

Geoquímica de rios de água preta do sudeste do Amazonas: Origem, fluxo dos elementos e consumo de CO₂

Anderson da Silva LAGES¹, Adriana Maria Coimbra HORBE² e Jean-Sébastien MOQUET³

RESUMO

Neste trabalho foi examinada a composição química das águas dos afluentes da margem direita do rio Madeira que drenam as rochas do Escudo Brasileiro. O estudo foi realizado no município de Apuí no sudeste do estado do Amazonas, Brasil. Foram analisados pH, condutividade, as concentrações de SiO₂ e de íons dissolvidos (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻ e SO₄²⁻) em quatro épocas do ano segundo o índice pluviométrico: chuvosa, transição para a estiagem, estiagem e transição para a chuvosa. As águas são diluídas, mais concentradas em HCO₃⁻ e SiO₂ e representam o típico ambiente de intensa lixiviação que afeta as rochas na Amazônia. Apesar da química das águas terem influência da sazonalidade, foram identificadas variações em função da litologia. As taxas de exportação de cátions e de erosão química das rochas são baixas e refletem a estabilidade tectônica da região e o manto intempérico que dificulta a interação da água com o substrato rochoso.

PALAVRAS CHAVE: variação sazonal, exportação de cátions, erosão química.

Geochemistry of black water rivers from the southeastern of the Amazonas State: source, element fluxes and consumption of CO₂

ABSTRACT

This work examined the chemical composition of waters from tributaries of the right bank of the Madeira River which drain silicaterocks of the Brazilian Craton. The study was conducted at the municipality of Apuí, in the southeastern of the Amazonas State, Brazil. There were analyzed pH, conductivity, SiO₂ and dissolved ions (Na⁺, K⁺, Mg²⁺ e Ca²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻ and SO₄²⁻) in the four pluviometric seasons of the Amazon region: rainy, transition to the dry, dry and transition to the rainy. The waters are diluted, have high HCO₃⁻ and SiO₂ concentration and represent the typical environment of intense leaching that affects the rocks in the Amazon. Although the chemical composition reveals seasonal influences, it was identified variation due to lithological composition. The rate of exportation of cations and the chemical erosion are low in consequence of the tectonic stability of the region and the weathering mantle, which hinders the interaction of water with the bedrock.

KEYWORDS: seasonal variability, cation exportation rate, chemical erosion.

¹ Programa de pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, as.lages@hotmail.com;

² Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, ahorbe@ufam.edu.br; Av. Rodrigo Otávio Jordão Ramos 3000, Manaus, 69050-290, Amazonas, Brasil;

³ Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, js.moquet@gmail.com, Rua do Lago, 562 - Cidade Universitária, São Paulo, 05508-080.

INTRODUÇÃO

As rochas são as principais fontes de elementos químicos para as águas em ambientes naturais, apesar de aerossóis marinhos, poeiras, vegetação e a ação antrópica terem forte influência (Maybeck 2003). Dentre as rochas, os carbonatos e os evaporitos, por serem facilmente lixiviados, são as que mais rapidamente liberam elementos químicos para as águas (Drever 1997). Por exemplo, a alcalinidade das águas (HCO₃⁻) está relacionada ao CO₂ liberado pelos carbonatos. Quando ausentes, a alcalinidade é menor, pois é derivada unicamente do CO₂ da atmosfera que é incorporado ao solo pela matéria orgânica (Picouet *et al.* 2002) e liberado para as águas quando estas o percolam. Os carbonatos, geralmente de Ca e Mg ((Ca,Mg)CO₃), são por conseguinte a principal fonte natural desses elementos e a gipsita (CaSO₄·2H₂O) presente nos evaporitos, de Ca e SO₄. A relação desses elementos com as rochas é determinada com base na correlação positiva entre Ca+Mg versus HCO₃ quando relacionados aos carbonatos e entre Ca e SO₄ quando relacionados a gipsita. Razões elevadas de Mg/Ca indicam intemperismo de dolomita, enquanto que de Ca/Mg indicam intemperismo de calcita. Essas relações são exemplificadas pela reação de dissolução: CaMg(CO₃)₂ + CaSO₄·2H₂O + CO₂ = ↔ Ca²⁺ + Mg²⁺ + 2HCO₃⁻ + SO₄²⁻ + H₂O. Outra fonte de SO₄ são os sulfetos segundo a reação: 2FeS₂ + 2H₂O + 7O₂ ↔ 2Fe³⁺ + 2SO₄²⁻ + 2H₂SO₄ que na presença de água gera ambiente ácido (Drever 1997, Picouet *et al.* 2002, Smolders *et al.* 2004).

O conteúdo de Cl⁻ nas águas está relacionado, principalmente aos evaporitos, pois nos demais tipos de rochas sua concentração é extremamente baixa (Drever 1997). Como a fonte dos evaporitos é a água do mar, a razão Na/Cl na água próxima a 1 representa influência desse tipo de rocha (Berner e Berner 1987). Contudo, Na e Cl também podem ser relacionados à precipitação, neste caso o aporte pode ser medido analisando água da chuva e corrigindo em relação a água do mar (Stallard e Edmond 1983 e Gaillardet *et al.* 1997). Outra característica que permite inferir a rocha fonte é a carga positiva, águas originadas do intemperismo de silicatos possuem Σ⁺ < 0,185 meq L⁻¹, enquanto as salinas > 24 meq L⁻¹ (Maybeck 2003). O longo intemperismo a que estão submetidas as rochas dos escudos gera caulinita e gibbsita e aumenta a concentração de SiO₂ nas águas, neste caso tende a ter Si:Σ⁺ < 4 e Si:(Na+K) < 3 (Edmond *et al.* 1995).

Em regiões pouco habitadas e ainda a salvo da contaminação é possível, por meio do estudo da química das águas, construir modelos geoquímicos sobre a interação entre litologia, clima, relevo e intemperismo e determinar o fluxo e a taxa de elementos liberados das rochas bem como o consumo de CO₂ (Stallard e Edmond 1987, Edmond *et al.* 1995, Gaillardet *et al.* 1997, entre outros). Alguns trabalhos, nessa linha de estudo, já foram realizados na Amazônia como os de Allègre *et al.*

(1996), Gaillardet *et al.* (1997), Mortatti e Probst (2003) entre outros. Com o objetivo de determinar as influências sazonais e do porte das drenagens, o fluxo dos elementos liberados, a taxa de erosão e o consumo de CO₂ durante o intemperismo de rochas do Escudo Brasileiro, foram selecionados seis rios e dois igarapés na região SE do Amazonas.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

Os rios selecionados neste estudo pertencem a duas bacias hidrográficas principais, as dos rios Sucunduri-Canumã a leste e Aripuanã a oeste (Figura 1). A primeira bacia tem aproximadamente 650 km de extensão norte-sul, as nascentes se encontram próximas ao limite com o Estado do Mato Grosso e deságua no baixo curso do rio Madeira, próximo à cidade de Nova Olinda. Seus principais afluentes são os rios Acari, com extensão aproximada de 240 km, Camaiú com 180 km, além do próprio Sucunduri, que se estende por mais de 150 km com inúmeras cachoeiras e nascentes próximas à divisa do Amazonas com o Mato Grosso. Esses três rios são cortados pela BR-230 e nos locais estudados, possuem larguras de aproximadamente 50 m, 30 m e 80 m, respectivamente. A bacia do rio Aripuanã, localiza-se a oeste da área, tem direção geral N-S, nascentes no Estado do Mato Grosso e Rondônia e deságua no rio Madeira à montante da cidade de Manicoré totalizando aproximadamente 750 km de extensão (Figura 1). No local amostrado o rio Aripuanã tem, aproximadamente 350 m de largura. Os rios Jatuarana, com 260 km de extensão e o Juma, com 240 km, são afluentes menores (Figura 1) e nos locais onde são cortados pela BR-230 possuem aproximadamente 30 m de largura. Os locais amostrados nos rios Aripuanã, Acari e Sucunduri estão nas proximidades das estações hidrográficas dos respectivos rios. Os dados de vazão e da área da bacia estão em www.ore-hybam.org.

