



Estudo químico ambiental do rio Murucupi – Barcarena, PA, Brasil, área impactada pela produção de alumínio (doi:10.4136/ambi-agua.34)

**Simone de Fátima Pereira¹; Maurício Araújo de Lima²; K'Ellen Heloizy Freitas¹;
Cleide Samara Mescouto¹; Augusto Fonseca Saraiva²**

¹Programa de Pós-Graduação em Química - Laboratório de Química Analítica e Ambiental
(LAQUANAM) da Universidade Federal do Pará

E-mail: simonefp@ufpa.br; heloizygf@yahoo.com.br; samaramescouto@yahoo.com.br

²Laboratório Central (LACEN) – ELETRONORTE, PA

E-mail: saraiva@eln.gov.br

RESUMO

O presente estudo avalia as condições químicas do rio Murucupi em relação aos parâmetros físico-químicos e à presença de elementos químicos na água e suas correlações. O rio Murucupi localiza-se na região amazônica próximo a uma planta de produção de alumínio. 13 pontos foram selecionados ao longo do rio. Foram analisados os macroelementos, microelementos, elementos traço (Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Ba, Mn, Sr, Zn, Ni, Pb e Cu) e os parâmetros físico-químicos, acidez, alcalinidade total, matéria orgânica, pH, turbidez, temperatura, condutividade, oxigênio dissolvido (OD) e dureza total. Em relação aos parâmetros físico-químicos somente o pH e o OD apresentaram valores em não conformidade com a faixa de valores estabelecidos pela resolução 357/05 do CONAMA. Quanto aos elementos químicos somente o alumínio (Al: 356,04 µg/L) e o ferro (Fe: 1080,80 µg/L), estiveram em não conformidade com a legislação. Estes resultados apontam para uma possível influência antropogênica na contaminação dos rios da Amazônia por efluentes da produção do alumínio.

Palavras-chave: rio; metais; Amazônia.

Environmental chemical study of the Murucupi river – Barcarena, PA, Brazil impacted area for the aluminum production

ABSTRACT

The present work evaluates the chemical conditions of the Murucupi river with relationship to the physical-chemical parameters and the presence of chemical elements in the water and their correlations among themselves. The Murucupi river is located in the amazon region close to the aluminum production area. 13 points were selected along the river. the Macroelements, microelements, trace elements (Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Ba, Mn, Sr, Zn, Ni, Pb e Cu), and physical-chemical parameters, acidity, total alkalinity, organic matter, pH, turbidity, temperature, conductivity, dissolved oxygen (OD) and total hardness were analyzed. In relation to the physical-chemical parameters only pH and OD presented values in non conformity with thresholds established as acceptable by CONAMA resolution 357/05. Considering the chemical elements only aluminum (Al: 356.04 µg/L) and iron (Fe: 1080.80 µg/L) were in non conformity with the legislation. These results show the anthropogenic influence on the contamination of the Amazon rivers from the production of aluminum reject.

Keywords: river; metals; Amazon.

1. INTRODUÇÃO

As principais fontes de elementos-traço para o ambiente aquático continental são o intemperismo de rochas e a erosão de solos ricos nesses materiais. Mais recentemente outras fontes de elementos traço têm assumindo grande importância: atividades industriais, por meio de efluentes sólidos que são lançados diretamente na atmosfera e líquidos que são lançados em pequenos córregos ou diretamente em rios e lagos; atividade de mineração; efluentes domésticos e águas superficiais provenientes de áreas onde são utilizados defensivos agrícolas (Esteves, 1988).

Todas as formas de vida na Terra dependem da água para sua sobrevivência. Deve-se lembrar que de toda a água do planeta apenas 3% são água doce, e desse total 79% estão sob a forma de geleiras e icebergs, 20%, como água subterrânea e apenas 1% está diretamente disponível para o uso humano (Baird, 1999). Apesar disso, os reservatórios naturais vêm sendo depositários de uma ampla variedade de subprodutos provenientes da atividade antrópica. A presença de elementos potencialmente tóxicos é responsável por efeitos adversos sobre o ambiente, com repercussão na economia e na saúde pública. A introdução de elementos tóxicos nos sistemas aquáticos ocorre naturalmente pelos processos geoquímicos, no intemperismo e, a contribuição atribuída à atividade humana é um reflexo de sua ampla utilização pela indústria (Yabe; Oliveira, 1998).

