

# Mineralogia e química dos sedimentos de fundo do médio e baixo Madeira e de seus principais tributários – Amazonas – Brasil

Maria Mireide Andrade QUEIROZ<sup>1</sup>, Adriana Maria Coimbra HORBE<sup>2</sup>, Candido Augusto Veloso MOURA<sup>3</sup>

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar a variação composicional e mineralógica dos sedimentos de fundo transportados pelos grandes rios da Amazônia, com nascentes nos Andes provenientes de rochas cratônicas. O estudo foi realizado com base em análises granulométricas, mineralógicas e químicas, incluindo isótopos de Pb, no rio Madeira e seus tributários. O conjunto de dados mostra que os sedimentos de fundo do rio Madeira são granulométrica, mineralógica e quimicamente distintos de seus principais tributários. Os sedimentos do rio Madeira são mais arenosos; têm maior quantidade de quartzo; menor conteúdo de  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ , PF,  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $MnO$  e elementos-traço; e a maturidade aumenta de montante para jusante. Dentre os sedimentos dos tributários, os rios Machado e secundariamente o rio Marmelos são os que mais se aproximam da composição dos sedimentos do rio Madeira, enquanto que o Jamari com sedimentos com maior proporção de  $TiO_2$ , Zr, Y, Nb, Ga, Hf, U, Ta e ETR, é o mais distinto. Apesar do ambiente de intenso intemperismo e erosão, em condições tropicais úmidas, a que estão submetidas as rochas drenadas pela bacia do rio Madeira, os valores das razões Th/Co, Th/Pb, Th/Yb, Al/Pb, Zr/Co e a composição isotópica de Pb indicam fontes distintas para os sedimentos de fundo estudados. Os sedimentos do rio Madeira são provenientes, principalmente, de rochas máficas, enquanto que os sedimentos de seus tributários têm como fonte essencialmente rochas félsicas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geoquímica, isótopos de Pb, águas brancas e pretas

## Mineralogy and chemistry of bottom sediments of the middle and lower Madeira River and its main tributaries - Amazonas - Brazil

## ABSTRACT

This study reports the granulometric, mineralogic and chemical analyses, including Pb isotope, carried out on the bottom sediments of the Madeira River, whose headwaters are in the Andes Mountain, and its tributaries that come from the cratonic region, in order to investigate the compositional variation of the sediments transported by the major rivers of the Amazon. The analytical data show that the bottom sediments of the Madeira River have higher amounts of sand and quartz, and lower contents of  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ , PF,  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $MnO$  and trace elements, and the maturity increases toward downstream. Among the tributaries, the bottom sediments from Machado and, secondarily, Marmelos rivers are those that more closely match the composition of the sediments of Madeira River. The sediments of Jamari River, with higher proportion of  $TiO_2$ , Zr, Y, Nb, Ga, Hf, U, Ta and REE, are quite distinct. In spite of the intense weathering and erosion, in humid tropical conditions, that the rocks drained by the Madeira river basin have been submitted, the Th/Co, Th/Pb, Th/Yb, Al/Pb, Zr/Co ratios and Pb isotope data indicate that different sources contributed to the bottom sediments. It is suggested that mafic rocks are the main source of the sediments of the Madeira River, while felsic rocks are the source of the tributaries.

**KEYWORDS:** Geochemistry, isotope of Pb, white and black water.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências. Rua Augusto Correia, 1 - Guamá. CEP: 66075-110 Belém, PA. e-mail: mireidequeiroz@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geociências. Curso de Pós-Graduação. Av. General Rodrigo Otávio Jordão Ramos, 3000 - Japiim. CEP: 69077-000 Manaus, AM. e-mail: ahorbe@ufam.edu.br

<sup>3</sup> Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências. Rua Augusto Correia, 1 - Guamá. CEP: 66075-110 Belém, PA. e-mail: candido@ufpa.br

## INTRODUÇÃO

Os rios são as principais vias por onde os produtos de erosão, provenientes do continente, alcançam os oceanos. As composições destes produtos, química e isotópica, podem ser influenciadas por vários fatores, que incluem: 1) ambiente geológico (composição, diagênese, metamorfismo e taxa de intemperismo das rochas) da bacia de drenagem; 2) clima; 3) classificação hidráulica; 4) aportes eólicos e glaciais e 5) atividades antropogênicas (Goldstein e Jacobsen 1988; Fralick e Kronberg 1997). A interação destes fatores, os processos físicos e químicos envolvidos e até como variou a composição da crosta continental superior ao longo do tempo podem ser medidos estudando-se as frações particuladas e dissolvidas dos grandes rios do mundo (Negrel *et al.* 1993, Millot *et al.* 2004). Contudo, a composição química do material transportado pela água ao longo dos rios pode ser modificada devido ao aporte de afluentes e a variação do substrato geológico, o que dificulta sua correlação com a rocha fonte (Borges *et al.* 2008). Para isso, utilizam-se como parâmetros: a mineralogia e a química dos minerais resistentes, e a química dos sedimentos com ênfase nos elementos imóveis como Al, Ti, Th, Sc, Co, Zr e ETR, que são pouco fracionados durante os processos de intemperismo, e concentram-se no material em suspensão e no sedimento de fundo em detrimento da fração dissolvida dos rios (Taylor e McLennan 1985).

O rio Madeira tem nascente na Bolívia a partir da confluência dos rios Guaporé, Mamoré, Beni e Madre de Dios e, ao longo do seu curso, recebe inúmeros afluentes (Abunã, Jaci-Paraná, Candeias do Jamari, Machado, Marmelos, Aripuanã, Canumã, Madeirinha e Acará). Este conjunto de rios, que forma a bacia do Madeira, drena rochas da cordilheira dos Andes, do Cráton Brasileiro e da bacia do Amazonas e tem vastas planícies aluviais formadas a partir da deposição de sedimentos carregados por essas drenagens (Figura 1).

Poucos estudos foram feitos no rio Madeira. Martinelli *et al.* (1993), Guyot *et al.* (2007) e Lyons e Bird (1995) identificaram, nos sedimentos de fundo e em suspensão, illita, caulinita, clorita e esmectita. Há um pouco mais de detalhes sobre a química da água nas suas cabeceiras (Elbaz-Poulichet *et al.* 1999; Dosseto *et al.* 2006b) e próximo à confluência com o rio Amazonas (Gibbs, 1967; Martinelli *et al.* 1993; Gaillardet *et al.* 1997; Benedetti *et al.* 2003; Mortatti e Probst, 2003; Seyler e Boaventura, 2003; Seyler *et al.* 2003; Tardy *et al.* 2005; Dosseto *et al.* 2006).

Com o objetivo de avaliar como variam e quais as influências a que estão submetidos os sedimentos de fundo transportados pelos grandes rios da Amazônia, como o Madeira, cujas nascentes estão nos Andes, enquanto seus afluentes provêm de rochas cratônicas, foram estudadas suas características granulométricas, mineralógicas e químicas. Foi selecionado o trecho do rio que se estende da cidade de Porto

Velho até a confluência do rio Madeira com o Amazonas, cobrindo 1.050 km de extensão, o que representa 75% do percurso total do rio (Figura 1).

## CONTEXTO FISIOGRAFICO E GEOLÓGICO

A região drenada pelo rio Madeira caracteriza-se pelo clima quente e úmido com estação seca pouco pronunciada, do tipo “Am” na classificação de Köppen (1948). A temperatura anual média varia entre 25 e 27 °C. A umidade relativa do ar é de aproximadamente 85% e a precipitação de até 2200 mm ano<sup>-1</sup>. O período mais chuvoso na região é de janeiro a março, e a época mais seca de junho a agosto. As menores temperaturas verificam-se de junho a julho, com mínimas absolutas de 10 °C a 16 °C (CPRM 2001). Segundo Terezo *et al.* (1975), a floresta domina grande parte da região e o cerrado ocupa apenas ilhas no seu interior, próximo ao limite entre Rondônia e Mato Grosso.

