presented in this work provide subsidies for the understanding of hydrodynamic processes of transport and deposition of bed and suspended sediments in this huge fluvial system.

Keywords: sediment transport, Amazon floodplain, multichannel river, anabranching.

Introdução

O entendimento da dinâmica geomorfológica de uma paisagem através dos processos de erosão, transporte e deposição é de grande importância para diversas áreas de conhecimento (Suguio, 2003). Assim, conhecer as

características físicas de sedimentos transportados por sistemas fluviais é de significativa importância para os estudos de processos geomorfológicos e hidrológicos (Guyot et al., 1999; Hinderer, 2012), bem como permite avaliar

mudanças de suas características no tempo e no espaço (Cunha, 2013).

Os sedimentos são uns dos principais elementos da dinâmica de uma paisagem fluvial, pois contribuem para a criação, manutenção e aumento de ilhas, assoreamento de canais, represas e lagos, bem como na manutenção dos ecossistemas, uma vez que contaminantes e poluentes presentes nos sedimentos podem ser disponibilizados na coluna d'água para organismo e seres humanos (Brandão et al., 2011; Sioli, 1984). Desta forma, identificar as características granulométricas de sedimentos em sistemas fluviais fornecem informações a respeito de processos hidrodinâmicos atuantes em seu transporte e deposição (Suguio, 2003), bem como na compreensão de como se comportam de montante para jusante (Meurer et al., 2011).

O Rio Negro é o principal tributário da margem esquerda para o Rio Amazonas, com uma descarga líquida média anual de $28.400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ é considerado o sexto maior do mundo em volume de água (Latrubesse et al., 2005). Apesar do grande volume de água, este rio transporta baixa carga de sedimento suspenso, com estimativas variando de 1 a 8 milhões de toneladas por ano (Filizola e Guyot, 2011; Marinho et al., 2020). Este grande rio apresenta pouca variação no transporte de sedimento ao longo de um ano hidrológico, bem como em função da profundidade do canal. Dados apresentados por Filizola (2003), por exemplo, indicam que a descarga de sedimento em superfície corresponde a 81% do fluxo total de sedimento no Rio Negro, um comportamento bem diferente em relação aos rios de origem Andina, tais como Madeira e Solimões (Filizola et al., 2011).

O Rio Negro apresenta singularidades na forma do seu canal de drenagem, com um intrincado padrão multicanal (anabranching) e com presença dos maiores arquipélagos em ambiente de água doce do mundo, Anavilhanas e Mariuá. Cerca de 80% da bacia do Rio Negro é ocupada por áreas protegidas. Esta região possui uma grande importância socioambiental devido à presença de mais de 40 povos indígenas e ecossistemas únicos, tais como Igapós, Campinas e Campinaranas, além de ser reconhecido como o maior sítio da convenção Ramsar sobre zonas úmidas de importância internacional (RSIS, 2018).

Diante deste contexto, estudos a respeito das características ambientais desta bacia são necessários para uma melhor gestão ambiental e territorial. No entanto, dados sobre a distribuição granulométrica em diferentes trechos deste grande rio são limitados aos estudos de Alves (2013);

Barbosa (2015); Cunha (2017) e de Latrubesse e Franzinelli (2005), apresentando lacunas de dados a respeito da carga de fundo nos principais tributários.

O perfil longitudinal de um rio varia da nascente até sua foz. Assim, este estudo analisou como ocorre a relação entre a redução do gradiente do canal do Rio Negro e sua competência atual de transporte de partículas. Este estudo apresenta a hipótese de que a configuração multicanal do Rio Negro com dois grandes arquipélagos (Mariuá e Anavilhanas) favorece a retenção de sedimentos de fundo. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a variação espacial da granulometria dos sedimentos de fundo e suspenso do Rio Negro e tributários. Espera-se que os resultados aqui apresentados possam contribuir para o entendimento da hidrodinâmica atual deste grande sistema fluvial tropical.

Material e métodos

Caracterização da Área de Estudo

A bacia do Rio Negro possui uma área de 712.000 km^2 com altitudes que variam de 2.900 a 10 metros acima do nível médio do mar (Figura 1). A descarga líquida média do Rio Negro observada entre 2006 e 2019 próximo de sua foz é da ordem de $35.300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com mínimo de $7.633 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e máximo de $65.510 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Marinho, 2019). Em de Manaus o fluxo de sedimentos suspensos próximo da foz é estimada entre 1,43 e 8,00 Mt. ano^{-1} com mais de 40% da carga suspensa oriunda do Rio Branco, principal tributário de água e sedimentos na bacia do Rio Negro (Filizola e Guyot, 2011; Marinho et al., 2020).

Os sedimentos suspensos transportados pelo Rio Negro são oriundos dos escudos das Guianas e de áreas cobertas por savanas, com concentração média da carga suspensa variando de 1 a 5 mg L^{-1} (Filizola e Guyot, 2011; Marinho et al., 2020). Este grande rio apresenta um padrão multicanal com a presença dos maiores arquipélagos fluvial da bacia Amazônica, o arquipélago de Mariuá em seu médio curso e o arquipélago de Anavilhanas em seu baixo curso, que possuem largura do vale fluvial superior a 15 km e centenas de km de comprimento.