A poluição de um ecossistema aquático pode causar alterações das características físicas, físico-químicas, e/ou biológicas, que vêm comprometer os múltiplos usos a que a água se destina (Clarisse et al., 1999).

Alguns metais, tais como manganês, cobre e zinco, quando presentes em quantidades mínimas são importantes para as funções fisiológicas dos organismos vivos e regulam muitos processos bioquímicos. Os mesmos metais, contudo, quando despejados nas águas naturais em concentrações elevadas pelos efluentes, efluentes industriais e de mineração podem ter efeitos toxicológicos severos no ambiente aquático e, posteriormente, no homem (Chapman; Kimstach, 1992).

A avaliação da poluição por metais é um importante aspecto da maioria dos programas de controle da qualidade da água. Esses programas incluem elementos como Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn e os semi-metais As e Se. A concentração dos diferentes elementos pode variar em um grande intervalo (0,1 – 0,001 µg/L) em áreas não poluídas e pode chegar a níveis que são perigosos à saúde humana em locais onde as águas sejam influenciadas por atividades antropogênicas (Chapman; Kimstach, 1992).

A manifestação dos efeitos tóxicos causados por metais pesados está associada à quantidade ingerida e pode distribuir-se por todo o organismo, afetando vários órgãos, alterando os processos bioquímicos das organelas e membranas celulares. Esses metais (Al, Ni, Ba, Zn, etc) tornam-se tóxicos e perigosos para a saúde humana quando ultrapassam determinadas concentrações-limite. O chumbo, mercúrio, cádmio, cromo e arsênio não desempenham funções nutricionais ou bioquímicas em microorganismos, plantas ou animais (Salgado, 1996; Muñoz et al., 2002).

A produção de alumínio tem apresentado um crescimento constante de 1% ao ano. As consequências ecológicas dessa produção são bem conhecidas: devastação da terra pela exploração da bauxita, usurpação de grandes áreas de terras para a construção de locais de disposição da lama vermelha, poluição em águas superficiais e subterrâneas e poluição do ar por gases resultantes de processos de eletrólise e trituração do alumínio (Salopek; Strazisar, 1993).

A proposição deste trabalho envolve um estudo químico, baseado no conhecimento de alguns elementos tóxicos presentes na água superficial do rio Murucupi. Destaca-se que esse rio nasce e atravessa uma região onde está localizado um grande pólo industrial de produção de alumina e alumínio, sendo portanto alvo de despejos tanto industriais como domésticos. A obtenção desses dados deve-se ao fato que na área de estudo ocorrem frequentemente acidentes ambientais pelo vazamento da lixívia sódica contendo resíduos do processamento da bauxita, que acabam por atingir os rios Murucupi e Pará.

As águas do rio Murucupi, de acordo com a resolução 357/05 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 2005), podem ser classificadas na área estudada como águas de rio de classe 2, já que são destinadas tanto para abastecimento urbano (cidades de Barcarena e Vila do Conde), onde se faz tratamento convencional, quanto para suprir as necessidades de populações ribeirinhas.

O município de Barcarena situa-se a nordeste do estado do Pará entre os paralelos 1° 30' S a 1° 40' S e entre os meridianos 48° 30' W a 48° 50' W. A geologia local faz parte da bacia sedimentar da foz do rio Amazonas; os terrenos são representativos do grupo Pará, caracterizado por depósitos de areia, siltes, argilas e concreções lateríticas. O sistema estudado foi o rio Murucupi localizado no município de Barcarena no estado do Pará (Figura 1).