O rio Madeira drena três unidades morfo-estruturais principais: a cordilheira dos Andes (15%), o escudo Brasileiro (41% da bacia) e a planície Amazônica (44%), com litologia e geomorfologia distintas. A porção estudada da bacia do Madeira, entre Porto Velho e a foz com o Amazonas, está inserida nas duas últimas unidades. O escudo Brasileiro tem geomorfologia baixa, é constituído de platôs e colinas formadas por rochas de idades arqueanas, pré-cambrianas e paleozoicas. A porção da bacia do rio Madeira estudada inclui rochas ígneas e metamórficas do Grupo Colider (*riolitos, andesitos e brechas*), Suite Intrusiva São Romão (*granitos, metagranitos e gnaisses calcialcalinos*), Suite Intrusiva Serra da Providência (*granito, charnockito, mangerito e rochas máficas*), Complexo Jamari (*ortognaisse tonalítico, quartzo-diorito, gnaisses calcissilicático e micaxisto*) do paleoproterozoico e as sedimentares do Grupo Alto Tapajós (*arenitos, siltitos e calcários*) (CPRM 2006). Estas rochas compõem as cabeceiras e o médio curso dos afluentes da margem direita do rio Madeira. A planície Amazônica é genericamente subdividida em terras altas e várzeas constituídas pelas rochas sedimentares das formações Alter do Chão (*arenitos e conglomerados*), Içá (*arenitos, argilitos com linhitos e turfa*) e depósitos quaternários (*silte, areia e seixos*) (Figura 1).

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas, em julho de 2007, treze amostras de sedimentos de fundo (Figura 1 e Tabela 1) com o auxílio de uma draga. As amostras, contendo aproximadamente 1 quilograma, foram secas à temperatura ambiente (24 °C), parte do material foi pulverizado para as análises mineralógicas e químicas, enquanto que o restante foi reservado para as análises granulométricas.

Para a análise granulométrica, foram utilizadas 100 g de sedimento e peneiras de malhas 0,50 mm; 0,25 mm; 0,125



Figura 1 - Mapa geológico e localização das amostras da região estudada.

mm e < 0,062 mm em que obteve-se, respectivamente, as frações areia grossa, média, fina e silte + argila. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas.

As determinações mineralógicas foram feitas por lupa binocular e difração de raios-x no laboratório de Difração de Raios-x do Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas. Foi utilizado difratômetro Shimadzu, modelo XRD-6000, equipado com ânodo de cobre ( $CuK\alpha_1 =$

**Tabela 1** - Pontos de coletas, coordenadas geográficas e granulometria dos sedimentos de fundo estudados.

Pontos	Local	Coordenadas Geográficas		Areia %				Silte + argila %
		Latitude	Longitude	grossa	média	fina	muito fina	
1	rio Madeira	05° 50' 58,5"	61° 36' 20,5"	<1	24	73	1	2
2	rio Madeira	05° 48' 19,0"	61° 22' 30,3"	7	80	12	<1	1
3	rio Madeira	07° 45' 36,0"	62° 56' 00,9"	<1	59	39	<1	1
4	rio Madeira	08° 15' 07,2"	63° 22' 14,5"	20	35	30	8	7
5	rio Madeira	08° 35' 44,1"	63° 47' 18,6"	1	28	49	19	3
6	rio Sampaio	04° 05' 09,9"	59° 25' 12,0"	<1	<1	<1	<1	99
7	rio Aripuanã	05° 20' 06,0"	60° 25' 25,3"	31	60	<1	<1	8
8	rio Manicoré	06° 02' 52,4"	61° 34' 39,0"	26	66	<1	<1	7
9	rio Marmelos	06° 24' 56,1"	61° 46' 33,6"	<1	3	9	13	74
10	rio Antônio	06° 24' 01,1"	62° 01' 24,9"	<1	<1	<1	<1	99
11	rio Puruzinho	06° 19' 17,7"	62° 21' 52,5"	<1	<1	<1	4	95
12	rio Machado	08° 27' 48,9"	62° 33' 09,0"	27	56	13	<1	3
13	rio Jamari	08° 16' 58,4"	62° 59' 38,4"	<1	<1	<1	4	95

As amostras do rio Madeira estão de jusante para montante (Figura 1).

1,5405 Å). As condições instrumentais aplicadas nas análises das amostras foram: voltagem: 40,0 (Kv), amperagem: 30 (mA), fendas usadas: 1,0-1,0-0,15, scan range: 3° a 60° (2θ), passo: 0,2 °2θ, velocidade: 2° 2θ/mim.

O percentual correspondente a cada mineral encontrado foi obtido conjugando o cálculo estequiométrico de cada mineral, e as análises químicas dos óxidos maiores das amostras (Tabela 2) (Martinelli *et al.* 1993). Todos os minerais foram detectados por difratometria de raios-x, exceto hematita e goethita encontradas apenas em oólitos identificados por lupa binocular. O método para esse cálculo está detalhado na Tabela 2 e constou dos seguintes passos: 1) foi considerado que todo o MgO está na illita, isso permitiu estimar o percentual de

**Tabela 2** - Minerais identificados, suas respectivas composições centesimais e procedimentos para a quantificação dos minerais presentes nas amostras.

MINERAIS	CÁLCULO COMPOSICIONAL
Illita (I)	$I = \text{MgO total} \times 100/3,11$ ; $\text{K}_2\text{O}(I) = 7,26 \times I/100$ ; $\text{Al}_2\text{O}_3(I) = 17,02 \times I/100$ ; $\text{SiO}_2(I) = 54,01 \times I/100$ ;
Muscovita (Mu)	$\text{Mu} = \text{K}_2\text{O total} - \text{K}_2\text{O}(Mu) \times 100/11,81$ ; $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Mu}) = 38,36 \times \text{Mu}/100$ ; $\text{SiO}_2(\text{Mu}) = 45,21 \times \text{Mu}/100$ .
Montmorilonita (Mt)	$\text{Mt} = \text{Na}_2\text{O total} \times 100/1,02$ ; $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Mt}) = 18,57 \times \text{Mt}/100$ ; $\text{SiO}_2(\text{Mt}) = 43,7 \times \text{Mt}/100$ .
Caulinita (C)	$C = [\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ total} - \text{Al}_2\text{O}_3(I) - \text{Al}_2\text{O}_3(\text{Mu})] \times 100/39,50$ ; $C = \text{SiO}_2 \text{ total} \times 100/46,55$ .
Quartzo (Q)	$Q = \text{SiO}_2 \text{ total} - \text{SiO}_2(I) - \text{SiO}_2(\text{Mu}) - \text{SiO}_2(\text{C}) - \text{SiO}_2(\text{Mt})$ .
Hematita + Goethita (H+G)	$H+G = \text{Fe}_2\text{O}_3$
Rutilo (R)	$R = \text{TiO}_2$

CC – composição centesimal obtida a partir da fórmula química de cada mineral.

$\text{K}_2\text{O}$  proveniente da illita, o restante foi atribuído à muscovita; 2) o CaO foi associado a montmorilonita; 3) Com base na proporção desses minerais foi quantificado o  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de cada um deles; 4) Subtraiu-se esses valores do  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  obtido na análise química inicial (Tabela 2); 5) O novo valor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  foi atribuído a caulinita e calculado quanto de  $\text{SiO}_2$  é necessário para sua formação; 6) O valor final de  $\text{SiO}_2$  foi considerado como quartzo; 5) o  $\text{TiO}_2$  foi atribuído ao rutilo e o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  à hematita+goethita.

As análises químicas dos óxidos maiores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) foram feitas por ICP-AES, após fusão com  $\text{LiBO}_2$  e dissolução com água-régia. A perda ao fogo (P.F) foi feita por gravimetria. Os elementos-traço (Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, Mn, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Au, Hg, Se, Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sc, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, ETR) e isótopos de Pb por ICP-MS, após fusão com  $\text{LiBO}_2$  e dissolução com água-régia. Todas as análises químicas foram executadas pela Acme Analytical Laboratories LTD no Canadá.

O índice de intemperismo (CIA) foi calculado pela fórmula  $\text{Al}_2\text{O}_3/[(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100]$  de Nesbitt e Young (1984) e  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  por  $[(\text{Eu}/0,087) \sqrt{(\text{Sm}/0,231) * (\text{Gd}/0,306)}]$ . O delineamento estatístico foi realizado por análise de agrupamento do programa Statistica versão 9.0.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Composição Granulométrica e Mineralógica

Os sedimentos de fundo se caracterizam pela textura areia média, fina e silte-argila como as mais abundantes. Os sedimentos dos rios Sampaio, Marmelos, Antonio, Puruzinho

e Jamari são essencialmente siltico-argilosos, enquanto os rios Madeira, Aripuanã, Manicoré e Machado são mais arenosos, especialmente os três últimos, onde predominam as frações areia grossa e média (Tabela 1).