Nesta bacia predominam relevos de planícies com 90% da área de altitude inferior a 80 metros, mas com uma grande variedade de formas de terrenos, com a presença de planaltos, pediplanos e patamares (IBGE, 2009). Em seu alto curso o Rio Negro escoia sobre rochas cristalinas do escudo das Guianas e depósitos

sedimentares da bacia Amazônica. Nas áreas mais estreitas do médio e baixo curso, o Rio Negro atravessa terrenos com rochas do Paleozóico. O substrato no baixo curso é constituído principalmente de aluviões holocênicos e por rochas sedimentares do Cretáceo pertencentes à

Formação Alter do Chão, com pequenas áreas de rochas sedimentares da Formação Solimões (Franzinelli e Igreja, 2002; Latrubesse e Franzinelli, 2005).

(a)

(b)

Figura 1. (a) Localização da área de estudo e das seções amostrais. (b) Perfil longitudinal do Rio Negro entre Cucuí (na tríplice fronteira Brasil-Colômbia-Venezuela) e Manaus (MAO).

Os solos na bacia do Rio Negro são desenvolvidos em saprolitos profundos, pobres em nutrientes, com predomínio de textura arenosa sobre uma extensa área de floresta equatorial densa (Goulding et al., 1989). Na região do alto Rio Negro e médio Rio Branco destaca-se a presença de grandes áreas com Espodossolo, um típico solo da bacia que possui elevada acidez, com horizonte diagnóstico B espódico logo após o horizonte E (álbico ou não) ou horizonte A (H. G. dos Santos et al., 2018) e apresenta grande quantidade de quartzo. Ao longo da planície dos Rios Negro e Branco destacam-se os Gleissolos, de cor cinza e permanecem saturados por longos períodos do ano (Quesada et al., 2011).

A precipitação na região possui média anual superior a 2.000 mm e valores que ultrapassam 3.500 mm na porção noroeste da bacia, oriunda principalmente do Atlântico Tropical e com grande reciclagem por meio da evapotranspiração da floresta (Zanin e Satyamurty, 2020). Sobre a área de drenagem dos rios Negro e Branco observa-se um elevado contraste espacial no volume da precipitação, a região oeste do Rio Branco composta por áreas de savanas, por exemplo, possui precipitação média anual da ordem de 1.200 mm por ano (D. Oliveira et al., 2014).

O Rio Negro possui um perfil longitudinal com desnível próximo de 70 metros entre Cucuí (fronteira Brasil-Colômbia-Venezuela) e Manaus (Figura 1b). Neste trecho a declividade média é de 6 cm km⁻¹, com maior desnível da superfície de água na região de São Gabriel da Cachoeira (11 cm km⁻¹) e menor no baixo curso, próximo de sua foz (1 cm km⁻¹). Na bacia do Rio Negro os períodos hidrológicos de enchente ocorrem entre

os meses de dezembro-junho, com pico de cheia em julho, vazante entre agosto-outubro e seca em novembro, com a altura do nível do rio variando de 10 metros em Manaus a 8 metros no médio e alto curso da bacia (Marinho, 2019).

Determinação da granulometria dos sedimentos de fundo

Amostras de sedimentos de fundo do Rio Negro e da foz dos principais tributários foram coletadas entre julho de 2017 e novembro de 2018, no trecho entre a fronteira Brasil-Colômbia-Venezuela e Manaus (Figura 1a), sobre um trecho de 1.300 km. Os sedimentos foram coletados numa embarcação de pequeno porte utilizando um amostrador de fundo do tipo Van Veen com capacidade de 1 kg. Foram determinadas a granulometria de 24 seções amostrais ao longo do Rio Negro e nos seus principais tributários (Figura 1a e Tabela 1).

As amostras de sedimentos de fundo passaram por secagem, desagregação e quarteamento no Laboratório de Análise e Tratamento de Sedimentos e Solos (LATOSSOLO/UFAM). A distribuição granulométrica dos sedimentos de fundo foi realizada por meio do peneiramento e pesagem da fração grossa (> 0,062 mm) e pipetagem para a fração fina (<0,062 mm) seguindo as recomendações de Suguio (1973).

A escala de Wentworth foi utilizada para quantificar as frações de grânulo (2 - 4 mm), areia muito grossa (1 - 2 mm), areia grossa (0,50 - 1 mm), areia média (0,25 - 0,50 mm), areia fina (0,125 - 0,25 mm) e areia muito fina (0,062 - 0,125 mm).

Tabela 1. Características das seções amostrais no Rio Negro e tributários.