Ambas as bacias drenam as rochas do Escudo Brasileiro e em seus baixos cursos, próximos a confluência com o rio Madeira, as rochas sedimentares da bacia do Amazonas (Formações Içá e Alter do Chão) (Figura 1). O Escudo Brasileiro no SE do Amazonas é constituído pelo Grupo Alto Tapajós e Grupo Colíder (Reis 2006) (Figura 1). O Grupo Alto Tapajós é formado por siltitos, arenitos, pelitos, brechas silicosas e, localmente, calcários cinza escuros no alto rio Sucunduri. O Grupo Colíder, composto por rochas vulcânicas ácidas, tem ocorrência restrita a porção SW da área e tem influência direta nos rios Aripuanã e Acari. Todas essas rochas foram lateritizadas e esculpidas pela drenagem desenvolvendo platôs e colinas com cota inferior a 300 m.

A região está totalmente sob a influência da floresta tropical. O clima é quente e úmido com estiagem pouco pronunciada. A temperatura anual média varia entre 25° e 27°

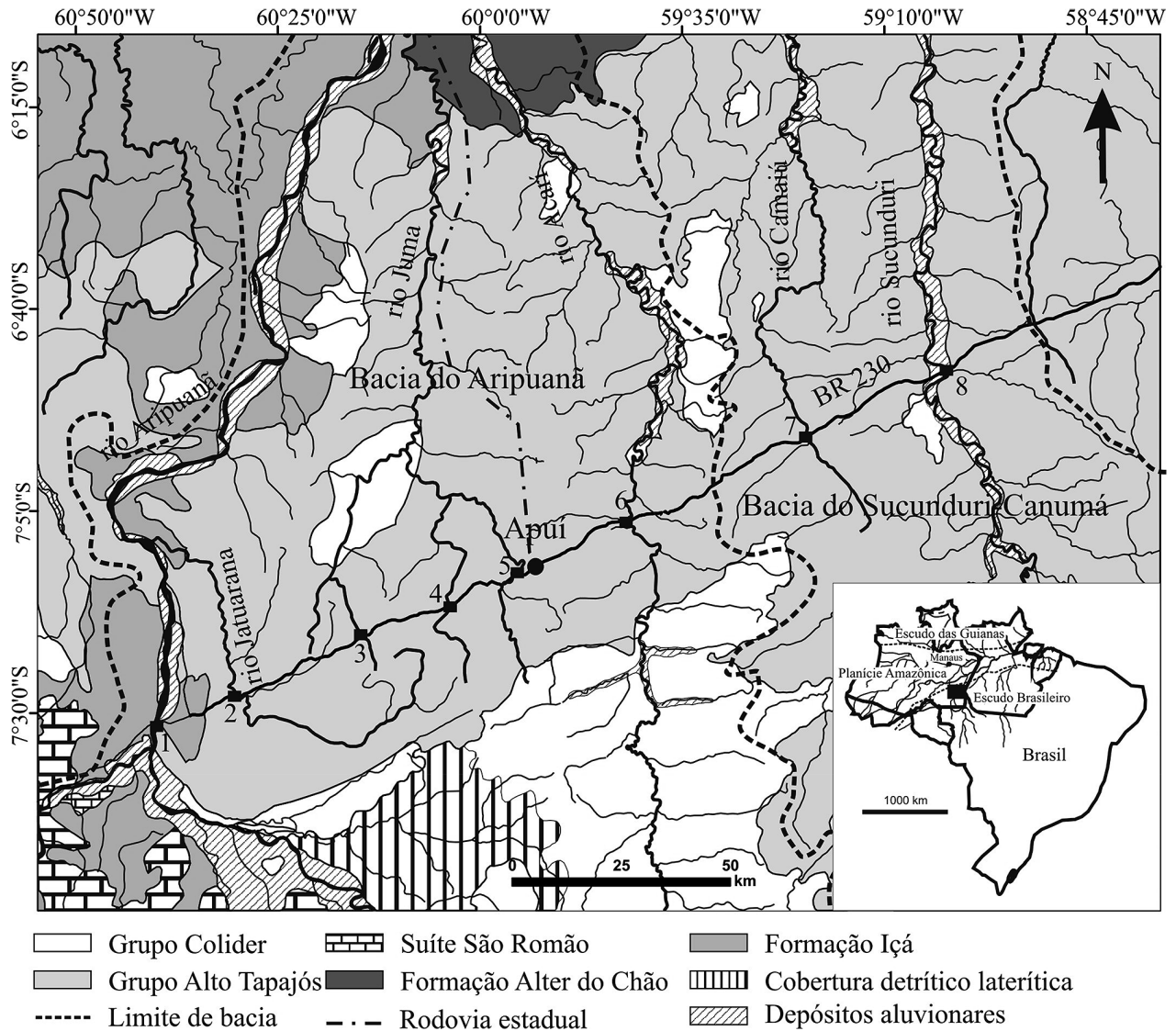


Figura 1 - Mapa de localização das drenagens analisadas e geologia da área (1-rio Aripuanã, 2- rio Jatuarana, 3- igarapé 1, 4- igarapé 2, 5- rio Juma, 6- rio Açu, 7- rio Camaiú e 8- rio Sucunduri). Em detalhe mapa do Brasil com o limite entre os macroambientes geológicos onde se insere a área estudada.

C. A umidade relativa do ar é de aproximadamente 85% e a precipitação chega até 2200 mm ano⁻¹. Segundo levantamento pluviométrico de dez anos (1998 e 2007) realizado pela Agência Nacional de Águas, o período chuvoso se estende de outubro a abril (máximo de 300 mm mês⁻¹), maio é a transição para a estiagem (155 mm mês⁻¹), o período mais seco está entre junho e agosto (até 72 mm mês⁻¹) e setembro caracteriza o período de transição para o chuvoso (até 160 mm mês⁻¹).

Coleta de material e análises químicas

As coletas de água dos rios foram mensais, realizadas entre abril de 2009 e janeiro de 2010. Foram selecionadas as drenagens de maior porte que cortam a rodovia BR 230 (Transamazônica) entre os rios Aripuanã e Sucunduri

(Figura 1) localizados nos km 540 e 750, respectivamente. Nesse trecho foram amostrados, além dos rios Aripuanã (1) e Sucunduri (8), o Jatuarana (2), Juma (5), Açu (6), Camaiú (7) e duas drenagens menores Ig1 (3) e Ig2 (4) afluentes dos rios Jatuarana e Juma, respectivamente (Figura 1).