As frações mais grossas são compostas essencialmente de quartzo (hialino, branco, fumé e rosado). Seus grãos têm granulometria uniforme e são arredondados, o que indica que passaram por longo transporte e suas áreas fontes estão distantes. Em lupa binocular foram identificados oólitos de óxido-hidróxido de ferro, feldspato, biotita, minerais opacos e fragmentos de rocha (arenitos e ígneas/metamórficas ácidas) e outros minerais transparentes (rutilo, zircão, turmalina entre outros), mas em concentração muito baixa. A fração fina contém, além de quartzo, caulinita, montmorillonita e illita+muscovita (Figura 2).

A quantificação da mineralogia, com base na difração de raios-x e na composição química, mostrou que o quartzo representa nos sedimentos do rio Madeira entre 70% e 76% (mais elevado para jusante), enquanto illita, montmorillonita e caulinita são mais abundantes nos tributários, somando entre 37% e 65% (Figura 2). Nos sedimentos dos tributários, o quartzo é muito baixo no Puruzinho (< 1%) e alcança no máximo (49%) no Marmelos. O Jamari diferencia-se dos demais por conter 25% de muscovita (Figura 2).

### Composição Química

O  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  apresentaram os percentuais mais elevados nos sedimentos de fundo do rio Madeira e de seus principais tributários. São seguidos de perda ao fogo (PF) e  $\text{K}_2\text{O}$ . O  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  têm valores menores e  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{MnO}$  são os mais baixos (Tabela 3).

Há forte correlação negativa entre  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e PF (Figura 3). O  $\text{SiO}_2$  é mais elevado (> 52,69%) especialmente nos sedimentos dos rios Madeira e Machado (varia entre 88,75% e 92,45%) e, conseqüentemente é onde o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é mais baixo (< 4,98%) (Tabela 3 e Figura 3). Os conteúdos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  são baixos nos do rio Madeira (< 3,03%) e um pouco mais elevados nos dos tributários (até 7,01% no rio Jamari), e estão relacionados à hematita e/ou goethita que forma oólitos na fração areia. Dentre os álcalis o  $\text{K}_2\text{O}$  é o mais elevado, especialmente nos sedimentos dos rios Antônio, Sampaio, Manicoré e Puruzinho (entre 2,53% e 3,50%), e é seguido pelo  $\text{MgO}$  ( $\leq 1,42\%$ ) coincidentes com os maiores conteúdos de illita, muscovita e montmorillonita (Tabela 3 e Figura 2).  $\text{CaO}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  são baixos, mas o segundo é um pouco mais elevado que o primeiro e não diferenciam os sedimentos do rio Madeira em relação aos dos tributários (Tabela 3 e Figura 3). A PF é de no máximo 17,65% nos sedimentos do rio Aripuanã e reflete a maior proporção de material siltico-argiloso nos deste rio e separa quimicamente os dos tributários, exceto o Machado, dos do rio Madeira.

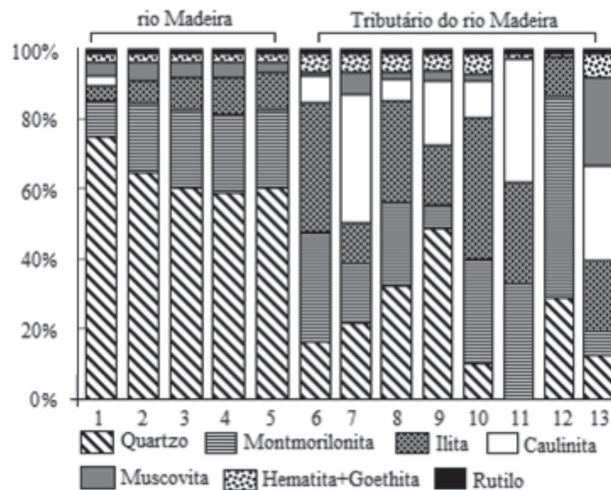


Figura 2 - Composição mineralógica dos sedimentos de fundo do rio Madeira e seus principais tributários (1 a 5 rio Madeira, 6 rio Sampaio, 7 rio Aripuanã, 8 rio Manicoré, 9 rio Marmelos, 10 rio Antônio, 11 rio Puruzinho, 12 rio Machado e 13 rio Jamari); Q – Quartzo, H+G – Hematita+Goethita, Mu – Muscovita, C – Caulinita, I – Illita, Mt- montmorillonita.

O  $\text{TiO}_2$  é baixo (< 1,30%) (Tabela 3) e está relacionado ao rutilo detectado por DRX. Este elemento apesar dos baixos percentuais, assim como  $\text{P}_2\text{O}_5$  (< 0,28%) e  $\text{MnO}$  (< 0,18%) mostra associação com os sedimentos dos tributários (Figura 3). O  $\text{MnO}$ , mais alto no rio Aripuanã (0,18%), coincide com a presença de ocorrências manganíferas nesse rio (Liberatore *et al.* 1972; Araújo *et al.* 1978; Silva 2009). Ao longo do Madeira há clara tendência de todos os principais óxidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e PF) diminuírem para jusante (Tabela 3).

O índice CIA (Nesbitt e Young 1984), calculado com base na relação entre  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  igual a 50, indica que os minerais primários portadores desses elementos estão preservados e, portanto, o intemperismo é fraco na fonte dos sedimentos. Esta relação indica que as rochas fontes dos sedimentos do rio Madeira com CIA entre 71,46 e 73,62 estão sob intemperismo um pouco menos intenso que as dos tributários com valores entre 78,70 e 92,49 (Tabela 3). O sedimento do rio Machado tem características próprias, possui CIA igual a 46,75 (Tabela 3). O grau de intemperismo do rio Madeira tem leve acréscimo de montante para jusante (Tabela 3).

### Elementos-traço

Dentre os elementos-traços analisados, Ba e Zr têm os teores mais elevados nos sedimentos, ambos representam 63% do conteúdo total desses elementos. O Ba alcança até 630  $\text{mg kg}^{-1}$ , exceto no sedimento do rio Jamari e a montante do rio Madeira onde Zr alcança 1230  $\text{mg kg}^{-1}$ , enquanto o Ba está abaixo de 305  $\text{mg kg}^{-1}$  (Tabela 3). Dentre os demais elementos

**Tabela 3** - Química dos sedimentos de fundo do rio Madeira e seus tributários, elementos maiores em % e traços em mg kg<sup>-1</sup> comparados com a crosta continental superior (CCS) e aos folhelhos australianos pós-arqueanos (PAAS) de Taylor e McLennan (1985).