Código	Rio/Estação	Largura (m)	Profundidade média (m)	Velocidade média (m s ⁻¹)
CUC	Rio Negro em Cucuí	623	10,61	0,45
XIE	Rio Xié na foz	277	3,54	0,30
ICA	Rio Içana na foz	396	7,50	0,59
SFE	Rio Negro em São Felipe	916	10,85	0,53
TAR	Rio Uaupés em Taracuá	496	8,15	0,56
SGC	Rio Negro em São Gabriel da Cachoeira	1.249	10,11	0,91
CUR	Rio Curicuriari na foz	238	5,21	0,76
MAR	Rio Marié na foz	376	5,51	0,62
CAU	Rio Cauaburi na foz	189	4,66	0,31
MAU	Rio Marauíá na foz	91	3,52	0,17
TEA	Rio Teá na foz	144	3,13	0,22
UNE	Rio Uneiuxi na foz	239	3,55	0,26
AIA	Rio Aiuanã na foz	120	2,45	0,17
MMA	Rio Negro montante Mariuá	5.140	5,00	*
DEM	Rio Demini na foz	632	2,72	0,34

MBC	Rio Negro jusante Mariuá	5.631	6,79	0,55
BCO	Rio Branco na foz	838	3,22	0,79
JBC	Rio Negro jusante Branco	2.919	11,20	0,44
JAU	Rio Jaú na foz	223	5,81	0,29
AN1	Rio Negro montante Anavilhanas	2.683	12,68	0,47
AN4	Lago Apacú em Anavilhanas	*	*	*
AN5	Canal da margem esquerda do Negro em Anavilhanas	1.056	18,16	0,40
AN6	Canal da margem direita do Negro em Anavilhanas	1.201	14,72	0,38
MAO	Rio Negro em Manaus	2.529	28,00	0,20

* Dado não disponível. Valores de largura, profundidade, velocidade do fluxo, elevação e coordenadas GPS do canal foram obtidos com um Perfilador Doppler Acústico de Corrente (ADCP) em novembro de 2018.

Determinação da granulometria dos sedimentos suspensos

Para determinar o tamanho dos sedimentos suspenso foram coletadas sete amostras de água em superfície no meio do canal na região de confluência dos Rios Negro e Branco (seções MBC e BCO) e nos canais do Rio Negro a montante (seção AN1), no interior (seções AN4, AN5 e AN6) e a jusante do Arquipélago de Anavilhanas (seção MAO). O tamanho das partículas suspensas dos Rios Negro e Branco foi determinado por meio do granulômetro laser Malvern Mastersizer 2000 no Laboratório de Análises Minerais (LAMIN) do Serviço Geológico Brasileiro (CPRM – Manaus).

Análise hidrodinâmica dos sedimentos de fundo

A distribuição granulométrica dos sedimentos de fundo nas frações argila, silte e

areia foram analisadas no diagrama triangular de Flemming (2000) para a classificação da condição hidrodinâmica do material de fundo do Rio Negro e tributários. O diagrama triangular de Flemming (Figura 2 e Tabela 2) foi desenvolvido para identificar e interpretar as condições de transporte e deposição de sedimentos lamosos em ambiente marinho e continental, bem como na identificação da energia do agente de transporte (Oliveira e Lima, 2004).

Conforme a Figura 2 e com base na relação entre as proporções de areia e lama (silte e argila) são definidos seis tipos de sedimentos no diagrama de Flemming: (S) areia: < 5% de lama; (A) areia levemente lamosa: 5 -25% de lama; (B) areia lamosa: 25 - 50% de lama; (C) lama arenosa: 50 - 75 % de lama; (D) lama levemente arenosa: 75 - 95% de lama e (E) lama: > 95% de lama. Estes seis tipos de sedimentos são subdivididos nas 25 classes texturais detalhas na Tabela 2.

Figura 2. Diagrama triangular de Flemming. Os códigos das classes são descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Tipos de sedimentos e classes de sedimentos com textura lamosa conforme Flemming (2000)

Código	Classe textura	Código	Classe textural
--------	----------------	--------	-----------------

S	Areia	D-I	Lama levemente arenosa extremamente siltosa
A-I	Areia levemente siltosa	D-II	Lama levemente arenosa muito siltosa
A-II	Areia levemente argilosa	D-III	Lama levemente arenosa siltosa
		D-IV	Lama levemente arenosa argilosa
B-I	Areia muito siltosa	D-V	Lama levemente arenosa muito argilosa
B-II	Areia siltosa	D-VI	Lama levemente arenosa extremamente argilosa
B-III	Areia argilosa	E-I	Silte
B-IV	Areia muito argilosa	E-II	Silte levemente argiloso
C-I	Lama arenosa extremamente siltosa	E-III	Silte argiloso
C-II	Lama arenosa muito siltosa	E-IV	Argila siltosa
C-III	Lama arenosa siltosa	E-V	Argila levemente siltosa
C-IV	Lama arenosa argilosa	E-VI	Argila
C-V	Lama arenosa muito argilosa		
C-VI	Lama arenosa extremamente argilosa		

Resultados e discussão

Granulometria dos sedimentos de fundo

O Rio Negro apresenta granulometria dos sedimentos de fundo com predomínio da fração arenosa (Figura 3). No alto e médio curso predominam amostras com areia fina, areia média e areia grossa; Conforme esperado, no baixo curso a granulometria oscilou de areia fina a partículas lamosas (silte e argila). Maior presença de grânulos foi observada nos tributários do alto curso que possuem origem no escudo das Guianas (rios Içana, Cauaburi e Xié). O Rio Uaupés (seção TAR), principal tributário do alto Rio Negro, apresentou sedimentos de fundo com granulometria arenosa variando de areia muito grossa (10%) a areia média (26%).