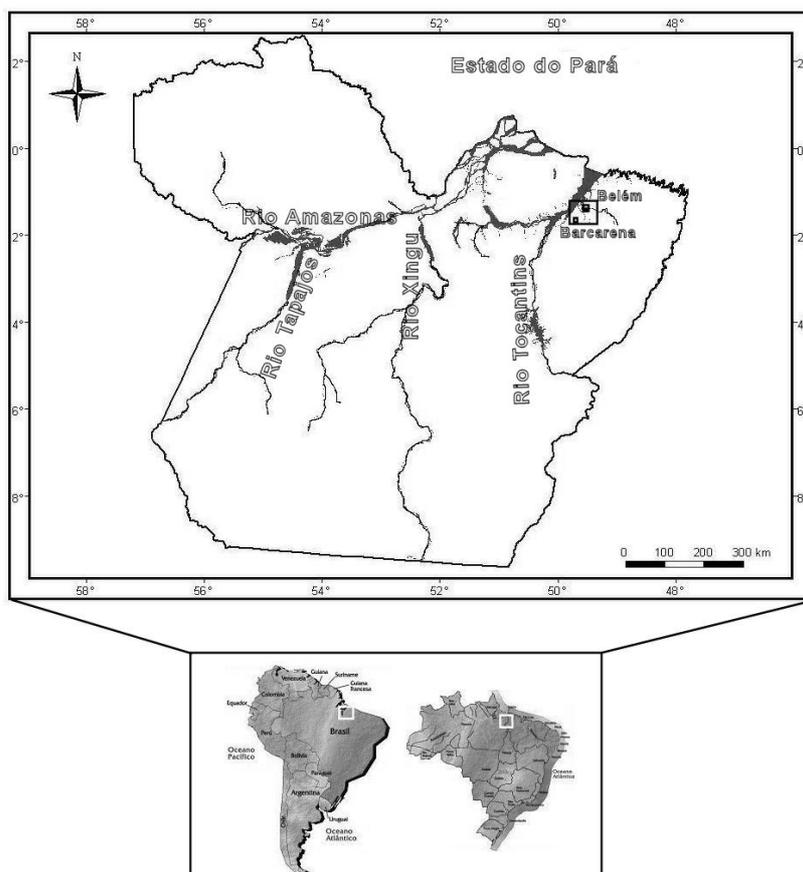


Figura 1. Mapa de localização da área estudada.

O município de Barcarena tem hoje cerca de 60 mil habitantes, segundo dados estatísticos do IBGE (IBGE, 2000). As principais atividades produtivas do município são a agricultura e a indústria. A cidade vive hoje sérios problemas ambientais relativos não só às indústrias, como também relativo aos problemas de saneamento básico (lixões, efluentes domésticos e sanitários). As águas naturais, assim como o ambiente geológico como um todo, interagem permanentemente, ocasionando uma série de transformações químicas.

Despejos de efluentes industriais contendo lama vermelha oriunda do processo de produção de alumina têm sido um problema constante para o ecossistema local (Figura 2).



Figura 2. Tubulação de efluentes domésticos e industriais no rio Murucupi.

A “lama vermelha” é o nome dado ao resíduo insolúvel que resta após a digestão da bauxita pelas soluções de hidróxido de sódio, na fabricação de alumina pelo processo Bayer. O rejeito contém, bauxita original, ferro e titânio sob a forma de óxido e toda a sílica e parte do alumínio combinado com o sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica. Porém, a produção de lama vermelha pelas fábricas de alumina constitui um problema ambiental de proporções consideráveis, devido às proporções do volume de lama vermelha gerado em uma fábrica de alumina típica e sua causticidade.

Uma fábrica de alumina pode gerar 0,5-2 toneladas de sólidos secos de lama vermelha para cada tonelada de alumina produzida. Além disso, até 2 toneladas de licor cáustico de 5-20 g/L (como Na_2CO_3) podem acompanhar cada tonelada de sólidos secos de lama. Sendo assim, é um problema considerável, que atualmente diz respeito a toda fábrica de alumina (Nunn, 1998). Na Tabela 1, é apresentada a composição química da lama vermelha (Santos, 1989).

Tabela 1. Composição química da lama vermelha.

Constituinte	Teor (%)	Constituinte	Teor (%)
Al_2O_3	17,42	Na_2O	3,36
Fe_2O_3	51,65	MgO	0,64
TiO_2	7,49	CaO	1,78
SiO_2	4,44		

Fonte: Santos (1989).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O sistema estudado foi o rio Murucupi (Figura 3) localizado no município de Barcarena, cujas coletas foram realizadas no período de estiagem (setembro/2006), quando a intrusão das águas da baía de Marajó é mais pronunciada. As coletas foram realizadas com o auxílio de um barco, no sentido da foz para nascente, seguindo a tábua da maré enchente para vazante com periodicidade diária, uma garrafa Van Dorn foi utilizada para a coleta da água superficial. Para o acondicionamento das amostras foram utilizados frascos de polietileno previamente descontaminados com ácido nítrico 10%, lavadas com água destilada, secas, etiquetadas e lavadas com água do rio no ponto da amostragem (ambiente). De cada ponto foram coletadas duas amostras, uma destinada ao ensaio dos elementos e outra para as análises físico-químicas realizadas em laboratório, ambas foram acondicionadas a 4°C e analisadas dentro do prazo, mas apenas as primeiras foram acidificadas até $\text{pH} < 2$ com ácido nítrico concentrado (análise dos elementos químicos).