Ptos	1	2	3	4	5	Md	6	7	8	9	10	11	12	13	Md	Md	Md
Local	MAD	MAD	MAD	MAD	MAD	MAD	SAM	ARI	MAN	MAR	ANT	PUR	MAC	JAM	TRIB	CCS	PAAS
SiO <sub>2</sub>	91,30	88,75	87,38	86,71	87,40	88,31	61,39	52,69	69,15	71,29	58,37	68,17	92,45	57,22	66,34	65,91	62,83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,60	4,98	5,54	5,91	5,32	5,07	17,67	20,93	13,66	12,51	19,57	13,93	1,15	18,30	14,72	15,24	18,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,73	2,77	2,80	2,84	3,03	2,83	5,99	5,29	6,33	4,92	7,00	5,88	2,21	7,01	5,58	4,56	6,54
MgO	0,15	0,26	0,32	0,37	0,38	0,30	1,31	0,35	1,01	0,53	1,42	1,15	0,54	0,41	0,84	2,24	2,26
CaO	0,11	0,22	0,26	0,26	0,28	0,23	0,36	0,16	0,27	0,07	0,35	0,44	0,90	0,20	0,34	4,26	1,33
Na <sub>2</sub> O	0,31	0,48	0,56	0,62	0,50	0,49	0,83	0,07	0,72	0,39	0,75	0,80	0,05	0,28	0,49	3,95	1,24
K <sub>2</sub> O	0,87	1,18	1,35	1,48	1,23	1,22	3,20	1,47	2,55	1,61	3,50	2,53	0,36	1,78	2,13	3,33	3,76
TiO <sub>2</sub>	0,23	0,35	0,41	0,35	0,50	0,37	0,94	0,92	0,86	0,88	0,94	0,91	0,12	1,30	0,86	0,62	1,04
MnO	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,15	0,18	0,15	0,11	0,16	0,14	0,08	0,16	0,14	-	0,12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	0,13	0,11	0,14	0,17	0,13	0,28	0,25	0,22	0,15	0,28	0,16	0,14	0,23	0,12	-	0,13
PF	0,63	0,95	1,21	1,34	1,26	1,07	7,94	17,65	5,16	7,57	7,75	5,83	0,98	12,94	8,22	-	6,01
CIA	73,62	72,59	71,85	71,46	72,58	72,42	80,10	92,49	79,42	85,80	80,97	78,70	46,75	89,01	79,15	-	-
Ba	175	275	296	323	264	267	588	435	427	297	630	479	584	402	480	550	650
Zr	104	146	179	132	305	173	200	416	366	529	173	353	89,7	1230	420	190	210
Rb	31	42	49	54	46	44	155	76	113	74	167	118	12	89	100	112	160
V	22	29	37	39	40	33	125	83	95	82	143	103	17	74	90	107	150
Sr	32	48	60	63	59	53	103	37	80	56	106	93	38	53	71	350	200
Zn	19,3	24,3	31	40	33	29,4	75	59	70	51	83	82	20,3	57	62,1	71	85
Y	8,8	12,7	13,8	13,8	15,4	12,9	34	40	34	29,4	32	36	5,4	59	34	22,3	27,6
Cu	12,3	7,9	16,3	22,4	12,2	14,2	20,3	8,1	22,3	29,1	23,6	37	23,8	9,5	21,7	25,3	50
Nb	7,7	10,6	12,0	10,4	13,1	10,8	21,5	27,8	19,7	23,2	21,4	20,7	3,2	42,3	22,5	12,2	19,1
Ga	5,1	6,5	7,3	8,4	6,9	6,8	22,6	25,1	17,9	16,4	24,8	18,5	2,3	28,3	19,5	17,0	20,0
Pb	4,5	5,3	6,5	7,9	6,5	6,1	14,5	22,7	16,6	15,8	19	15	2,4	20,7	15,8	17,3	20,4
Co	4,7	6,6	7,9	9,1	8,4	7,3	15,6	19,9	15,6	8,7	16,6	15,7	2,7	11,5	13,1	17,2	23,5
Th	3,1	3,9	4,9	4,7	5,6	4,4	13,5	20,4	12,8	14,8	16,1	13	1,8	26	14,8	10,7	14,6
Hf	2,4	3,9	4,5	3,5	7,3	4,3	5,4	11,1	9,2	13,0	4,5	9,5	2,4	33,2	11,2	5,8	5,4
Sc	2,2	3,4	4,2	4,6	4,7	3,4	16,3	14,9	13,6	9,7	18,4	13,5	1,6	14	12,3	13,6	16,8
As	4,2	5,3	4,8	6,0	4,2	4,9	10,1	0,9	8,3	4,2	11,1	9,4	0,5	3,4	5,9	1,5	-
Cs	1,1	1,5	1,8	2,1	1,9	1,7	10,5	5,1	7,7	5,8	12,9	7,7	0,3	4,5	6,8	4,6	15,0
Au	2,5	4,1	1,8	1,7	1,5	2,3	3,5	4,5	2,4	3,2	1,9	2,4	2,0	3,5	2,8	-	-
U	0,9	1,2	1,3	1,4	1,5	1,3	3,2	5,1	3,3	3,9	3,5	3,5	3,8	6,8	4,1	2,8	3,1
W	0,8	0,8	1,0	1,6	1,0	1,0	2,9	3,2	2,4	2,5	3,2	2,7	0,5	3,2	2,6	-	2,7
Ta	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	1,4	2	1,3	1,8	1,5	1,5	0,2	2,8	1,6	-	-
Al/Pb	4234	4972	4510	3959	4331	4401	6649	4879	4355	4190	5451	4915	2536	4678	4682	4000	-
Zr/Co	22,0	22,2	22,6	14,5	36,3	23,9	36,3	12,8	20,9	23,5	66,1	10,8	22,5	33,2	28,3	11,1	9,1
La/Th	3,7	5,0	4,4	3,9	4,2	4,4	4,2	2,8	2,5	2,6	2,4	2,5	2,9	2,9	2,8	1,7	1,6
Th/Yb	3,4	3,3	3,5	3,5	3,6	3,5	3,6	3,9	4,3	3,6	4,3	4,9	3,4	3,2	3,9	-	0,6
Th/U	3,4	3,3	3,8	3,4	3,7	3,5	3,7	4,2	4,0	3,9	3,8	4,6	3,7	0,5	3,6	0,6	0,6
Th/Co	0,7	0,6	0,6	0,5	0,7	0,6	0,7	0,9	1,0	0,8	1,9	1,0	0,8	0,7	1,0	0,6	0,7
Th/Pb	0,7	0,7	0,8	0,6	0,9	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	2,8	2,6
La/Co	2,4	2,9	2,7	2,0	2,8	2,6	2,8	2,4	2,6	2,1	4,4	2,5	2,4	1,9	2,6	4,8	5,2
Nd/Pb	2,6	3,8	3,5	2,4	3,8	3,2	2,6	1,9	2,0	2,0	2,1	2,4	2,2	2,8	2,2	1,3	1,6
<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	19,7	19,8	16,0	18,5	18,7	18,5	19,6	20,0	18,4	19,0	18,4	19,1	19,0	21,6	19,4	19,2	-
<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	16,1	15,2	13,0	15,7	15,5	15,1	15,3	18,2	16,7	15,2	15,3	15,1	17,5	18,0	16,4	15,7	-
<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	43,6	40,2	38,5	38,7	39,2	40,1	40,5	46,7	41,2	37,2	37,1	41,7	43,3	42,3	41,3	39,5	-

Md: média; MAD: rio Madeira; SAM: rio Sampaio; ARI: rio Aripuanã; MAN: rio Manicoré; MAR: rio Marmelos; ANT: rio Antônio; PUR: rio Puruzinho; MAC: rio Machado; JAM: rio Jamari; TRI: Tributários; Be, Ni, Sn, Ag, Bi, Cd, Hg, Mo, Sb, Se, Tl < 0,01 mg kg<sup>-1</sup>; - valor não disponível na literatura.