Com base nos dados de pluviometria, as amostras mensais foram agrupadas em quatro períodos sazonais: chuvoso (média dos meses abril, outubro, novembro, dezembro e janeiro – não foram amostrados os meses de fevereiro e março), de transição para a estiagem (maio), estiagem (junho, julho, agosto) e de transição para o chuvoso (setembro).

As amostras foram coletadas no centro do rio a 20 cm de profundidade, com auxílio de uma canoa, nos rios Aripuanã

e Sucunduri, nos demais, onde há ponte, esta foi utilizada como apoio. Cada amostra foi coletada com uma seringa de 100 ml e filtrada em um millex de 0,45 µm de poro e acondicionada em frasco de polietileno, previamente colocado por 24 hs em solução de HNO₃ a 10% e lavados com água purificada por sistema Milli Q. Para evitar a ação bacteriana que modificasse a composição química da água foi adicionado, aproximadamente 0,02 g de timol (Santos 2009).

O pH foi medido com o auxílio de um pHmetro digital, previamente calibrado com soluções tampões de pH 7,0 e 4,0 respectivamente. A condutividade elétrica foi determinada com condutivímetro digital calibrado com solução 0,1 N de KCl, a 12,9 Ms cm⁻¹. A alcalinidade foi determinada por volumetria de neutralização, utilizando ácido sulfúrico na concentração de 0,02 N até pH 4,3 e expressa em miligramas de HCO₃⁻. A SiO₂ foi determinada por espectrofotometria e cátions (Na⁺, K⁺, Mg²⁺ e Ca²⁺) e ânions (Cl⁻, NO₃⁻ e SO₄²⁻) por cromatografia de íons (DIONEX ICS 900) no laboratório de Geoquímica da UFAM.

O total de sólidos dissolvidos (TDS) foi calculado a partir Na⁺+K⁺+Mg²⁺+Ca²⁺+Cl⁻+SO₄²⁻+HCO₃⁻+NO₃⁻+SiO₂ em µg L⁻¹ e a normalização do balanço das cargas inorgânicas (NBCI) segundo a equação $[(\Sigma\mu\text{eq}^+ \text{L}^{-1} - \Sigma\mu\text{eq}^- \text{L}^{-1}) / ((\Sigma\mu\text{eq}^+ \text{L}^{-1} + \Sigma\mu\text{eq}^- \text{L}^{-1})) / 2]$ onde $\Sigma(\mu\text{eq}^+ \text{L}^{-1}) = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ e $\Sigma(\mu\text{eq}^- \text{L}^{-1}) = \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$ em µg L⁻¹.

RESULTADOS

Parâmetros físicos e químicos

O pH e a condutividade mostram que as águas menos ácidas e mais condutivas estão na transição para o período chuvoso (5,3 a 7,2 e 18,0 a 33,5 µS cm⁻¹, respectivamente) (Tabela 1 e Figura 2), enquanto as mais ácidas estão no período chuvoso (4,0 a 4,9) e na transição para a estiagem (3,7 a 4,9).

As menos condutivas estão na transição para a estiagem (8,2 a 19,3 µS cm⁻¹) exceto o Ig1 cuja condutividade é mais alta nesse período (28,0 µS cm⁻¹).

A composição química e, conseqüentemente a contribuição de cada íon é variável entre os períodos analisados e entre as drenagens (Tabela 1, Figura 2). Contudo o HCO₃⁻ é o íon mais abundante na maioria das águas dos rios de Apuí (entre <200 e 14.887 µg L⁻¹) exceto nas do Aripuanã mais concentradas no período chuvoso e nas do Acari com pouca variação ao longo do período hidrológico. O SiO₂ é o componente mais abundante nos períodos chuvoso e transição para a estiagem (entre 2.422 e 5580 µg L⁻¹) quando o HCO₃⁻ está abaixo do limite de detecção, devido ao pH mais ácido das águas (Tabela 1 e Figura 1). Nota-se ainda que K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ e Cl⁻ tendem a maior concentração no período de transição para o chuvoso (exceto as águas do Jatuarana com Ca²⁺ excepcionalmente elevado na transição para a estiagem e as do Acari e Camaiú com mais K⁺ no período chuvoso). Os outros íons têm comportamento mais diferenciado e dentre eles o Na⁺ tende a ser mais concentrado na estiagem, especialmente nas águas do Aripuanã e Camaiú, e no chuvoso nas do Acari, Ig2 e Juma (Figura 2). O NO₃⁻ nas águas do Aripuanã, na transição para a estiagem (5426 µg L⁻¹), é quase o dobro da concentração em relação as demais drenagens. Também é elevado no período chuvoso nas águas do Camaiú e Ig2 (Tabela 1 e Figura 1). O conteúdo de SO₄²⁻ assemelha-se ao de K⁺, mas com dispersão mais acentuada na transição para o chuvoso e o Juma destaca-se por possuir a maior concentração (440 µg L⁻¹) na transição para a estiagem (Tabela 1 e Figura 2).

O predomínio de HCO₃⁻ e SiO₂ sobre os demais íons permite classificar as águas como sendo bicarbonatadas-silícicas, apesar do K⁺ e NO₃⁻ também serem abundantes no período chuvoso no Acari e Camaiú, o Ca²⁺ no Jatuarana na

Tabela 1 - Valores médios dos parâmetros analisados por período sazonal, ponderados pela pluviosidade (condutividade em µS cm⁻¹, TDS em mg L⁻¹, íons e SiO₂ em µg L⁻¹ e somatória de cátions (Σ⁺) e ânions (Σ⁻) em µeq L⁻¹).

	Aripuanã	Jatuarana	Ig 1	Ig. 2	Juma	Acari	Camaiú	Sucunduri	Média	
Chuvoso (abril, outubro, novembro, dezembro e janeiro)	pH	4,9	4,5	4,0	3,9	4,2	4,8	4,4	4,2	---
	CE	22,2	16,9	13,7	13,3	10,7	24,9	19,8	19,5	18,2
	Na ⁺	1.141,4	124,0	135,3	620,5	641,7	1.231,3	210,7	283,6	548,6
	K ⁺	1.635,9	716,3	727,5	911,6	1.437,0	2.286,4	2.574,9	1.259,1	1.443,6
	Ca ²⁺	1.042,3	801,1	245,9	369,3	719,6	762,7	207,3	1.054,5	650,4
	Mg ²⁺	465,5	328,6	163,4	98,1	248,7	336,1	200,2	564,4	300,6
	SiO ₂	5.001,4	2.918,1	2.421,6	2.488,6	2.874,1	5.274,3	2.970,5	3.482,7	3.428,9
	HCO ₃ ⁻	14.887,4	5.470,1	<200,0	<200,0	<200,0	11.968,6	8.927,2	<200,0	5.156,7
	Cl ⁻	330,8	274,1	264,3	291,2	330,7	298,2	305,5	253,6	293,5
	NO ₃ ⁻	427,1	407,1	480,4	2.059,1	973,6	498,4	2.365,5	1.380,0	1.073,9
	SO ₄ ²⁻	189,9	270,8	81,5	156,5	177,6	235,5	206,4	189,8	188,5
	TDS	25,1	11,3	4,5	7,0	7,4	22,9	18,0	8,5	13,1
	Σ ⁺	5.792,9	3.099,9	1.681,6	2.467,0	4.015,3	5.715,3	3.600,6	4.780,7	3.894,2
	Σ ⁻	16.025,0	6.692,9	907,5	2.663,3	1.659,5	13.236,2	12.011,1	2.013,3	6.901,1
NBCI	-0,23	-0,18	0,15	-0,02	0,21	-0,20	-0,27	0,20	-0,04	