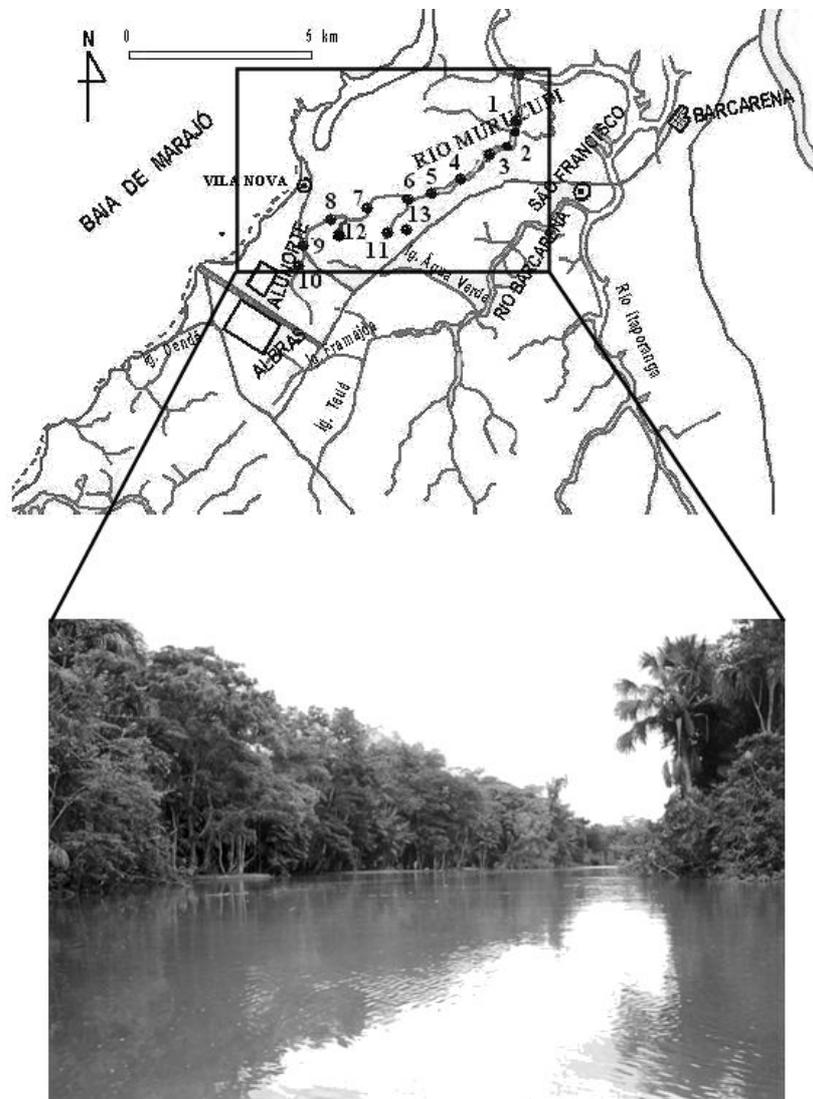


Figura 3. Localização da área de estudo, mostrando o rio Murucupi em destaque.

Foram selecionados 13 pontos, sendo estes analisados em triplicata. Os locais de amostragem foram georreferenciados por meio de um GPS (global positioning system - Etrex/Garmin). Para o planejamento amostral, foi utilizada a tábua de marés diária fornecida pelo DHN. A localização dos pontos obtidos na amostragem está mostrada na Tabela 2.

Os parâmetros pH, temperatura, condutividade, oxigênio dissolvido, turbidez foram analisados no campo. No laboratório foram analisados a alcalinidade, dureza total, matéria orgânica e elementos químicos (Al, As, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sr e Zn). Os métodos utilizados na análise dos parâmetros físico-químicos e elementos químicos estão mostrados na Tabela 3.

Tabela 2. Localização dos pontos amostrais.