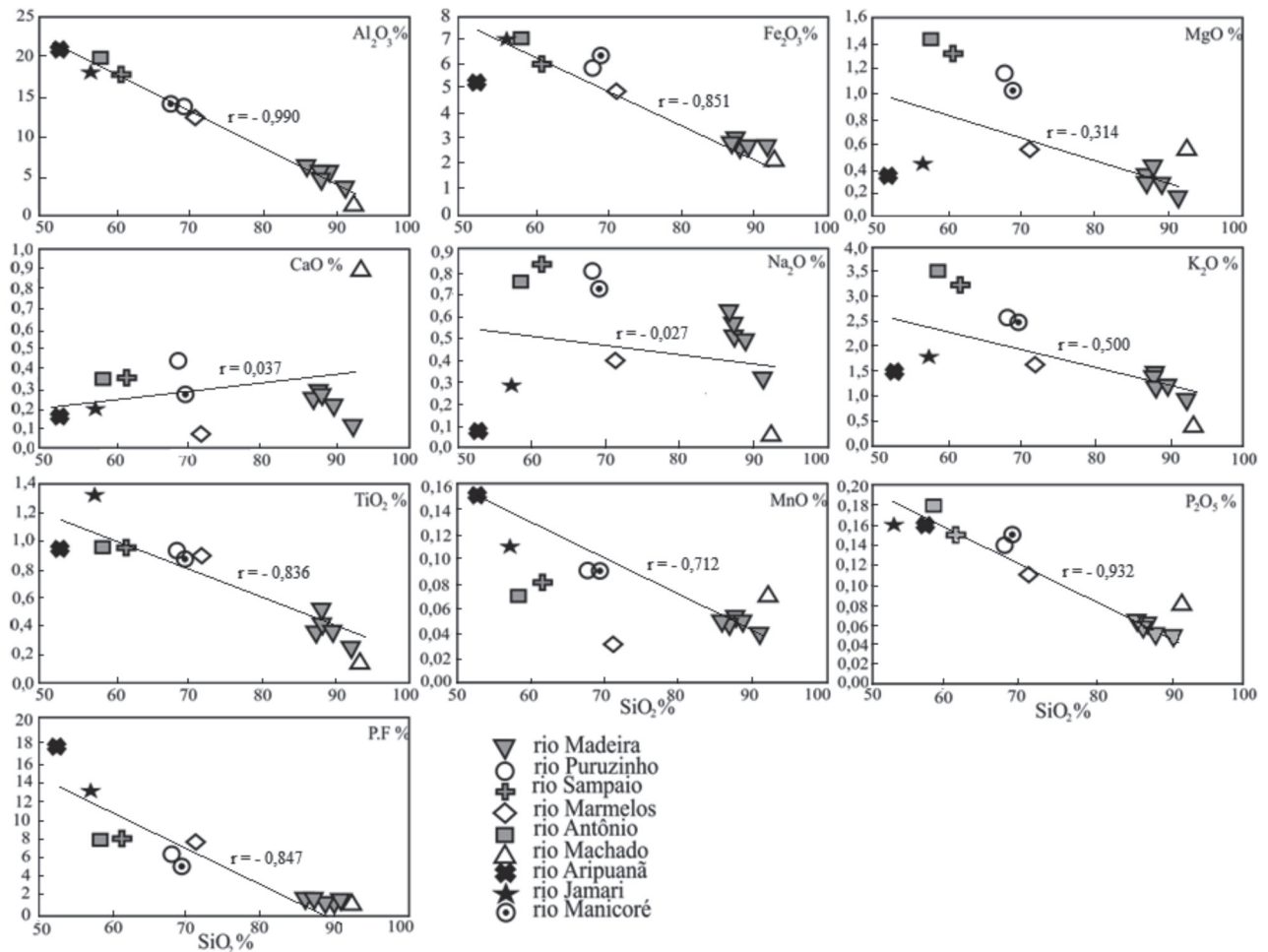


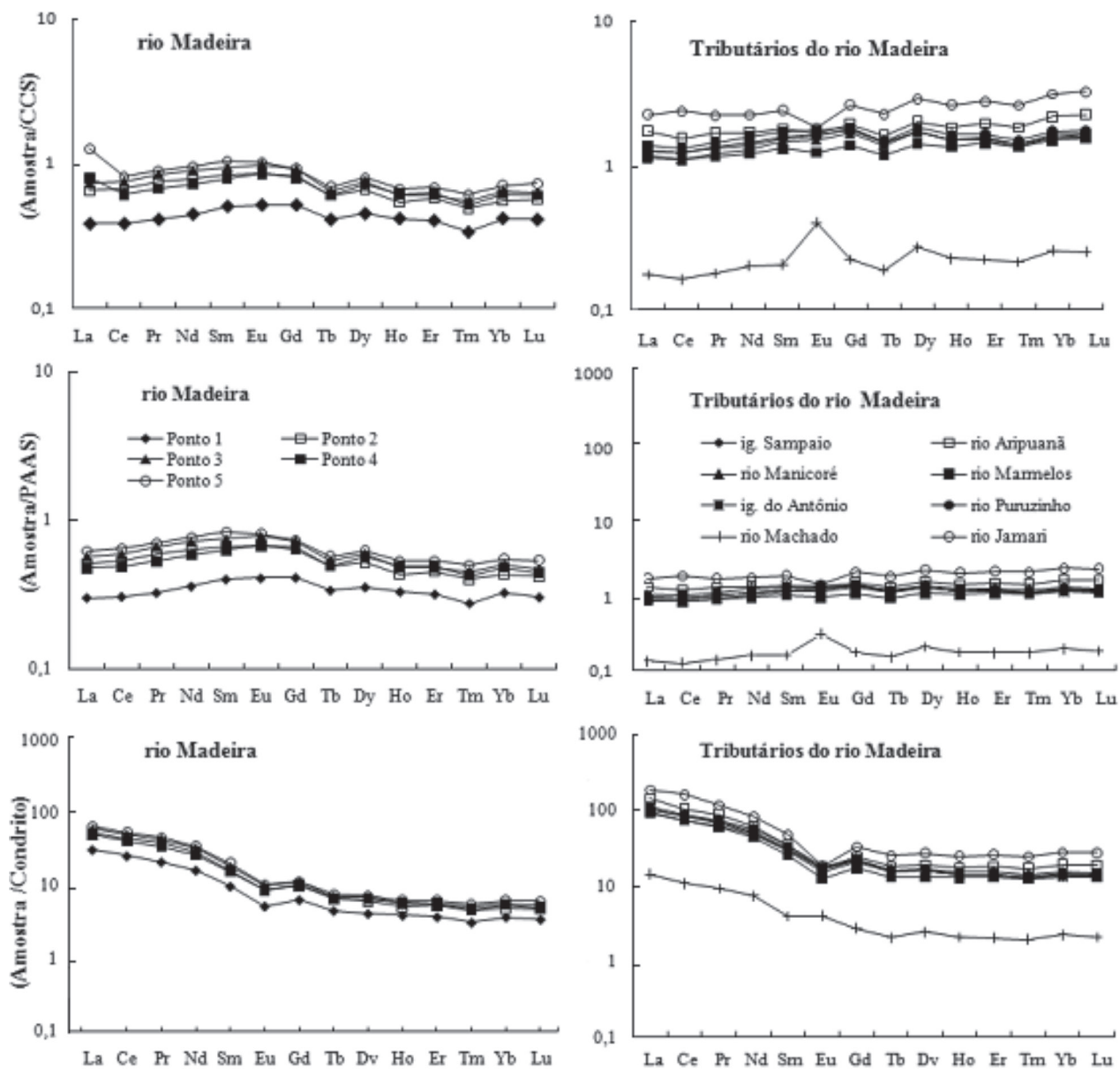
Figura 3 - Variações dos elementos versus SiO<sub>2</sub> dos sedimentos de fundo do rio Madeira e de seus tributários.

Rb, V, Sr, Zn e Y variaram de 11,6 a 167 mg kg<sup>-1</sup>; Cu, Nb, Ga, Pb, Co, Th, Hf, Sc, As, Cs, Au, U, W e Ta entre 0,2 mg kg<sup>-1</sup> e 42,3 mg kg<sup>-1</sup>; Be, Ni, Sn, Ag, Bi, Cd, Hg, Mo, Sb, Se, Tl estão na maior parte abaixo do limite de detecção (< 0,01 mg kg<sup>-1</sup>). Todos esses elementos, assim como as razões Th/U, Th/Co, Th/Pb, Th/Yb, Al/Pb, Zr/Co estão mais concentrados nos sedimentos dos tributários, exceto no do Machado, do que nos do rio Madeira (Tabela 3). Ao longo do Madeira, quase todos os elementos têm conteúdos menores nos sedimentos para jusante.

Após normalizar os elementos-traço em relação à crosta continental superior (CCS) e aos folhelhos australianos pós-arqueanos (PAAS), que também representam a composição média da crosta continental superior (Taylor e McLennan 1985), verifica-se que os sedimentos do rio Madeira são um pouco mais homogêneos e, em geral, empobrecidos em relação aos dos tributários, exceto em As, Au, W e Ta (Figura 4). Em relação à CCS, o Au mostra anomalia positiva (razão < 1)

no Madeira o que reflete a mineralização nesse elemento nos sedimentos do rio; e Ni e em parte Cu e Co mostram anomalia negativa nos tributários. Há enriquecimento mais acentuado de Zr, Hf, As, W e Ta, especialmente no sedimento do rio Jamari, e empobrecimento dos demais, com destaque para o Sr. O Sc está mais empobrecido no sedimento do Madeira que nos dos tributários. O do rio Jamari é o que apresenta, em geral, menor empobrecimento em elementos-traços e o do Machado a maior (Figura 4). Em relação aos PAAS, os sedimentos do rio Madeira também se diferenciam em relação aos tributários, têm padrão geral mais empobrecido, especialmente para jusante.

Dos ETR determinados, La, Ce e Nd apresentaram as concentrações mais elevadas (até 152 mg kg<sup>-1</sup>) (Tabela 4) e representam, aproximadamente, 79% do total destes elementos nos sedimentos, seguidos de Pr e Sm (até 15,7 mg kg<sup>-1</sup>); e Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu têm os teores mais baixos (até 10,8 mg kg<sup>-1</sup>). Ao longo do rio Madeira,



**Figura 4** - Fracionamento dos elementos-traços em relação à CCS e ao PAAS de Taylor e McLennan (1985); aos condritos de Haskin *et al.* (1968) do rio Madeira e seus principais tributários. Au, As e Ta não foram normalizados pelos PAAS por não terem valor de referência.

todos decrescem nos sedimentos de montante ( $\Sigma$  122 mg kg<sup>-1</sup>) para jusante ( $\Sigma$  59,1 mg kg<sup>-1</sup>). Dentre os tributários, o sedimento do rio Jamari ( $\Sigma$  344 mg kg<sup>-1</sup>) é o que contém o valor mais alto, enquanto o do Machado ( $\Sigma$  26,5 mg kg<sup>-1</sup>) o mais baixo (Tabela 4).