Tabela 1 - Continuação

	Aripuanã	Jatuarana	Ig 1	Ig, 2	Juma	Acari	Camaiú	Sucundurí	Média	
Transição para a estiagem (maio)	pH	4,9	4,3	3,2	3,7	4,2	4,8	4,4	4,3	---
	CE	18,0	11,2	28,0	8,3	9,2	19,3	8,2	12,4	14,3
	Na ⁺	942,0	40,0	46,0	409,0	72,0	686,0	115,0	159,0	308,6
	K ⁺	1.019,0	488,0	573,0	409,0	878,0	980,0	315,0	792,0	681,8
	Ca ²⁺	889,7	2.949,5	57,8	47,7	426,2	521,8	69,8	249,3	651,5
	Mg ²⁺	591,4	354,3	150,0	157,3	312,7	400,1	112,3	374,1	306,5
	SiO ₂	5.640,0	5.260,0	5.220,0	4.910,0	5.580,0	5.250,0	2.350,0	3.670,0	4.735,0
	HCO ₃	12.200,0	<200,0	<200,0	<200,0	<200,0	9.760,0	2.440,0	<200,0	3.050,0
	Cl ⁻	147,0	95,0	189,0	131,0	194,0	68,0	485,0	42,0	168,9
	NO ₃ ⁻	5.426,0	485,0	1.209,0	1.708,0	107,4	329,0	140,0	325,0	1.216,2
	SO ₄ ²⁻	79,0	112,0	53,0	53,0	440,0	19,0	19,0	36,0	101,4
	TDS	26,9	9,8	7,5	7,8	8,0	18,0	6,0	5,6	11,2
	Σ ⁺	4.923,1	7.135,6	1.034,6	1.228,0	2.427,7	3.509,8	794,1	2.197,7	2.906,3
	Σ ⁻	17.931,0	804,0	1.504,0	1.945,0	1.181,4	10.195,0	3.103,0	439,0	4.637,8
NBCI	-0,28	0,40	-0,09	-0,11	0,17	-0,24	-0,30	0,33	-0,02	
Estiagem (junho, julho e agosto)	pH	5,9	5,1	4,6	4,7	5,0	5,7	4,9	5,6	---
	CE	21,2	18,8	13,5	13,4	17,4	21,6	11,5	20,4	17,2
	Na ⁺	1.346,3	144,1	299,9	215,2	385,2	935,9	818,3	250,0	549,4
	K ⁺	1.391,5	1.096,0	856,9	852,8	1448,6	1.825,0	1.210,1	1.389,6	1.258,8
	Ca ²⁺	1.166,4	1.177,1	183,6	52,0	683,2	812,1	179,3	1.200,3	681,8
	Mg ²⁺	650,9	861,2	153,6	159,3	515,3	557,1	154,7	1.004,8	507,1
	SiO ₂	7.062,9	4.804,9	3.658,9	3.919,0	5.589,6	9.810,0	4.253,1	4.979,4	5.509,7
	HCO ₃	10.077,7	8.069,3	5.326,4	5.094,4	9.040,3	12.200,0	4.265,5	12.685,2	8.344,8
	Cl ⁻	332,5	158,1	164,9	206,4	204,8	128,9	144,0	108,7	181,0
	NO ₃ ⁻	314,5	301,6	71,1	191,0	415,9	687,0	229,6	272,7	310,4
	SO ₄ ²⁻	168,8	164,9	213,8	226,7	108,1	146,5	167,3	138,9	166,9
	TDS	23,0	16,8	10,9	10,9	18,4	27,1	11,4	22,0	17,5
	Σ ⁺	6.372,6	5.316,8	1.831,0	1.490,7	4.230,8	5.499,3	2.696,4	6.049,7	4.185,9
	Σ ⁻	11.062,2	8.858,7	5.989,9	5.945,0	9.877,2	13.308,8	4.973,9	13.344,5	9.170,0
NBCI	-0,13	-0,12	-0,27	-0,30	-0,20	-0,21	-0,15	-0,19	0,20	
Transição para chuvoso (setembro)	pH	7,2	6,5	5,4	5,3	6,5	6,6	6,0	7,1	---
	CE	26,7	26,5	23,2	18,0	19,7	33,5	22,6	32,8	25,4
	Na ⁺	951,8	326,8	306,7	444,9	314,5	1.151,0	330,1	273,0	512,4
	K ⁺	1.707,6	1.804,8	1.009,1	1.429,9	1.995,5	24,1	1.784,1	1.665,0	1.427,5
	Ca ²⁺	1.410,8	1.550,6	123,2	192,7	864,5	1.075,5	163,4	1.882,1	907,9
	Mg ²⁺	762,9	1.061,7	211,6	247,2	663,3	659,4	224,9	1.526,9	669,7
	SiO ₂	2.230,0	3.580,0	1.670,0	2.940,0	3.990,0	6.580,0	2.890,0	3.920,0	3.475,0
	HCO ₃	10.980,0	10.004,0	8.296,0	8.052,0	10.004,0	10.248,0	9.272,0	10.980,0	9.729,5
	Cl ⁻	612,3	934,8	661,0	1.040,4	609,9	831,7	883,1	492,7	758,2
	NO ₃ ⁻	1.254,4	1.008,4	140,3	240,8	656,6	1.270,0	1.050,5	1.326,9	868,5
	SO ₄ ²⁻	236,4	67,9	279,9	186,5	115,7	127,2	32,2	285,6	166,4
	TDS	20,1	20,3	12,7	14,8	19,2	22,0	16,7	22,4	18,5
	Σ ⁺	7.006,8	7.356,2	1.985,4	2.754,6	5.365,6	4.644,9	2.890,8	8.756,0	5.095,0
	Σ ⁻	13.319,5	12.083,0	9.657,1	9.706,2	11.501,9	1.2604,1	11.270,0	13.370,8	11.689,1
NBCI	-0,16	-0,12	-0,33	-0,28	-0,18	-0,23	-0,30	-0,10	-0,21	

TDS = Na⁺ + K⁺ + Mg²⁺ + Ca²⁺ + SiO₂ + Cl⁻ + HCO₃⁻ + NO₃⁻ + SO₄²⁻. Normalização do balanço de cargas inorgânicas (NBCI) = $(\sum \mu\text{eq L}^{-1} \text{ cátions} - \sum \mu\text{eq L}^{-1} \text{ ânions}) / \sum \mu\text{eq L}^{-1} \text{ cátions}$ a partir de $\mu\text{g L}^{-1}$.

transição para a estiagem e o Cl⁻ no Ig 2 na transição para o chuvoso (Tabela 1). Essas variações, por não serem constantes ao longo do período analisado, sugerem que, além do volume

de água, fatores locais e complexos como aporte de tributários, turbulência, fotossíntese, atividade biológica, quantidade de material em suspensão, tipo, composição (mineralogia,