Amostra	Coordenadas (GPS)	Amostra	Coordenadas (GPS)
RMW-1	01°29'34,7" S/048°39'55,4" W	RMW-8	01°31'26,7" S/048°41'19,7" W
RMW-2	01°30'27,3" S/048°40'07,0" W	RMW-9	01°31'27,1" S/048°41'24,5" W
RMW-3	01°30'48,4" S/048°40'28,2" W	RMW-10	01°31'27,0" S/048°41'21,7" W
RMW-4	01°30'56,3" S/048°40'42,7" W	RMW-11	01°31'27,1" S/048°41'24,3" W
RMW-5	01°31'11,4" S/048°40'50,1" W	RMW-12	01°31'27,1" S/048°41'24,0" W
RMW-6	01°31'23,0" S/048°41'9,5" W	RMW-13	01°31'27,1" S/048°41'24,8" W
RMW-7	01°31'27,4" S/048°41'15,1" W		

Tabela 3. Métodos, equipamentos e ensaios utilizados.

Parâmetro	Método	Equipamento marca/modelo	Norma
Elementos químicos	Espectrometria de emissão atômica	ICP-OES Varian/Vista-Pro	US-EPA standard methods 6010 B
Arsênio	Espectrometria de absorção atômica	HGAAS- Varian SpectraA55-VGA77	
Alcalinidade total	Indicador misto	-	ASTM D 1067-82
Dureza total	Titulação com EDTA	-	ASTM D 1126-80
Matéria orgânica	Oxidação com KmnO ₄	-	-
pH	Potenciométrico	Schott/ Handylab 1	ASTM D 1293-78
Condutividade	Conduítmétrico	Schott/ Handylab Lf1	ASTM D 1125-82
Turbidez	Nefelométrico	Orbeco-Hellige/966	ASTM D 1889-81
Oxigênio dissolvido	Oxidimétrico	Quimis/ Q-408 P	ASTM D 888-81
Temperatura	Termômetro	Icel/ TD-910D	-

A otimização dos instrumentos utilizados foi realizada pela confecção de curvas analíticas visando à determinação do coeficiente angular (a) e linear (b), e coeficiente de correlação (r) além do cálculo dos limites de detecção (LD) pela análise de 15 brancos (3S) e cálculo do limite de quantificação (LQ). Os limites de detecção e quantificação do instrumento foram determinados segundo as equações 1 e 2.

$$L.D = \frac{3.SD_{branco}}{a} \quad [1]$$

$$L.Q = \frac{10.SD_{branco}}{a} \quad [2]$$

em que, SD_{branco} é o desvio padrão do branco e a é o coeficiente angular da curva analítica para cada elemento. Os resultados encontrados estão mostrados na Tabela 4.

Todas as curvas se mostraram lineares com coeficientes de correlação acima de 0,9900. Os resultados para o limite de detecção e limite de quantificação mostraram que a técnica do ICP-OES pode ser usada na determinação de elementos em amostras de água, em que estes se encontram em baixas concentrações. O estudo da exatidão foi realizado com a análise do material padrão de referência de água de rio (SRM 1640 NIST) em que os elementos analisados se encontram em concentrações próximas às encontradas nas amostras analisadas neste estudo. No geral, os resultados estão dentro da faixa aceitável para a recuperação dos padrões. Al, Ba, Cd, Cr e Fe apresentaram excelentes recuperações (90-110%), Ca, Cu, Mg, Mn, Ni e Sr apresentaram boas recuperações com perdas (80-89%) assim como Mo e Na com boas recuperações com incrementos na concentração do elemento (111-113%). Os elementos potássio e chumbo apresentaram recuperações regulares abaixo de 80%, indicando perda do elemento ou interferências de origem não determinada.

Tabela 4. Parâmetros analíticos.

<i>Elementos</i>	λ (nm)	<i>LD</i> ($\mu\text{g/L}$)	<i>LQ</i> ($\mu\text{g/L}$)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>
Al	308,22	2,07	6,88	4,18	184,100	0,9983
As	228,00	0,02	0,06	0,021	0,072	0,9999
Ba	233,53	0,76	2,54	46,93	173,63	0,9998
Ca	317,93	16,05	53,49	15655	374,18	0,9997
Cd	214,44	0,66	2,19	38,51	124,22	0,9990
Cr	267,72	0,87	2,90	17,99	60,54	0,9990
Cu	324,75	1,67	5,56	27,93	269,43	0,9983
Fe	238,86	4,77	15,91	3740	54,88	0,9998
K	766,47	2,46	8,21	21,05	263,5	0,9994
Mg	278,30	8,28	27,58	381,94	19,65	0,9999
Mn	257,61	1,20	4,00	158,45	419,88	0,9999
Mo	379,83	3,82	12,74	5,33	122,82	0,9973
Na	589,00	63,17	210,55	139846	4144,8	1,0000
Ni	231,60	4,22	14,06	5,07	2,659	0,9992
Pb	220,35	9,68	32,25	2,59	42,22	0,9982
Sr	407,77	0,10	0,33	2510,4	10665	0,9992
Zn	213,86	4,88	16,28	30,07	140,81	0,9996