Os ETR normalizados pela CCS e aos PAAS de Taylor e McLennan (1985) resultaram em curvas horizontalizadas, enriquecimento (razão <1) nos sedimentos dos tributários e empobrecimento nos do Madeira, exceto nos do rio Machado (Figura 4). O sedimento do rio Machado também

se diferencia pela anomalia positiva de Eu ( $Eu/Eu^* = 1,2$  e  $1,9$  respectivamente – Tabela 4).

Em relação aos condritos (Haskin *et al.* 1968), os sedimentos estão enriquecidos, têm curvas com discreta concavidade para cima, pequena anomalia negativa em Eu ( $Eu/Eu^* = 0,7$  e  $1,2$  para os sedimentos do Madeira e tributários, respectivamente) e evidente enriquecimento de leves em relação aos pesados ( $(La/Yb)_N =$  entre 7,9 e 9,5 para os sedimentos do rio Madeira e 6,2 e 7,5 para os tributários) (Figura 4). O empobrecimento e, conseqüentemente, o



**Tabela 4** - Elementos terras raras (mg kg<sup>-1</sup>) e razões de elementos dos sedimentos de fundo do rio Madeira e seus tributários, comparados com a CCS e PAAS de Taylor e McLennan (1985).

Ptos	1	2	3	4	5	Md	6	7	8	9	10	11	12	13	Md	Md	Md
Local	MAD	MAD	MAD	MAD	MAD	MAD	SAM	ARI	MAN	MAR	ANT	PUR	MAC	JAM	TRIB	CCS	PAAS
La	11,4	19,4	21,6	18,1	23,6	18,8	37,5	51,6	33,4	34,8	40,7	37,2	5,2	67,4	38,5	30	38,2
Ce	24,4	42,6	47,2	38,7	51,5	40,9	77,8	98,3	70,1	69,5	83,3	77,9	10,3	152	79,8	64	79,6
Pr	2,9	5,3	5,9	4,7	6,3	5,0	9,5	11,9	8,5	8,2	10,1	9,3	1,3	15,7	9,3	7,1	8,8
Nd	11,5	20,4	22,9	18,6	24,4	19,6	37,0	43,6	33,4	31,4	40,8	35,9	5,2	58,0	35,7	26	33,9
Sm	2,3	3,7	4,2	3,5	4,7	3,7	7,1	8,0	6,6	5,9	7,7	6,9	0,9	10,8	6,7	4,5	5,5
Eu	0,5	0,8	0,9	0,7	0,9	0,7	1,4	1,5	1,3	1,1	1,5	1,4	0,4	1,6	1,3	0,8	1,0
Gd	1,9	3,1	3,4	3,0	3,5	3,0	6,6	7,3	6,3	5,2	6,9	6,7	0,8	10,0	6,2	3,8	4,6
Tb	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,9	1,0	0,9	0,8	0,9	0,9	0,1	1,5	0,9	0,6	0,7
Dy	1,6	2,3	2,6	2,5	2,8	2,3	6,0	7,1	6,0	4,9	6,0	6,3	0,9	10,1	5,9	3,5	4,6
Ho	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	1,2	1,5	1,2	1,1	1,2	1,3	0,2	2,1	1,2	0,8	0,9
Er	0,9	1,3	1,4	1,4	1,6	1,3	3,6	4,5	3,5	3,3	3,5	3,8	0,5	6,4	3,6	2,3	2,8
Tm	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,1	0,9	0,5	0,3	0,4
Yb	0,9	1,2	1,4	1,3	1,5	1,3	3,4	4,7	3,6	3,4	3,3	3,8	0,6	6,8	3,7	2,2	2,8
Lu	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6	0,1	1,0	0,6	0,3	0,4
ΣETR	59,1	101	113	94	122	98	193	242	176	170	207	193	26,5	344	194	146	183
Eu/Eu*a	0,003	0,007	0,006	0,007	0,006	0,006	0,006	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,026	0,007	-	-
Eu/Eu*b	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,9	0,7	1,0	-	-
Eu/Eu*c	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,2	0,5	0,7	-	-
(La/Yb)Na	7,9	9,3	9,2	8,2	9,5	8,9	7,0	7,3	6,3	7,2	7,5	6,6	6,2	7,5	7,2	-	-
(La/Yb)N b	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	-	-

Md: média; MAD: rio Madeira; SAM: rio Sampaio; ARI: rio Aripuanã; MAN: rio Manicoré; MAR: rio Marmelos; ANT: rio Antônio; PUR: rio Puruzinho; MAC: rio Machado; JAM: rio Jamari; TRI: Tributários; Eu/Eu\*a: normalizados em relação à crosta continental superior; Eu/Eu\*b: normalizados em relação ao PAAS (folhelhos australianos pós-arqueanos); Eu/Eu\*c: normalização pelos condritos de Haskin et al. (1968); (La/Yb)Na: normalizados em relação aos condritos; (La/Yb)N b: normalizados em relação aos PAAS; - valor não disponível na literatura.

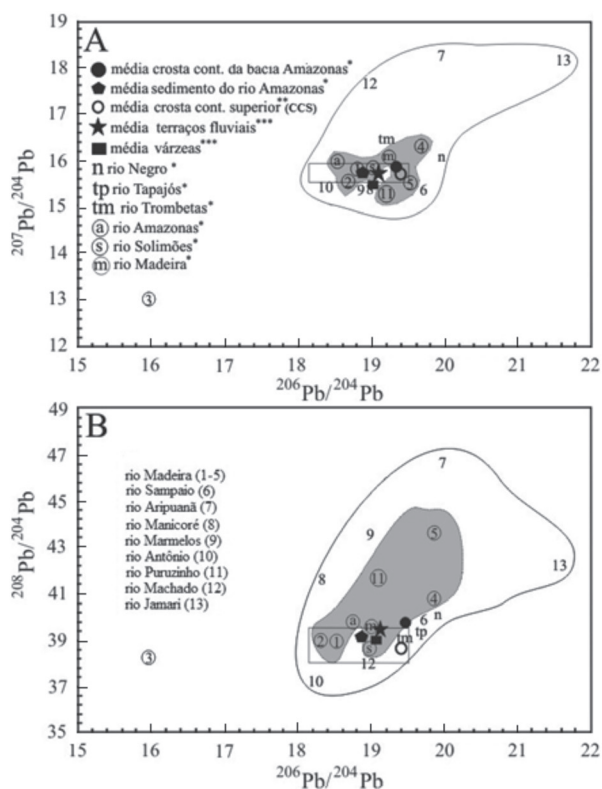
fracionamento, são maiores no sedimento mais a jusante do rio Madeira.

### Isótopos de Pb

As razões isotópicas de Pb nos sedimentos de fundo do rio Madeira e seus tributários variaram de 18,4 a 21,6 para <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb; 13,0 a 18,2 para <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb e 37,1 a 46,7 para <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb (Tabela 4). Para testar se as razões isotópicas de Pb são típicas de ambiente natural, foram utilizadas as razões Nd/Pb e Al/Pb (Millot *et al.* 2004). Este teste se faz necessário já que há facilidade do Pb ser adicionado ao meio ambiente, especialmente por meio de combustíveis, o que acarretaria razões de Pb isotópico menores que as proveniente das rochas (Farmer *et al.* 1996; Bindler *et al.* 2001). Exceto os sedimentos do rio Machado cujas razões Nd/Pb e Al/Pb estão abaixo de 1,2 e 3000, respectivamente, há indicativo que o ambiente natural está preservado no restante da porção estudada da bacia do rio Madeira. Portanto, as razões de Pb isotópico estão relacionadas às rochas fontes dos sedimentos. Apesar do indício de contaminação nos sedimentos do rio Machado, suas demais características granulométricas, mineralógicas e químicas sugerem um ambiente particular que pode estar relacionado à classificação hidráulica que levou à concentração de quartzo e não necessariamente contaminação.

Os sedimentos dos tributários têm maiores variações isotópicas, enquanto os do Madeira são mais homogêneos com superposição dos campos dos sedimentos provenientes de cada um destes grupos (Figura 5). Os sedimentos dos rios Aripuanã, Machado e Jamari são os mais radiogênicos, enquanto os do Madeira (amostras 1, 2, 4 e 5) e os dos demais tributários são isotopicamente mais semelhantes, especialmente em <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb. Para jusante os sedimentos do rio Madeira têm tendência a serem menos radiogênicos para <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb e <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb apesar da amostra 3, a jusante da confluência com o Machado é a menos radiogênica de todas as amostras estudadas (Figura 5).