Os sedimentos de fundo do Rio Negro são compostos principalmente por areia branca de quartzo, enquanto que os sedimentos mais finos são formados por argilas caulínicas, ricas em ferro, e por areias oriundas do intemperismo de

rochas do embasamento Pré-cambriano ou de rochas sedimentares do Paleozóico e Mesozoico (Latrubesse e Franzinelli, 2005).

Devido a sua configuração geológico-geomorfológica, com terrenos antigos, fraca atividade tectônica, baixa declividade e uma densa cobertura florestal a bacia do Rio Negro possui uma das menores taxas de erosão entre os grandes rios amazônicos, da ordem de 10 ton.km².ano (Filizola e Guyot, 2009). Assim, esta configuração geológico-geomorfológica controla os processos de erosão, transporte e deposição dos sedimentos no Rio Negro.

Além do controle geológico-geomorfológica, destaca-se que tanto o clima como as práticas de uso e cobertura da bacia podem alterar a dinâmica de sedimentos atual do Rio Negro, uma vez atividades humanas, como o desmatamento e represamento de rios para construção de usinas hidrelétricas podem impactar significativamente grandes sistemas fluviais (Forsberg et al., 2017; Latrubesse et al., 2017).

Figura 3. Granelometria dos sedimentos de fundo do Rio Negro e tributários. A localização das seções pode ser visualizada na Figura 1a.

Os tributários com origem na planície e situados na margem direita no médio Rio Negro apresentaram sedimentos de fundo com predomínio de areia grossa (rios Curicuriari, Marié e Uneiuxi) e de areia média (rios Teá e Aiuanã). O Rio Branco e o Rio Demeni são tributários da margem esquerda, com origem em terrenos mais elevados e que drenam áreas de savanas. Ambos apresentam diâmetro mediano das partículas de fundo (D50) com tamanho igual ou inferior a areia fina (0,25 mm), granulometria menor que os tributários da margem direita no médio curso.

Sander et al. (2015) observaram que o canal no alto curso do Rio Branco apresenta sedimentos de fundo com predomínio de areia média e areia grossa. Os dados analisados neste trabalho foram coletados próximo da foz do Rio Branco e indica redução da granulometria de sedimentos do fundo em comparação com seu alto curso. Esta redução no transporte de sedimentos de fundo de montante para jusante no rio Branco pode ser agravada com a implantação da usina hidrelétrica de Bem-Querér, prevista para ser construída em seu médio curso, próximo da cidade de Caracará (EPE, 2018).

Maior presença de sedimentos de fundo e com granulometria fina (silte e argila) foram observadas nas seções amostrais do baixo Rio Negro, principalmente a montante (seção AN1) e no interior do arquipélago de Anavilhanas (seções AN4 e AN5). O Rio Negro entre a seção JBC e AN1, localizadas respectivamente a jusante da foz do Rio Branco e a montante do arquipélago de Anavilhanas, apresenta grande redução no diâmetro mediano (D50 variou de 0,1 mm para 10 μ m) (Figura 4a).

No interior de Anavilhanas nota-se a grande diferença espacial entre a granulometria dos sedimentos de fundo dos canais do Rio Negro da margem esquerda (seção AN5 com D50 igual a 0,004 mm) e da margem direita (seção AN6 com D50 igual a 0,3 mm). Alves (2013) e Cunha (2017) analisaram a granulometria de sedimentos de fundo do Rio Negro a montante, no interior e a jusante de Anavilhanas e também identificaram o predomínio da fração arenosa (variando de areia grossa à areia fina) em barras de sedimentos fluviais centrais e laterais deste arquipélago.

Figura 4. (a) Granulometria dos sedimentos de fundo do Rio Negro a montante, no interior e a jusante do arquipélago de Anavilhanas. Dados coletados em novembro de 2018. (b) Granulometria dos sedimentos de fundo do Rio Negro e Rio Branco durante a cheia (julho) e seca (novembro) de 2017.

A Figura 4b apresenta a granulometria dos sedimentos de fundo do Rio Negro e do Rio Branco coletado durante o período de águas altas (pico de cheia) e águas baixas (pico de seca). Nota-se pouca variação temporal na granulometria dos sedimentos de fundo coletados no Rio Branco. Maior diferença foi observada nos dados da seção AN1, localizada no Rio Negro a montante do arquipélago de Anavilhanas, em que se observa redução no D50 de 0,30 mm do período de águas altas para 0,15 mm do período de águas baixas. Esta redução pode ser relacionada à menor capacidade de transporte de material no Rio Negro neste período.