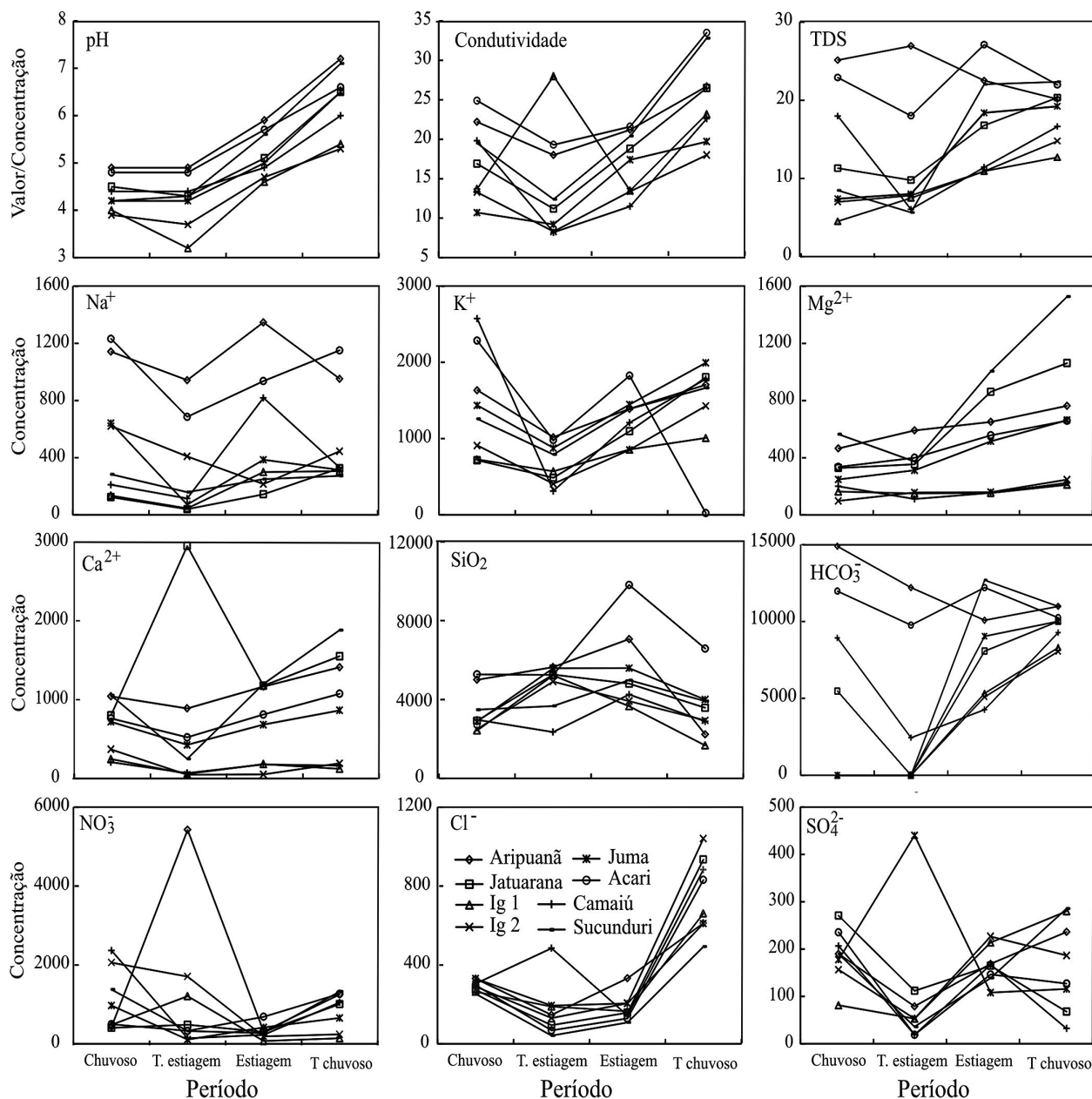


Figura 2 - Distribuição de pH, condutividade em $\mu\text{S cm}^{-1}$, TDS (total de sólidos dissolvidos = $\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^- + \text{SiO}_2$) em mg L^{-1} e concentração dos íons dissolvidos em $\mu\text{g L}^{-1}$ das águas, segundo os períodos sazonais.

colóides) e quantidade de matéria orgânica, influenciam a química aquática (Elderfield *et al.* 1990 e Shiller 1997).

A soma da carga dissolvida, considerando os íons mais abundantes ($\text{TDS} = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} + \text{SiO}_2 + \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$), é variável ao longo dos quatro períodos (Tabela 1 e Figura 2). Entre as drenagens o TDS é, em geral maior na água do Aripuanã no período chuvoso e na transição para a estiagem (entre 22 e 27 mg L^{-1}) e no Acari e ou no Sucunduri nos outros dois períodos. É menor nas águas

das drenagens menores (Ig1 e Ig2) e no Camaiú e Sucunduri na transição para a estiagem (4,5 e 7,0 mg L^{-1}). Contudo, a água do Sucunduri também tem baixo TDS na transição para a estiagem (5,6 mg L^{-1}). Apesar de a condutividade estar relacionada à carga dissolvida, há correlação positiva desses dois parâmetros apenas no período chuvoso ($r = 0,80$) e na estiagem (0,71).

A normalização do balanço de cargas inorgânicas (NBCI = $(\sum^+ \mu\text{eq L}^{-1} + \sum^- \mu\text{eq L}^{-1}) / (\sum^+ \mu\text{eq L}^{-1} - \sum^- \mu\text{eq L}^{-1}) / 2$) mostra,

em geral excesso de ânions em consequência da elevada concentração em HCO₃⁻, exceto nas águas mais ácidas nos períodos chuvoso e transição para a estiagem quando a concentração desse íon abaixo do limite de detecção aumenta a carga positiva (Tabela 1).

DISCUSSÃO

Origem dos elementos dissolvidos nas águas

A carga dissolvida nas águas dos rios, após a retirada da influência da água da chuva, permite estimar a origem dos elementos dissolvidos e examinar os mecanismos associados ao intemperismo das rochas (Stallard 1995, Gaillardet *et al.* 1997). A influência da água da chuva é determinada pelo método de Gaillardet *et al.* (1997) com a equação $C = Cx_{rio} - (Cx/CCl)_{mar} \times CCl_{rio}$ (onde Cx é a concentração do elemento e CCl é a concentração de cloreto, ambos em $\mu\text{mol L}^{-1}$). Para

tal foi obtida a média ponderada entre a composição química mensal das águas dos rios estudados e o índice pluviométrico (Tabela 2). Como não há evaporitos na região estudada (Reis 2006 e CPRM no prelo), todo o Cl⁻ das águas foi considerado como proveniente da chuva a partir da evaporação da água do mar, cuja composição média foi obtida de Berner e Berner (1987). Desse modo entre 14% do Na⁺ na água do Acari e 100% na do Jatuarana é proveniente da chuva (Tabela 2). Há influência também no SO₄²⁻ entre 21% e 38%, seguido do Mg²⁺ entre 2% e 19%. Os demais íons dissolvidos (K⁺, Ca²⁺, SiO₂, HCO₃⁻, NO₃⁻) têm pouca a nenhuma influência da chuva em suas concentrações nas águas dos rios.