Os sedimentos à jusante do Madeira (amostras 1 e 2) e os dos rios Sampaio, Antônio e Machado tem semelhança isotópica com os sedimentos em suspensão do rio Amazonas de Allègre *et al.* (1996); os sedimentos dos terraços e planícies do Solimões de Horbe e Trindade (2009) são compatíveis com a média da CCS de Taylor e McLennan (1985) e com a crosta continental da bacia Amazônica (Allègre *et al.* 1996), mas extrapolam o campo isotópico da maioria dos grandes rios do mundo (Millot *et al.* 2004). Entre os tributários, o sedimento do rio Sampaio é o que mais se assemelha com os dos rios Negro, Tapajós e Trombetas de Allègre *et al.* (1996) (Figura 5).



**Figura 5** - Diagramas de correlações:  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  nos sedimentos de fundo do rio Madeira e seus principais tributários; \*Allègre *et al.* (1996); \*\*Taylor e McLennan (1985); \*\*\* Horbe e Trindade (2009), número e letras dentro do círculo representam os sedimentos de rios de água branca e os demais rios de água preta. O retângulo representa o campo de variação da composição isotópica do Pb de sedimentos de rio segundo Millot *et al.* (2004), média da crosta continental superior (CCS) de Taylor e McLennan (1985).

### Delineamento Estatístico

A estatística multivariada por componentes principais (CP) indicou, com base no primeiro componente principal, que  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , PF, Zr, Rb, V, Zn, Y, Nb, Ga, Pb, Co, Th, Hf, Sc Cs, U, W, Ta e ETR com cargas mais elevadas ( $\geq 0,6$ ) são os mais significativos para caracterizar os sedimentos estudados (Tabela 5). Com base nessas variáveis, foram obtidas as cargas dos dois primeiros componentes principais das amostras que sintetizam a diferenciação dos sedimentos da bacia do rio Madeira em dois grupos (Figura 6): os rios Madeira (1 a 5) e Machado (12) são quimicamente distintos dos demais afluentes.

Com base nos estudos realizados, há clara diferença na granulometria, mineralogia e química entre os sedimentos de fundo do rio Madeira, entre Porto Velho e sua foz no Amazonas, e seus tributários. Enquanto nos do rio Madeira há predomínio de areia média e fina, que se reflete na maior

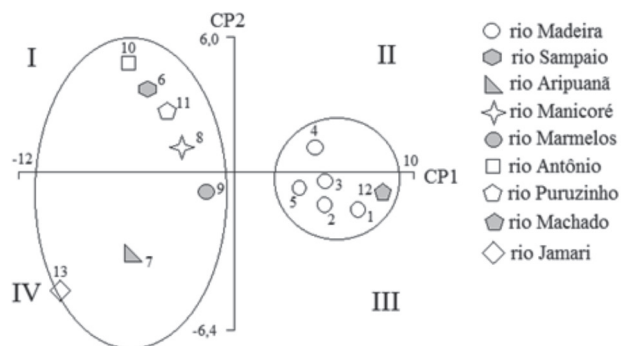
quantidade de quartzo, na maioria dos tributários (exceto Aripuanã, Manicoré e Machado) há mais silte + argila e, conseqüentemente, mais argilominerais, especialmente caulinita. Este fato é atribuído à classificação hidráulica exercida pelas suas águas que carregam o fino em suspensão e o depositam na planície de inundação do rio Madeira. Enquanto isso, o material mais pesado, transportado ao longo do leito, promove o arredondamento dos grãos de quartzo que se acumulam no fundo do rio.

O baixo fracionamento químico dos sedimentos demonstra a semelhança química destes com a crosta continental superior, enquanto as razões Th/Co, Th/Pb, Th/Yb, Al/Pb, Zr/Co, geralmente mais baixas nos do rio Madeira, são indicativas de que há pelo menos duas fontes distintas nesse ambiente: uma fonte de rochas ígneas ácidas para os tributários, típicas do Cratón Brasileiro (Grupo Colider, Suite Intrusiva São Romão, Complexo Jamari); e uma mais máfica para o rio Madeira. Também é possível diferenciar ambientes geológicos distintos com base na razão Th/U, pois esta é mais elevada nas rochas mais antigas (Hemming e McLennan 2001). Nos sedimentos dos tributários essa razão varia entre 3,7 e 4,6 e, portanto, é indicativa de rochas fontes mais antigas e compatíveis com as do Cratón brasileiro, enquanto nos do rio Madeira, entre 3,3 e 3,8, estão relacionadas às rochas cretáceas mais jovens dos Andes. Contudo, o sedimento do rio Jamari, com razão 0,5, assim como suas características químicas distintas (teores mais elevados de  $\text{TiO}_2$ , Zr, Y, Nb, Ga, Hf, U, Ta, ETR e menor de Cu e La/Co - Tabelas 3 e 4) e o do rio Machado, com os mais baixos teores de elementos-traços e ETR, diferenciam-se quimicamente dos demais tributários como exemplificado pela

**Tabela 5** - Carga do primeiro componente principal da química dos sedimentos de fundo da bacia do Madeira.

Variáveis	CP1	Variáveis	CP1	Variáveis	CP1
$\text{SiO}_2$	0,97	Zn	-0,86	La	-0,96
$\text{Al}_2\text{O}_3$	-0,97	Y	-0,97	Ce	-0,94
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-0,96	Cu	-0,10	Pr	-0,96
MgO	-0,55	Nb	-0,93	Nd	-0,97
CaO	0,26	Ga	-0,99	Sm	-0,97
$\text{Na}_2\text{O}$	-0,23	Pb	-0,96	Eu	-0,98
$\text{K}_2\text{O}$	-0,72	Co	-0,84	Gd	-0,99
$\text{TiO}_2$	-0,99	Th	-0,97	Tb	-0,98
MnO	-0,93	Hf	-0,69	Dy	-0,98
$\text{P}_2\text{O}_5$	-0,82	Sc	-0,95	Ho	-0,98
PF	-0,86	As	-0,36	Er	-0,97
Ba	-0,48	Cs	-0,76	Tm	-0,95
Zr	-0,68	Au	-0,44	Yb	-0,95
Rb	-0,79	U	-0,79	Lu	-0,96
V	-0,84	W	-0,97	V. total	72%
Sr	-0,50	Ta	-0,93		

V. total – variância total



**Figura 6** - CP1 versus CP2 das amostras de sedimentos de fundo da bacia do Madeira.

figura 6. Por outro lado, as razões Th/Yb e La/Th (MacLennan et al, 1980) (Tabela 3) sugerem que o sedimento do Sampaio tende a uma fonte mais máfica semelhante à fonte dos sedimentos do Madeira. Essa fonte mais máfica pode estar relacionada ao fato de que o local onde foi coletada a amostra no rio Sampaio (6) ainda está na área de influência da várzea do Madeira, apesar de distar 65 km da confluência (Figura 1).

Essa diferenciação entre os sedimentos dos tributários se acentua quando considerada a razão isotópica do Pb, inclusive há diferença em relação aos grandes rios do mundo e o Amazonas, Negro, Tapajós e Trombetas (Millot *et al.* 2004). Isto pode estar relacionado ao fato de que nos grandes rios, como o Madeira, os sedimentos são resultantes de mistura de material, o que aparentemente tende a homogeneização química, mas mantém a assinatura química da bacia. Os sedimentos dos tributários do Madeira, por representarem bacias menores, refletem as diferentes assinaturas isotópicas das rochas que percolam e que são as fontes dos seus sedimentos de fundo. Os de maior porte (Machado, Aripuanã e Jamari) e que cortam extensa porção do Cráton Brasileiro (Figura 1) têm os sedimentos mais radiogênicos ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ) e, portanto, apresentam indicativo de rochas mais antigas, apesar da razão Th/U não corroborar com este fato no sedimento do rio Jamari. A homogeneidade química entre os sedimentos dos demais tributários (Sampaio, Manicoré, Marmelos, Antonio e Puruzino) deve-se, provavelmente, a maior parte das suas bacias estarem nas rochas cretáceo-cenozoicas das Formações Alter do Chão e Içá e nos sedimentos quaternários, todos resultantes de etapas subsequentes de retrabalhamento das rochas mais antigas (Figura 1).