As análises granulométricas de amostras coletadas em diferentes trechos do Rio Negro indicam que o alto e médio curso transporta frações de areia maior que 0,25 mm, pouco selecionadas e oriundas de rochas antigas do Pré-cambriano e Paleozóico, enquanto que o baixo curso transporta areia menor que 0,25 mm, melhores selecionadas e oriundas de rochas da Formação Alter do Chão (Latrubesse e Franzinelli, 2005). De forma geral, o diâmetro mediano dos sedimentos de fundo no Rio Negro observados neste trabalho (0,20 mm) aparenta ser semelhante aos valores observados no Rio Amazonas (0,25 mm) e inferior ao do Rio Orinoco (0,40 mm) (Guyot et al., 1999).

Este conjunto de dados lançado no diagrama triangular de Flemming (Figura 5) indica que a maioria das seções analisadas no Rio Negro e tributários pertencem à classe textural do tipo Areia (50% das amostras analisadas são da classe S) e Areia levemente siltosa (classe A-I com 42% das amostras). Isto é devido ao predomínio da fração arenosa nos sedimentos de

fundo. As amostras identificadas na classe A-I (com 5 - 25% de sedimentos finos) foram observadas em diferentes trechos do alto (seções SFE, TAR, CAR, MAU), médio (seção MMA) e baixo (seções, BCO, JBC e AN6) curso do Rio Negro.

Os sedimentos coletados das seções AN1, AN4 e MAO apresentaram predomínio de partículas finas (Areia siltosa na seção MAO; Lama arenosa siltosa na seção AN1; Lama levemente arenosa argilosa na seção AN5). Os sedimentos de fundo coletados na seção AN4, localizada no interior do Lago Apacú, foram classificados como Argila levemente siltosa (> 95% de sedimentos lamosos). A presença de grande quantidade de sedimentos finos nestas seções indica que ambientes de deposição predominam no baixo curso do Rio Negro devido à baixa energia disponível para o processo de transporte.

Os sedimentos de fundo de um rio servem de base para a origem de formas fluviais, como barras, praias e ilhas (Stevaux e Latrubesse, 2017) e grandes rios multicanaís podem apresentar setores com características hidráulicas e sedimentares desiguais, como observado no Rio Paraná (Dos Santos et al., 2017) e detalhado neste estudo em Anavilhanas, com dados coletados antes, no interior e a jusante deste grande conjunto de ilhas do Rio negro.

A aplicação da classificação de Flemming nos dados de sedimentos de fundo do Rio Negro possibilitou identificar distintos ambientes de deposição de material lamoso em seu baixo curso. Como destacado por Marinho et al. (2020), apesar do Rio Negro possui um grande volume de água este grande rio possui pouca energia para realizar

trabalho fluvial de erosão e transporte de sedimentos, com potência específica do canal (ω) em seu baixo curso menor que 2 W m^2 , enquanto que outros grandes rios, como os Rios Madeira e Orinoco possuem ω superior a 20 W m^2 , e por consequência, transportam maior carga sedimentar.

Figura 5. Distribuição das frações granulométricas de sedimentos de fundo do Rio Negro e tributários no diagrama de Flemming.

Granulometria dos sedimentos suspensos

Tabela 3. Diâmetro mediano (D50) do sedimento suspenso em diferentes seções do Rio Negro e na foz do Rio Branco (valores em μm).

Código	Rio/Estação	Distância de Manaus (km)	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
MBC	Rio Negro jusante Mariuá	361	7,18	24,29	85,60
BCO	Rio Branco na foz	368	7,96	25,72	61,88
AN1	Rio Negro montante Anavilhanas	219	8,29	24,98	68,10
AN4	Lago Apacú em Anavilhanas	146	7,04	19,33	54,34
AN5	Canal da margem esquerda do Negro em Anavilhanas	142	4,48	20,17	53,12
AN6	Canal da margem direita do Negro em Anavilhanas	141	8,04	29,27	77,13
MAO	Rio Negro em Manaus	50	6,34	21,48	45,22

A variação espacial da granulometria do sedimento suspenso no trecho de 300 km do baixo Rio Negro indica pouca variação do D50 de montante para jusante, com uma redução de 12% entre as seções MBC e MAO, comportamento típico para os rios da planície amazônica (Guyot et al., 1999; Nordin et al., 1980).

O D50 dos sedimentos suspensos nas seções MBC e BCO são da mesma magnitude, apesar da grande diferença na concentração de sedimentos suspensos entre os rios Negro (5 mg L^{-1}) e Branco (30 mg L^{-1}) (Marinho, 2019). Em seu baixo curso o diâmetro mediano do sedimento suspenso do Rio Negro ($0,25 \mu\text{m}$) é equivalente a 25% do diâmetro mediano no sedimento de fundo ($0,1 \text{ mm}$).