Utilizaram-se, para determinar a origem dos elementos, os principais tipos de rochas que constituem a crosta continental (silicáticas, carbonáticas e evaporitos) de Gaillardet *et al.* (1997), além daquelas que ocorrem na região (CPRM no

Tabela 2 - Composição média anual das águas ponderada pela pluviosidade em $\mu\text{mol L}^{-1}$, em $\mu\text{eq L}^{-1}$, porcentagem de influência da pluviosidade na química das águas e razões entre Mg/Na, Ca/Na, Si/(Na+K) e soma de Ca+Mg e Na+K.

	Íons	Aripuanã	Jatuarana	Ig 1	Ig 2	Juma	Acari	Camaiú	Sucunduri	Média
$\mu\text{g L}^{-1}$	Na ⁺	1.142,25	137,39	152,31	547,38	568,67	1.147,46	248,08	268,36	526,5
	K ⁺	1.485,03	1.279,40	685,77	1.267,32	1.582,11	3.066,34	2.102,01	2.219,84	1.485,03
	Ca ²⁺	1.043,26	1.236,46	157,29	619,61	919,43	823,13	121,66	1.136,21	757,1
	Mg ²⁺	487,19	437,27	141,37	116,66	397,93	382,04	173,12	661,02	349,6
	SiO ₂	4.395,25	3.265,66	2.415,61	2.764,05	3.160,83	5.568,34	2.716,74	3.494,97	3.472,7
	HCO ₃ ⁻	13.429,21	5.647,45	2.636,58	2.511,93	3.062,44	9.846,52	6.204,48	5.670,65	6.126,16
	Cl ⁻	325,47	293,04	247,95	326,53	374,41	297,68	307,54	226,42	299,88
	NO ₃ ⁻	1.019,84	630,23	469,14	1.732,49	999,39	795,97	1.794,13	1.583,91	1.128,1
	SO ₄ ²⁻	180,99	200,33	90,73	141,41	237,31	150,31	128,35	146,71	159,5
	TDS	23,51	13,13	7,00	10,03	11,30	22,08	13,80	15,41	14,53
mg L^{-1}	Na ⁺	49,68	5,98	6,63	23,81	24,74	49,91	10,79	11,67	22,9
	K ⁺	37,98	32,72	17,54	32,41	40,47	78,43	53,76	56,78	43,76
	Ca ²⁺	26,03	30,85	3,92	15,46	22,94	20,54	3,04	28,35	18,89
	Mg ²⁺	20,04	17,99	5,82	4,80	16,37	15,72	7,12	27,20	14,38
	SiO ₂	73,15	54,35	40,20	46,00	52,61	92,68	45,22	58,17	57,80
	HCO ₃ ⁻	220,09	92,55	43,21	41,17	50,19	161,37	101,68	92,93	100,40
	Cl ⁻	9,18	1,52	6,99	0,67	0,82	8,40	8,67	1,52	1,65
	NO ₃ ⁻	16,45	10,16	7,57	27,94	16,12	12,84	28,94	25,55	18,19
	SO ₄ ²⁻	1,88	2,09	0,94	1,47	2,47	1,56	1,34	1,53	1,66
	TDS	454,49	254,96	132,82	202,28	236,46	441,44	260,56	308,56	286,45
$\mu\text{eq L}^{-1}$	Na ⁺	49,68	5,98	6,63	23,81	24,74	49,91	10,79	11,67	22,90
	K ⁺	37,98	32,72	17,54	32,41	40,47	78,43	53,76	56,78	43,76
	Ca ²⁺	52,06	61,70	7,85	30,92	45,88	41,08	6,07	56,70	37,78
	Mg ²⁺	40,09	35,98	11,63	9,60	32,74	31,44	14,25	54,39	28,77
	SiO ₂	73,15	54,35	40,20	46,00	52,61	92,68	45,22	58,17	57,80
	HCO ₃ ⁻	220,09	92,55	43,21	41,17	50,19	161,37	101,68	92,93	100,40
	Cl ⁻	9,18	8,27	6,99	9,21	10,56	8,40	8,67	6,39	8,46
	NO ₃ ⁻	16,45	10,16	7,57	27,94	16,12	12,84	28,94	25,55	18,19
	SO ₄ ²⁻	3,77	4,17	1,89	2,94	4,94	3,13	2,67	3,05	3,32
	Σcátions	179,82	123,58	43,65	86,48	143,83	167,79	84,87	152,21	164,83
Σânions	33,00	24,12	17,16	40,77	32,44	27,01	41,95	36,51	133,21	

Tabela 2 - Continuação

	Íons	Aripuanã	Jatuarana	Ig 1	Ig 2	Juma	Acari	Camaiú	Sucunduri	Média
Retirada da influência da chuva	Na ⁺	41,80	-1,12	0,62	15,90	15,67	42,70	3,34	6,19	14,6
	K ⁺	37,81	32,57	17,41	32,24	40,27	78,27	53,60	56,66	32,1
	Ca ²⁺	25,86	30,70	3,79	15,29	22,74	20,38	2,87	28,23	19,7
	Mg ²⁺	19,15	17,19	5,14	3,90	15,34	14,90	6,28	26,58	12,1
	SiO ₂	73,15	54,35	40,20	46,00	52,60	92,67	45,21	58,17	53,3
	HCO ₃ ⁻	220,05	92,52	43,18	41,13	50,15	161,34	101,65	92,91	89,4
	Cl ⁻	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	NO ₃ ⁻	16,45	10,16	7,57	27,94	16,12	12,84	28,94	25,55	15,6
	SO ₄ ²⁻	1,41	1,66	0,58	1,00	1,92	1,13	0,89	1,20	1,3
	TDS	435,68	239,15	118,50	183,41	214,82	424,24	242,78	295,47	152,1
	Ca/Na	0,62		6,10	0,96	1,45	0,48	0,86	4,56	2,3
	Mg/Na	0,46		8,26	0,25	0,98	0,35	1,88	4,29	2,5
	Si/(Na+K)	0,92	1,73	2,23	0,96	0,94	0,77	0,79	0,93	1,4
	Na+K	79,62	31,45	18,03	48,15	55,94	120,97	56,95	62,85	46,6
	Ca+Mg	45,01	47,88	8,93	19,19	38,09	35,28	9,15	54,80	31,8
μg L ⁻¹	Σcátions	3.941	2.896	972	2.334	3.219	5.221	2.440	4.135	2.672
	Σcátions+SiO ₂	8.336	6.161	3.387	5.098	6.380	10.789	5.157	7.630	5.872
Influência da chuva	Na ⁺	16%	100%	91%	33%	37%	14%	69%	47%	59%
	K ⁺	0%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	1%
	Ca ²⁺	1%	1%	3%	1%	1%	1%	5%	0%	1%
	Mg ²⁺	4%	4%	12%	19%	6%	5%	12%	2%	9%
	SiO ₂	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	HCO ₃ ⁻	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Cl ⁻	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	NO ₃ ⁻	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SO ₄ ²⁻	25%	21%	38%	32%	22%	28%	34%	22%	28%	