## CONCLUSÕES

Com base no exposto, e apesar dos sedimentos de fundo estudados serem produtos do intenso intemperismo e erosão

das rochas em condições tropicais úmidas, foi possível reconstituir que: 1) rochas ígneas ácidas e máficas com idades distintas contribuíram como fonte de sedimentos da bacia do rio Madeira; 2) apesar dos tributários serem de porte bem menor que o rio Madeira, a contribuição dessas drenagens se faz notar no aumento da maturidade dos sedimentos para jusante; 3) há variação nos sedimentos de fundo do Madeira em função de aporte dos tributários; 4) o ambiente natural do rio Madeira ainda está preservado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pela bolsa de doutorado da primeira autora e de pesquisadora da segunda.

## BIBLIOGRAFIA CITADA

- Allègre, C.J.; Dupré, B.; Nègre, P.; Gaillardet, J. 1996. Sr-Nd-Pb isotopes systematics in Amazon and Congo river systems: Constrains about erosion processes. *Chemical Geology*, 131: 93-112.
- Araújo, H.J.T.; Rodarte, J.B.M.; Del'arco, J.O.; Santos, D.B. dos; Barros, A.M.; Tassinari, C.C.G.; Lima, M.I.C. de; Abreu, A.S.; Fernandes, C.A.C. 1978. Geologia. In: Brasil. DNPM. Projeto RADAMBRASIL. Folha SB.20-Purus. Rio de Janeiro, (Levantamento de Recursos Naturais), 561: 19-100.
- Benedetti, M. F. 2003. The Amazon river: Behavior of metals Fe, Al, Mn) and dissolved organic matter in the initial mixing at the Rio Negro/Solimoes confluence. *Chemistry Geological*, 197: 271-285.
- Bindler, R; Renberg, I; Anderson, N. J; Appleby, P.G; Emteryd, O; Boyle, J. 2001. Pb isotope ratios of lake sediments in West Greenland: inferences on pollution sources. *Atmospheric Environment*, 35: 4675-4685.
- Borges, J.B.; Huk, Y.; Moon, S.; Noh, H. 2008. Provenance and weathering control n river bed 308 sediments of the Eastern Tibetan Plateau ad the Russian Far East. *Chemical Geology*, 254: 52-72.
- CPRM. 2001. Serviço Geológico do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas. Boletim Técnico.
- CPRM. 2006. Mapa Geológico do Estado do Amazonas. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas. Sistemas de Informação Geográfica - SIG, Programa Geologia do Brasil. Escala 1: 1.000.000, do Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 1 CD-ROM. Programa Geologia do Brasil.
- Dosseto, A.; Bourdon, B.; Gaillardet, J.; Allègre, C.J.; Filizola, N. 2006. Time scale and conditions of weathering under tropical climate: study of the Amazon basin with U-series. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 70: 71-89.
- Dosseto, A.; Bourdon, B.; Gaillardet, L.; Bourgoïn, M.; Allegre, C. J. 2006. Weathering and transport of sediments in the Bolivian Andes: Time constraints from uranium series isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 248: 759-771.

- Elbaz-Poulichet, F.; Seyler, P.; Maurice-Bourgoin, L.; Guyot, J.L.; Dupré, C. 1999. Trace element geochemistry in the upper Amazon drainage basin (Bolivia). *Mineralogical Magazine*, 62: 418-423.
- Farmer, J. G.; Eades, L. J.; Mackenzie, A.B; Kirika, A; Bailey-Watts, T. E. 1996. Stable lead isotope record of lead pollution in Loch Lomond sediments since 1630 A.D. *Environmental Science Technology*, 30: 3080-3083.
- Fralick, P.W; Kronberg, B.I. 1997. Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock sources. *Sedimentary Geology*, 113: 111-124.
- Gaillardet, J.; Dupré, B.; Allègre, C.; Négrel, P. 1997. Chemical and Physical Denudation in the Amazon River Basin. *Chemical Geology*, 142: 141-173.
- Gibbs, R. J. 1967. Geochemistry of the Amazon river system, parte I. The factor that control the salinity and composition and contraction of the suspended solids. *Geological Society of America Bulletin*, 78: 1203 - 1232.
- Goldstein, S.J.; Jacobsen, S.B. 1988. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: Implications for crustal evolution. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 87: 249-265.
- Guyot, J.L.; Jouanneau, J.M.; Soares, L.; Boaventura, G.R. ; Maillet, N.; Lagane, C. 2007. Clay mineral composition of river sediments in the Amazon Basin. *Catena*, 71: 340-356.
- Haskin, L.A.; Haskin, M.A.; Frey, F.A.; Wildman, T.R. 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths, p. 889-911. In: L.H. Ahrens Origin and distribution of the elements, Oxford. Pergamon, 1:
- Hemming, S.R.; McLennan, S.M. 2001. Pb isotope compositions of modern deep sea turbidites. *Earth and Planetary Science Letters*, 184: 489-503.
- Horbe, A.M.C; Trindade, I.R. 2009. Química, isotópicos de Pb e proveniência de sedimentos da bacia do rio Solimões. *Revista Brasileira de Geociências*, 39: 635-646.
- Liberatore, G.; Alecrim, J.D.; Medeiros, J.B.; Malouf, R.F.; Pinheiro, S.S.; Achão, S.M.; Santos, J.O.S. 1972. Project Aripuanã - Sucunduri. Ministério de Minas e Energia - BRASIL. Contrato CPRM DNPM / Relatório inédito (in portuguese).
- Lyons, W.B.; Bird, D.A. 1995. Geochemistry of the Madeira River, Brazil: comparison of seasonal weathering reactions using a mass balance approach. *Journal of South American Earth Sciences*, 8: 97-101.
- Koppen, W. 1948. Climatology. A study of the Earth's climate. Mexico, 153-213 (in spanish, with abstract in english).
- MacLennan S.M., Nance W.B., Taylor S.R. 1980. Rare earth element-thorium correlations in sedimentary rocks and the composition of the continental crust. *Geochemistry and Cosmochemistry Acta*, 44:1833-1839.
- Martinelli, L.A.; Vitoria, R.L.; Damatte, J.L.I.; Richey, J.E.; Devol, A.H. 1993. Chemical and mineralogical composition of Amazon River floodplain sediments - Brazil. *Applied Geochemistry*, 8: 391-402.
- Millot, R.; Allègre, C.J.; Gaillardet, J.; Roy, S. 2004. Lead isotopic systematics of major river sediments: a new estimate of the Pb isotopic composition of the Upper Continental Crustal. *Chemical Geology*, 203: 75-90
- Mortatti, J.; Probst, J. L. 2003. Silicate rock weathering and atmospheric/soil CO<sub>2</sub> uptake in the Amazon Basin estimated from river water geochemistry: seasonal and spatial variations. *Chemical Geology*, Estados Unidos, 197: 177-196.
- Nesbitt, H.W.; Young, G.M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochemistry and Cosmochemistry Acta*, 48: 1523-1534.
- Seyler, P.; Boaventura, G.R. 2003. Distribution and partition of trace Metals in the Amazon Basin. *Hydrological Processes*, 17: 1345-1361.
- Seyler, P.; Guyot, L.; Bougoin, M.; Sondag, F.; Elbaz-Poulichet, F.; Etcheber, H. 2003. Origin f trace elements in the Bolivian Amazonian drainage basin. *Departament Geologie et Oceanographie*, France.
- Silva, P.M. 2009. *Geologia, Mineralogia e Geoquímica de Crosta Manganífera, Alto Tapajós Basin, Apuí - Amazonas*. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Amazonas. 80 pp.
- Taylor, S. R.; McLennan, S.M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 312 pp.
- Tardy, Y.; Bustillo, V.; Roquin, C.; Mortatti, J.; Victoria, R. 2005. The Amazon Biogeochemistry applied to river basin management. Part I. Hidroclimatology, hidrograph separation, mass transfer balances, stable isotopes, and modelling. *Applied Geochemistry*, 20: 1746-1829.
- Terezo, E. F; Góes Filho, L, Ferreira, A; Veloso, H. P; Fonseca, W. N; Silva, SB 1975. Folha Vegetação SB-21 - Tapajós. in: Brazil, DNPM. RADAMBRASIL. Cap IV - Vegetation. Rio de Janeiro.

Recebido em 04/07/2010  
Aceito em 24/01/2011