A distribuição granulométrica dos sedimentos suspensos no Rio Negro indica predomínio de partículas finas de silte (90% menor que $80 \mu\text{m}$) e D50 variando de 20 a $29 \mu\text{m}$. Por outro lado, no Rio Branco observou-se que 90% das partículas suspensas são menores que $60 \mu\text{m}$ (Tabela 3). O diâmetro mediano das partículas estimadas para os rios Negro e Branco são próximas aos valores observados por Cunha (2017) em Anavilhanas (com predominância de grãos com tamanho de silte médio), porém levemente superiores aos observados no Rio Congo na África (Jouanneau et al., 1990), ao do Rio Beni na Bolívia (Guyot et al., 1999) e no médio curso do Rio Paraná (Drago e Amsler, 1988).

Um bom entendimento das características físicas dos sedimentos suspensos e de fundo é de grande importância para avaliação ambiental, principalmente o sedimento suspenso que pode ser entendido como um indicador chave para o monitoramento das práticas de uso da terra em bacias de pequeno e grande porte, como destacado em estudos recentes (Degrande et al., 2020; Latrubesse et al., 2017; Souza Filho, 2016).

Maior diferença espacial no valor do D50 do sedimento suspenso foi observada no interior do arquipélago de Anavilhanas, entre as seções AN5 e AN6. O diâmetro mediano dos sedimentos suspensos coletados no canal situado na margem esquerda de Anavilhanas (seção AN5) e no Lago Apacú (seção AN4) são 45% menores ao D50 observado na seção AN6, situada no canal da margem direita deste arquipélago (Tabela 3), um comportamento semelhante ao observado nos sedimentos de fundo (Figura 4a). Esta diferença é relacionada à maior influência das águas do Rio Branco sobre esta região de Anavilhanas, como destacado por Marinho et al., (2020).

Portanto, conhecer a granulometria e concentração do sedimento suspenso em um grande sistema fluvial bem conservado, como na

bacia do Rio Negro, serve de linha de base para avaliação de possíveis impactos oriundos dos usos dos recursos naturais da região.

Conclusões

Este trabalho investigou a distribuição espacial da composição granulométrica de sedimentos de fundo e suspenso transportado pelo Rio Negro e seus principais tributários. Em seu alto e médio curso predomina a presença de material de fundo arenoso com frações de silte e argila inferior a 5%. O material mais grosso (> 1 mm) de origem nos escudos das Guianas é acumulado na região de transição entre o médio e baixo curso, principalmente no arquipélago de Mariuá.

Desta forma, os dados de granulometria dos sedimentos de fundo corroboram para a hipótese apresentada, indicando que tanto os arquipélagos de Mariuá e Anavilhanas atuam para reter sedimentos de fundo transportado pelo Rio Negro, principalmente das frações de grânulo, areia muito grossa, areia grossa e areia média.

No baixo curso do Rio Negro foi observado um gradiente granulométrico dos sedimentos de fundo e suspensos nas seções localizadas próximo do arquipélago de Anavilhanas, uma região de baixa energia que atua como zona de acumulação do material fino transportado nos múltiplos canais do Rio Negro.

Análise granulométrica dos tributários da margem direita do Rio Negro indicam partículas de fundo maior em relação aos tributários da margem esquerda. No baixo curso foi observada uma redução no D50 dos sedimentos de fundo de montante para jusante da ordem de 90%, enquanto que a diminuição no D50 dos sedimentos suspensos foi de 12%. De forma geral, o diâmetro mediano do sedimento suspenso do baixo Rio Negro é equivalente a 25% do diâmetro mediano no sedimento de fundo. Valores que indicam uma contribuição quase nula do fluxo de sedimento do Rio Negro para o Rio Amazonas.

Os resultados apresentados neste trabalho destacam as principais características granulométricas dos sedimentos transportados pelo Rio Negro, evidenciando a variação espacial observada na região do complexo de Anavilhanas. No entanto, pesquisas adicionais devem ser realizadas para uma melhor avaliação das formas do leito do Rio Negro, bem como uma maior avaliação temporal da influência do arquipélago de Mariuá sobre os sedimentos de fundo e suspenso oriundos do alto Rio Negro.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi realizada com apoio da Agência Nacional de Águas no âmbito do Acordo de Cooperação Técnica nº 7/2018 (Processo nº 028229/2018-46) entre ANA e UFAM. Agradecemos o apoio do Institut de Recherche pour le Développement (IRD) e à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) pelo apoio ao projeto de iniciação científica (PIB-H/0006/2019 PIBIC-AF).