O procedimento da análise estatística adotada foi o da análise inferencial. Esse procedimento abrange a estatística descritiva, análise de regressão e correlação lineares e a estatística multivariada com a análise do dendrograma.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para os parâmetros físico-químicos na água superficial do rio Murucupi estão mostrados na Tabela 5. Cada ponto reflete a média de sete dias de coleta em que cada amostra foi analisada em triplicata.

Observou-se que a acidez, alcalinidade, dureza, matéria orgânica e pH se mantiveram praticamente constantes. Apenas com aumento significativo nos pontos RMW-11 e RMW-13, o primeiro ponto corresponde a um braço do rio Murucupi, e o segundo compreende um ponto de coleta onde existe uma tubulação de efluente industrial que é despejado diretamente no rio (Figura 2).

Tabela 5. Resultados das análises físico-químicas.

<i>Amostra</i>	<i>Temp. ambiente (°C)</i>	<i>Temp. da amostra (°C)</i>	<i>pH</i>	<i>OD (mg/L)</i>	<i>turbidez (UNT)</i>	<i>condutividade (mS/cm)</i>	<i>acidez (mg/L em CaCO₃)</i>	<i>alcalinidade total (mg/L de CaCO₃)</i>	<i>dureza total (mg/L)</i>	<i>matéria orgânica (mg/L)</i>
CONAMA (rio de classe 2)	-	-	6,0 – 9,0	5,0	100,0	-	-	-	-	-
RMW - 1	28,9	29,5	5,2	6,3	30,0	3,1	17,5	50,7	13,0	3,2
RMW - 2	28,0	29,4	4,4	6,2	32,0	3,4	11,0	40,0	17,5	4,1
RMW - 3	29,0	29,0	4,9	6,2	34,0	3,5	12,0	48,0	13,0	3,3
RMW - 4	28,5	29,0	4,9	5,8	21,6	3,5	13,0	42,7	13,0	3,8
RMW - 5	28,0	28,5	5,2	6,2	23,6	3,6	12,0	48,0	11,0	3,4
RMW - 6	28,0	28,0	5,2	4,8	17,0	3,8	20,0	45,3	14,0	3,1
RMW - 7	28,0	28,0	5,1	4,8	21,0	4,2	36,0	40,0	13,0	3,6
RMW - 8	28,0	28,0	5,2	4,2	31,5	4,3	23,0	40,0	13,0	3,4
RMW - 9	29,0	28,0	5,3	5,0	26,8	3,4	15,0	40,0	12,0	3,8
RMW - 10	28,0	27,0	5,1	4,0	24,5	4,0	29,0	28,0	12,0	3,7
RMW - 11	28,0	28,0	5,7	2,6	26,8	3,8	92,0	40,0	15,0	7,1
RMW - 12	27,0	27,0	5,6	5,4	24,8	3,6	31,0	33,3	12,0	6,4
RMW - 13	28,0	28,0	6,2	5,0	27,9	3,5	104,0	232,0	21,0	9,2
Média	28,2	28,3	5,2	5,1	26,3	3,7	32,0	56,0	13,8	4,5
Desvio padrão	0,5	0,8	0,4	1,1	4,9	0,4	30,5	53,2	2,7	1,9
CV (%)	1,8	2,8	7,7	21,6	18,6	10,8	95,3	95,0	19,6	42,2
Máximo	29,0	29,5	6,2	6,3	34,0	4,32	104,0	232,0	21,0	9,2
Mínimo	27,0	27,0	4,4	2,6	17,0	3,05	11,0	28,0	11,0	3,1

Obs.: Coeficiente de Variação = CV; OD = Oxigênio Dissolvido.

O ponto (RMW-13) apresenta elevados teores de alcalinidade, dureza, acidez, matéria orgânica e pH. Mais adiante quando esse efluente se junta ao corpo do rio, ponto RMW-11, esses parâmetros apresentam-se ligeiramente menores, resultado da dispersão do efluente no rio.