prelo). Os dados mostram que apesar das rochas da região e que fazem parte do cráton Amazônico, também serem silicáticas, elas tem razões Mg/Na e Ca/Na com variações maiores que as de Gaillardet *et al.* (1997), o que amplia o campo desse tipo de rocha na região (Figura 3). Portanto, a superposição das águas, com razões Mg/Na entre 0,25 e 8,26 e Ca/Na entre 0,48 e 6,10 (Tabela 2), com as rochas da região, além das razões Si/(Na+K) entre 0,92 e 2,91 (Tabela 2), refletem a origem silicática para as águas (distinta das rochas carbonáticas e das evaporíticas com razões Ca/Na acima de 10 e abaixo de 1, respectivamente – Figura 3). Essas razões e a soma das cargas positivas inferior a 179 μeq L⁻¹ (rio Aripuanã – Tabela 2), que permite classificar as águas como extremamente diluídas (Σ⁺ < 0,185 meq L⁻¹ – Meybeck, 2003), reflete o intenso intemperismo que ocorre na Amazônia e a baixa retenção de cátions que resulta na formação de gibbsita e caulinita (Stallard *et al.* 1995). Os valores de SiO₂ nas águas inferior a 93 μmoles L⁻¹ (rio Acari) (Tabela 2), apesar da influência da vegetação nesse elemento (Millot *et al.* 2002), também é similar as condições de ambiente cratônico definido por Stallard (1995) entre 50 e 100 μmoles de SiO₂.

A somatória Ca+Mg combinada com a de Na+K (Figura 3), que também permite inferir sobre o tipo de ambiente drenado (Zakharova *et al.* 2007), separam as águas em três

subambientes geoquímicos (Figura 3) que mantêm certa correlação com a geologia da região: 1) as dos rios Aripuanã, Jatuarana, Juma e Sucunduri com a soma Ca+Mg elevada, sugere aporte de rochas com maior proporção de plagioclásio (pequena ocorrência de carbonatos, portadores de Ca e Mg, foram identificados por Reis (2006) a montante do rio Sucunduri); 2) as dos Ig1, Ig2 e Camaiú, com baixa soma Ca+Mg e Na+K, sugere rochas pobres nesses elementos e, conseqüentemente com mais quartzo que corresponderiam as sedimentares conforme a geologia da região; e 3) as do Acari com soma de Na+K mais elevada representaria as rochas vulcânicas já que a montante do local amostrado ocorre esse tipo de rocha (Reis 2006).

Fluxo de elementos e consumo de CO₂

O fluxo de elementos para as soluções, que resulta do intemperismo químico das rochas, é determinado com base na área da bacia, na vazão e na carga química de cátions, segundo a equação:

$$F \text{ (ton km}^2 \text{ ano}^{-1}\text{)} = [\Sigma \text{Cátions (em mg L}^{-1}\text{)} \times \text{vazão média (m}^3 \text{ ano}^{-1}\text{)}] / [\text{área da bacia (km}^2\text{)} \times 0,0864]$$

(o fator 0,0864 é para correção das unidades de cálculo para toneladas ano) (Gaillardet *et al.* 1997).

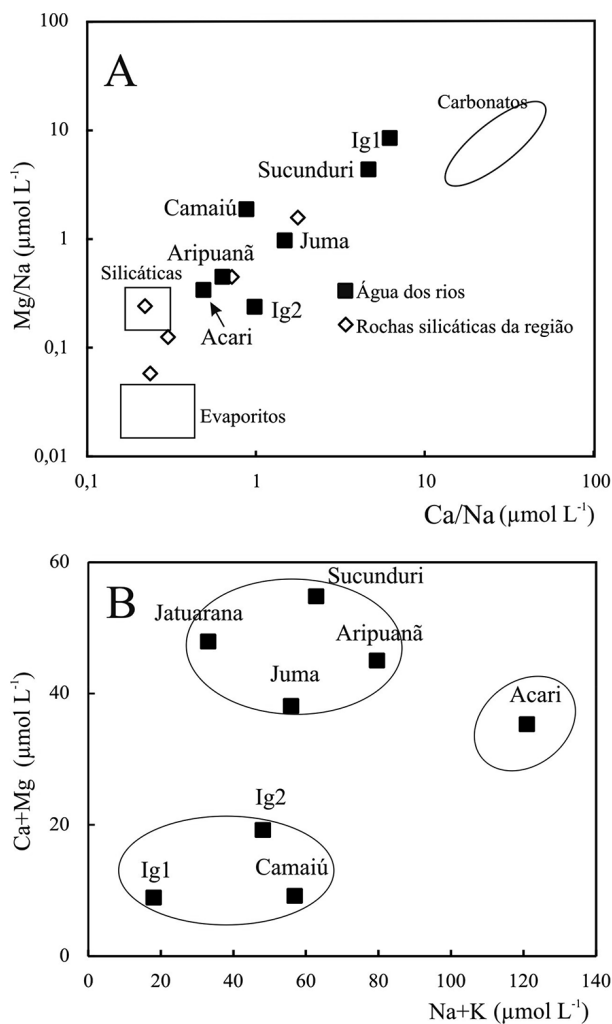


Figura 3 - Razão Ca/Na versus Mg/Na (A) e soma Ca+Mg versus Na+K (B) em $\mu\text{mol L}^{-1}$ após a retirada da influência da água da chuva em comparação com os campos das rochas carbonáticas, silicáticas e evaporíticas. Todo o Na das águas do rio Jatuarana tem origem atmosférica o que impossibilita identificar sua associação com o ambiente geológico do diagrama A.

Esse cálculo foi feito apenas para os rios Aripuanã, Acari e Sucunduri onde há dados disponíveis de vazão (2.925, 185 e 407 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ dia, respectivamente) e área (109.000, 4.970 e 12.700 km^2 , respectivamente) ambos obtidos em www.ore-hybam.org. A carga de cátions é respectivamente 3,94, 5,22 e 4,13 mg L^{-1} (Tabela 2), o que indica que os rios Aripuanã, Acari e Sucunduri exportam 3,34, 6,13 e 4,18 ton de cátions $\text{km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ para o rio Madeira, respectivamente. Se considerarmos também o conteúdo de SiO_2 , os valores do fluxo dobram (7,05, 12,67 e 7,71 ton de cátions+ SiO_2 $\text{km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ respectivamente). Esses fluxos são superiores ao do rio Negro e inferiores ao do rio Solimões e Madeira, mas se aproximam do fluxo dos rios Uatumã (ou Uruará), Trombetas

e Tapajós (Gaillardet *et al.* 1997), que também têm baixo conteúdo de material em suspensão.

Em função do fluxo de cátions e a densidade média das rochas silicáticas (2,7 g cm^{-3}) determina-se a taxa de erosão química (Xu *et al.* 2010) a qual é de 1,24, 1,71 e 1,55 m por milhão de anos, respectivamente nos rios Aripuanã, Acari e Sucunduri. Essa taxa está entre a faixa estimada por Stallard (1995) para regiões intracratônicas (1 a 5 m por milhão de anos), mas considerada baixa quando comparada com a de Edmond *et al.* (1995) que encontrou entre 5 e 20 m por milhão de anos no Cráton das Guianas. Essa baixa taxa é consequência dos rios de água preta quase não transportarem material em suspensão e da estabilidade tectônica da área. Segundo Edmond *et al.* (1995) e Stallard (1995) a taxa de erosão não está ligada diretamente a condição topográfica, mas à tectônica e entalhamento da drenagem. Em regiões cratônicas estáveis, o gradiente hidráulico é baixo e o intemperismo, que promove a formação de caulinita, gibbsita, óxi-hidróxidos de Fe e a dissolução do quartzo (Stallard e Edmond 1983 e 1987), forma um manto protetor que dificulta a alteração das rochas o que gera águas pobres em íons solúveis, mas ricas em Si (Edmond *et al.* 1995). Entretanto, o fluxo e a taxa de erosão química mais elevada no rio Acari reflete maior facilidade de intemperismo das rochas vulcânicas em relação às demais que ocorrem na região.