Referências

- Alves, N. de S., 2013. Mapeamento hidromorfodinâmico do Complexo Fluvial de Anavilhanas: contribuição aos estudos de Geomorfologia Fluvial de rios Amazônicos. Tese (Doutorado). São Paulo, Universidade de São Paulo.
- Barbosa, R. O., 2015. Estudos sedimentológicos e estratigráficos dos depósitos sedimentares quaternários do arquipélago de Anavilhanas, município de Novo Airão (Amazônia Central). Dissertação (Mestrado). Manaus, Universidade Federal do Amazonas.
- Brandão, C. J., Botelho, M. J. C., Sato, M. I. Z., Lamparelli, M. C., 2011. Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. ANA, 1 ed, Brasília/DF.
- Cunha, D. F., 2017. Evolução sedimentar do arquipélago de Anavilhanas no baixo rio Negro, Amazônia Central. Dissertação (Mestrado), São Paulo, Universidade de São Paulo.
- Cunha, S. B., 2013. Geomorfologia fluvial, in: Cunha, S. B.; Guerra, A. J. T. (Eds.), Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 157-190.
- Degrande, E. J. S., Firmino, G. V., Torres, M. A. N., 2020. Dinâmica Fluvial e Caracterização Limnológica do Córrego do Cedro, Presidente Prudente -São Paulo/ Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 13(4), 1851. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1851-1869>. Acesso: 20 dez. 2020.
- Dos Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Dos Anjos, L. H. C., De Oliveira, V. A., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., De Almeida, J. A., de Araujo Filho, J. C., De Oliveira, J. B., Cunha, T. J. F., 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos, 5 ed. Embrapa, Rio de Janeiro. Disponível: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1094003/2/SiBCS2018ISBN9788570358004.pdf>. Acesso 15 jul. 2016

- Dos Santos, V. C., Stevaux, J. C., Assine, M. L., 2017. Fluvial Processes in Attachment Bars in The Upper Paraná River, Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [online] 18(3). Disponível: <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i3.1135>. Acesso: 14 dez. 2020
- Drago, E. C., Amsler, M. L., 1988. Suspended sediment at a cross section of the Middle Parana River: concentration, granulometry and influence of the main tributaries, in: Bordas, P., Walling, D. E. (Eds.), *Sediment Budgets*. IAHS, Paris, 381-396.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2018. Usina Hidrelétrica (UHE) Bem Querer. Disponível: <http://www.uhebemquerer.com.br/>. Acesso: 15 out. 2019
- Filizola, N., Guyot, J.-L., Wittmann, H., Martinez, J.-M., Oliveira, E., 2011. The Significance of Suspended Sediment Transport Determination on the Amazonian Hydrological Scenario, in: Manning, A. J. (Eds.), *Sediment Transport in Aquatic Environments*. InTech, Croacia, pp. 45–64. Disponível: <https://doi.org/10.5772/19948>. Acesso: 07 abr. 2017
- Filizola, N., Guyot, J. L., 2009. Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. *Hydrological Processes*, [online] 23(22), pp. 3207-3215. Disponível: <https://doi.org/10.1002/hyp.7394>. Acesso: 22 mai. 2019
- Filizola, N., Guyot, J. L., 2011. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, [online] 41(4), pp. 566-576. Disponível: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011414566576>. Acesso: 22 mai. 2019
- Filizola, N. P., 2003. *Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens*. Tese (Doutorado) Toulouse, Université Toulouse III Paul Sabatier.
- Flemming, B., 2000. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Continental Shelf Research*, 20(10–11), [online] pp. 1125-1137. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(00\)00015-7](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00015-7). Acesso: 08 mai. 2020
- Forsberg, B. R., Melack, J. M., Dunne, T., Barthem, R. B., Goulding, M., Paiva, R. C. D., Sorribas, M. V., Silva, U. L., Weisser, S., 2017. The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. *PLOS ONE*, [online] 12(8), e0182254. Disponível: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182254>. Acesso: 30 mai. 2019
- Franzinelli, E., Igreja, H., 2002. Modern sedimentation in the Lower Negro River, Amazonas State, Brazil. *Geomorphology*, [online] 44(3–4), pp. 259-271. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00178-7). Acesso: 23 mai. 2017
- Goulding, M., Leal Carvalho, M., Ferreira, E., 1989. *Río Negro, rich life in poor water: Amazonian diversity and foodchain ecology as seen through fish communities*. SPB Academic Publishing, The Hague.
- Guyot, J. L., Jouanneau, J. M., Wasson, J. G., 1999. Characterisation of river bed and suspended sediments in the Rio Madeira drainage basin (Bolivian Amazonia). *Journal of South American Earth Sciences*, [online] 12(4), pp. 401-410. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(99\)00030-9](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(99)00030-9). Acesso: 08 mai. 2020
- Hinderer, M., 2012. From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales. *Sedimentary Geology*, [online] 280, pp. 21-59. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.009>. Acesso: 25 nov. 2019
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2009. *Mapa de Geomorfologia da Amazônia Legal - Escala 1:250.000*. Rio de Janeiro.
- Jouanneau, J.-M., Lapaquellerie, Y., Latouche, C., Tastet, J.-P., 1990. Résultats préliminaires de la campagne Oubangui-Congo de novembre 1988. Microgranulométrie, minéralogie, analyses chimiques des matières en suspension / Preliminary results of the Oubangui-Congo cruise (November 1988). *Microgranulometry, mineralogy, chem. Sciences Géologiques. Bulletin*, [online] 43(1), pp. 3-14. Disponível: <https://doi.org/10.3406/sgeol.1990.1841>. Acesso: 10 mai. 2020
- Latrubesse, E. M., Stevaux, J. C., Sinha, R., 2005. Tropical rivers. *Geomorphology*, [online] 70(3–4), pp. 187-206. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.005>. Acesso: 23 mai. 2019
- Latrubesse, Edgardo M., Arima, E. Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V. R., D'Horta, F. M., Wight, C., Wittmann, F., Zuanon, J., Baker, P. A., Ribas, C. C., Norgaard, R. B., Filizola, N., Ansar, A., Flyvbjerg, B., Stevaux, J. C., 2017. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature*, [online] 546(7658), pp. 363-369. Disponível: <https://doi.org/10.1038/nature22333>. Acesso: 30 mai. 2019
- Latrubesse, E. M., Franzinelli, E., 2005. The late Quaternary evolution of the Negro River, Amazon, Brazil: Implications for island and