Quanto ao pH, as águas mostram-se ácidas (pH de 4,35 a 6,15), o que está de acordo com a influência do material em suspensão nas águas de rios amazônicos (argila rica em caulinita e ácidos húmicos oriundos da decomposição de matéria vegetal) (Lima; Kobayashi, 1988). Embora haja uma aparente contradição entre as características do efluente de natureza cáustica e o pH encontrado de natureza ácida, estudos realizados na área mostram a capacidade regeneradora de suas águas devido à forte influência das marés que funcionam

como agente depurador dos rios da região (Lima; Kobayashi, 1988). As grandes variações de pH seriam notadas apenas por ocasião dos vazamentos de efluentes que logo se dispersam pela influência das marés.

Os valores de oxigênio dissolvido na água tendem a diminuir conforme deslocam-se em direção à nascente do rio, chegando a valores abaixo da resolução 357 do CONAMA ($> 5,0$ mg/L OD) a partir do ponto RMW-6, com um mínimo (2,6 mg/L) no ponto RMW-11, em que esse valor está associado ao consumo de oxigênio dissolvido na água pela ação redutora da matéria orgânica proveniente do efluente que é despejado no rio.

A média de pH obtida foi de 5,21, valor abaixo da faixa estabelecida pela resolução 357 do CONAMA (pH 6,0 – 9,0), valores maiores foram encontrados à medida que a maré diminuía, com o máximo de 6,15 encontrado no ponto RMW-13 (recebimento de efluente doméstico e efluente da fábrica de alumina), o que está de acordo com o teor de alcalinidade encontrado nesse ponto.

Na Figura 4 é mostrada a variação dos parâmetros ao longo do rio.

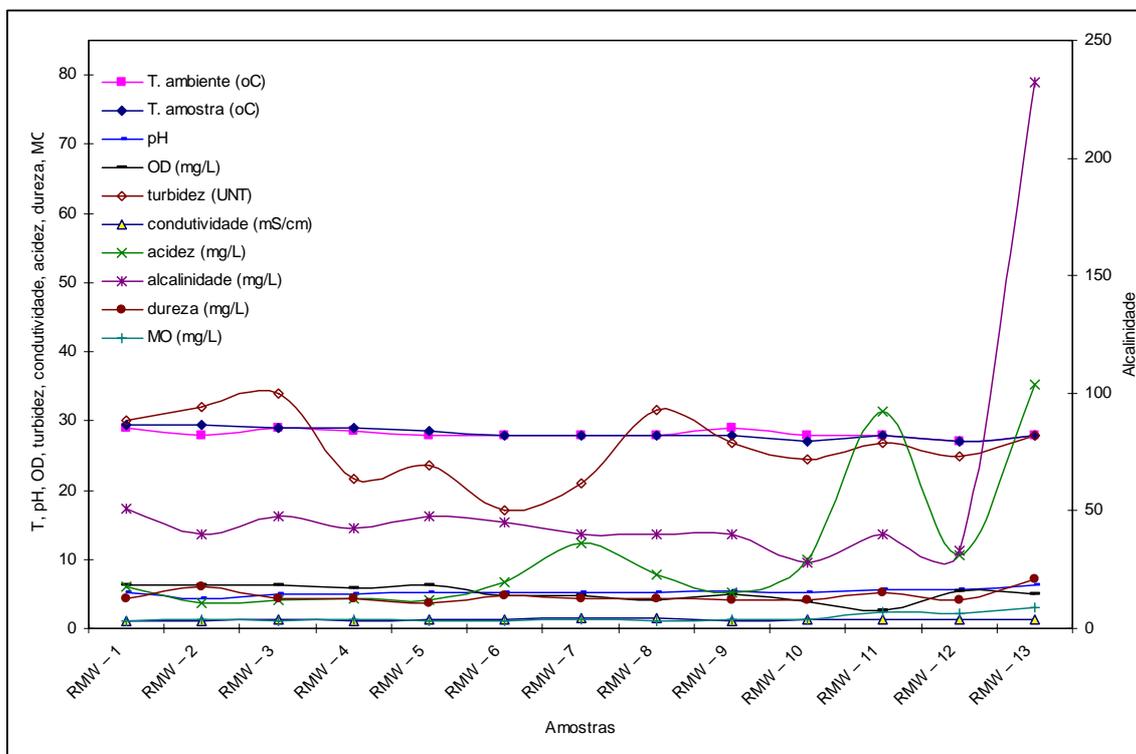


Figura 4. Variabilidade dos parâmetros físico-químicos das águas do rio Murucupi.