Durante o intemperismo das rochas há consumo de CO₂ o qual é representado pelo HCO_3^- dissolvido na água, que corresponde a 0,22, 0,16 e 0,09 mol L^{-1} nos rios Aripuanã, Acari e Sucunduri respectivamente (Tabela 2) (Gaillardet *et al.* 1997). Foi constatado um consumo de CO₂ de 20,30, 0,94 e 1,19 $10^9 \text{ mol ano}^{-1}$ no intemperismo das rochas das respectivas bacias. Os fluxos são compatíveis com os baixos valores de CO₂ encontrados em rios de águas pretas como o Negro (Gaillardet *et al.* 1997). Esse baixo consumo é consequência do HCO_3^- dissolvido nas águas ser proveniente, exclusivamente do CO₂ atmosférico já que não foi identificada contribuição de rochas carbonáticas. O consumo dos três rios estudados é muito inferior aos rios Solimões e Madeira (Gaillardet *et al.* 1997).

CONCLUSÃO

As águas dos rios do SE do Amazonas, que drenam o Escudo Brasileiro são pretas, ácidas e pouco condutivas. São muito diluídas, classificadas como bicarbonatadas-silícicas e resultam da intensa lixiviação nas condições tropicais quentes e úmidas da Amazônia. São mais concentradas no período de estiagem e na transição para o período chuvoso o indica a influência do regime hidrológico da região. Foram identificados três subambientes geoquímicos dentro do macro ambiente do sudoeste da Amazônia que, provavelmente refletem as variações litológicas entre as bacias. As baixas taxas

de exportação de cátions (entre 3,34 e 6,13 ton de cátions km⁻² ano⁻¹) e de erosão química (entre 1,2 e 2,4 m por milhão de anos) em relação a rios de águas brancas com elevado conteúdo de material em suspensão, assim como o consumo de CO₂ (entre 0,9 e 20,3 10⁹ mol ano⁻¹), reflete a estabilidade tectônica da região e o manto intempérico que dificulta, mas não impede a interação da água com o substrato rochoso.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de pós-graduação em Geociências da UFAM pelo apoio laboratorial; a CAPES pela bolsa ao primeiro autor; ao CNPq pela bolsa de produtividade ao segundo autor e ao projeto Casadinho/CNPq proc. no. 620039/2008-6 pelo apoio financeiro. Aos revisores pelas suas correções e sugestões.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Allégre, C.J.; Dupré, B.; Négrel, P.; Gaillardet, J. 1996. Sr-Nd-Pb isotopes systematics in Amazon and Congo river systems: Constrain about erosion processes. *Chemical Geology*, 131: 93-112.
- Berner, E.K.; Berner, R.A. 1987. *The global water cycle: geochemistry and environment*. Englewood Cliffs, New Jersey. 397 pp.
- Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais CPRM. Geologia e recursos minerais da folha Sumaúma – SB.20-Z-D. *Projeto Sumaúma-Roosevelt-Mutum. Relatório Final*. MME/SGTM, CPRM, Manaus, 260 pp. (no prelo).
- Drever, J.I. 1997. *The Geochemistry of Natural Waters Surface and Groundwater Environments*. Prentice Hall. USA, 460 pp.
- Edmond, J.M.; Palmer, M.R.; Measures, C.I.; Stallard, R.F. 1995. The fluvial geochemistry and denudation rate of the Guayana Shield in Venezuela, Colombia and Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3301-3325.
- Elderfield, H.; Upstill-Goddard, R.; Sholkovitz, E.R. 1990. The rare earth elements in rivers, estuaries, and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 971-991.
- Gaillardet, J.; Dupré, B.; Allégre, C.J.; Négrel P. 1997. Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. *Chemical Geology*, 142: 141-173.
- Meybeck, M. 2003. Global occurrence of major elements in rivers p.207-223. In: Hooland, H.D. and Turekian K.K. (eds) *Treatise of geochemistry*. v.5. Elsevier. 207-223
- Millot, R.; Gaillardet, J.; Dupré, B.; Allegre, C. J. 2002. The global control of silicate weathering rates and the coupling with physical erosion: new insights from rivers of the Canadian Shield. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 83-98.
- Mortati, J.; Probst, J. L. 2003. Silicate rock weathering and atmospheric/soil CO₂ uptake in the Amazon Basin estimated from river water geochemistry: seasonal and spatial variations. *Chemical Geology*, 197: 177-196.
- www.ore-hybam.org. The Environmental Research Observatory (ORE) HYBAM (Geodynamical, hydrological and biogeochemical control of erosion/alteration and material transport in the Amazon basin). Acesso 15/10/2011.
- Picouet, C.; Dupré, B.; Orange, D.; Valladon, M. 2002. Major and trace elements geochemistry in the upper Niger river (mali): physical and chemical weathering rates and CO₂ consumption. *Chemical Geology*, 185: 93-124.
- Reis, N.J. 2006. *Projeto rochas carbonáticas de Apuí - Amazonas. Relatório Final*. CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Manaus. 60 pp..
- Santos, F.L.G 2009. Caracterização química e definição de protocolo analítico para tratamento de efluentes usados em sistema de irrigação na agricultura. Dissertação de mestrado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 79 pp.
- Shiller, A.M. 1997. Dissolved trace elements in the Mississippi river: Seasonal, interannual, and decadal variability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 4321-4330.
- Smolders, A.J.P., Hudson-Edwards, K.A., Van der Velde, G., Roelofs, J.G.M. 2004. Controls on water chemistry of Pilcomayo river (Bolivia, South-America). *Applied Geochemistry*, 19: 1745-1758.
- Stallard, R.F.; Edmond, J.M. 1983. Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. *Journal of Geophysical Research*, 88: 9671-9688.
- Stallard, R.F.; Edmond, J.M. 1987. Geochemistry of the Amazon 3. Weathering chemistry and limits to dissolved inputs. *Journal of the Geophysical Research*, 92: 8293-8302.
- Stallard, R.F. 1995. Tectonic, environmental, and human aspects of weathering and erosion: A global review using steady-state perspective. *Annual Review Earth and Planetary Science*, 23: 11-39.
- Xu, Z.; Lui, C-Q. 2010. Water geochemistry of the Xijiang basin rivers, South China: Chemical weathering and CO₂ consumption. *Applied Geochemistry*, 25: 1603-1614.
- Zakharova, E.A.; Pokrovsky, O.S.; Dupré, B.; Gaillardet, J.; Efimova, 2007. Chemical weathering of silicate rocks in Karelia region and Kola peninsula, NW Russia: assessing the effect of rock composition, wetlands and vegetation. *Chemical Geology*, 242: 255-277.

Recebido em 28/02/2012

Aceito em 04/08/2012