- floodplain formation in large anabranching tropical systems. *Geomorphology*, [online] 70(3-4), pp. 372-397. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.014>. Acesso: 30 mai 2018
- Marinho, R. R., 2019. 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 (Doutorado) Manaus, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.
- Marinho, R. R., Filizola, N. P., Cremon, É. H., 2020. Analysis of Suspended Sediment in the Anavilhanas Archipelago, Rio Negro, Amazon Basin. *Water*, [online] 12(4), pp. 1073. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w12041073>. Acesso: 14 abr. 2020
- Meurer, M., Bravard, J.-P., Stevaux, S. C., 2011. Granulometria dos sedimentos marginais do rio Ivaí com vistas à compreensão da dinâmica hidrossedimentar montante-jusante. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [online] 12(1), pp. 39-44. Disponível: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v12i1.217>. Acesso: 08 mai 2020
- Nordin, C. F., Meade, R. H., Curtis, W. F., Bósio, N. J., Landim, P. M. B., 1980. Size distribution of Amazon River bed sediment. *Nature*, [online] 286(5768), pp. 52-53. Disponível: <https://doi.org/10.1038/286052a0>. Acesso: 10 mai 2020
- Oliveira, D., Santos, A. L. M. R., Marmos, J. L., 2014. Recursos Hídricos Superficiais. in: Holanda J. L. R., Marmos, J. L., Maia, M. A. M. (Eds.), *Geodiversidade do estado de Roraima*. CPRM, Manaus, 49-63.
- Oliveira, M. A. T., Lima, G. L., 2004. Classificação de sedimentos quaternários em cabeceiras de vale através da aplicação do diagrama de Flemming: município de Campo Alegre, norte de Santa Catarina. *Geociências*, 23(1/2), pp. 67-78.
- Quesada, C. A., Lloyd, J., Anderson, L. O., Fyllas, N. M., Schwarz, M., Czimczik, C. I., 2011. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, [online] 8(6), 1415-1440. Disponível: <https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011>. Acesso: 24 jun. 2019
- RSIS. Ramsar Information Sheet, 2018. Rio Negro, Brazil. Disponível: <https://rsis Ramsar.org/ris/2335>. Acesso: 31 dez. 2019
- Sander, C., Gasparetto, N. V. L., Santos, M. L., 2015. Variações da carga sedimentar de fundo e morfologia dos perfis transversais batimétricos no trecho inferior da bacia do alto Rio Branco, Roraima. *Rev. Geogr. Acadêmica*, 9(1), pp. 130-145.
- Sioli, H., 1984. The Amazon and its main affluents: Hydrography, morphology of the river courses, and river types. in: Sioli (Ed.), *Amazon Limnology and landscape ecology of mighty tropical river and its basins*. Springer, Netherlands, pp. 127-165. Disponível: https://doi.org/10.1007/978-94-009-6542-3_5. Acesso: 02 mar 2015
- Souza Filho, E. E., 2016. Barragem de Porto Primavera e o transporte fluvial na seção de Porto São José, Rio Paraná. *Mercator*, [online] 15(4), pp. 65-81. Disponível: <https://doi.org/10.4215/RM2016.1504.0005>. Acesso: 17 dez. 2020
- Stevaux, J. C., Latrubesse, E. M., 2017. *Geomorfologia fluvial*, Oficina de Textos, São Paulo.
- Suguio, K., 1973. *Introdução à Sedimentologia*, Edgard Blücher, São Paulo.
- Suguio, K., 2003. *Geologia Sedimentar*, Edgard Blücher, São Paulo.
- Zanin, P. R., Satyamurty, P., 2020. Hydrological processes interconnecting the two largest watersheds of South America from seasonal to intra-monthly time scales: A critical review. *International Journal of Climatology*, [online] 40(9), pp. 3971-4005. Disponível: <https://doi.org/10.1002/joc.6443>. Acesso: 02 ago. 2020