A alcalinidade apresentou valores entre 28 e 232 mg/L, com média de 56 mg/L, destacando-se apenas o ponto RMW-13 (efluente), cujo valor foi 232 mg/L, revelando a natureza cáustica do efluente despejado no rio. O mesmo é observado para a acidez cujo valor máximo também se situa no ponto RMW-13.

As medidas de condutividade elétrica variaram de 3,05 a 4,32 mS/cm, com média de 3,67 mS/cm. Nesse parâmetro observa-se uma mudança no comportamento eletrolítico da água segundo a dinâmica da maré (enchente), tendendo a valores maiores conforme a enchente da maré, comprovando a influência das águas salobras da baía de Marajó, fato muito comum em períodos de estiagem.

Os valores encontrados neste estudo para as medidas de condutividade são 10,19 vezes maiores que os encontrados por outros autores para o rio Murucupi, no período chuvoso que variaram de 0,03 a 0,69 mS/cm (Lima; Kobayashi, 1988).

Os valores de turbidez obtidos estão no intervalo de 17 a 34 UNT, abaixo da resolução do CONAMA (< 100,0 UNT). Esses valores devem-se, sobretudo, ao material em suspensão, que compreende um complexo coloidal composto de matéria orgânica e de argila rica em caulinita (Lima; Kobayashi, 1988).

Os valores de dureza das águas estão entre 11 e 21 mg/L, com média de 13,81 mg/L de CaCO₃. Esses resultados refletem um quadro comum da região estudada, a região em estudo apresenta pobreza de sais de cálcio e magnésio, em que valores mais expressivos estão associados com períodos de estiagem devido à intrusão das águas mais salobras da baía de Marajó no sistema flúvio-estuarino de Barcarena (Lima; Kobayashi, 1988).

Pela análise do coeficiente de variação (CV) foi possível analisar a variabilidade dos parâmetros físico-químicos estudados. A acidez (CV=95,3%) e a alcalinidade (CV=95,0%) foram os parâmetros que apresentaram as maiores variações com valores máximos muito acima da média encontrada, esses resultados mostram que existe despejo de efluente doméstico e industrial no rio, que este tem origem cáustica (industrial) e que devido à grande influência das marés ocorre a diluição deles ao longo do rio.

Os altos valores de alcalinidade mostram uma situação até certo ponto incompatível com a natureza dos terrenos ácidos naturais característicos dessas águas regionais. Observa-se, por outro lado, que a alcalinidade (expressa em ppm de CaCO₃) aumenta com a baixa-mar nos pontos observados no rio Murucupi; tais fatos parecem indicar que incrementos na alcalinidade estejam menos associados a teores mais elevado de bicarbonato, que são característicos de águas de igarapés, e mais associados a despejos de efluentes de origem cáustica. De qualquer modo, há nítida influência da dinâmica das marés da baía do Marajó, mediante forte penetração dessas águas no sistema de bacias de drenagem do rio Murucupi durante as enchentes de maré.

As correlações encontradas para os parâmetros físico-químicos estão mostradas na Figura 5, um gráfico de superfície criado a partir da matriz de correlação gerada pelo programa Statistica (Statsoft). Nele, as áreas escuras indicam elevada correlação entre os parâmetros, conforme indicado pela legenda. No geral, não se observaram muitas correlações entre os parâmetros físico-químicos, apenas boa correlação ($0,6 < r < 0,8$) da acidez com a condutividade e regular correlação ($0,4 < r < 0,6$) entre alcalinidade, pH e oxigênio dissolvido, indicando que existem alterações desses parâmetros devido às contaminações antropogênicas.

Além da análise da correlação entre os parâmetros físico-químicos também foi aplicada à análise multivariada visando estabelecer quais os parâmetros que apresentam similaridade, representado pela análise do dendrograma (Figura 6). Quanto à similaridade entre os parâmetros físico-químicos, observa-se que os parâmetros com as maiores similaridades foram a matéria orgânica e a condutividade (menores distâncias euclidianas) e o OD e pH, a presença de matéria orgânica é responsável pelo aparecimento de ácidos húmicos e fúlvicos no corpo hídrico influenciando parâmetros como o pH e condutividade que são suscetíveis a presença de H⁺ na água. A alcalinidade se destaca isolada dos demais parâmetros constituindo um resultado com significativa influência antropogênica.

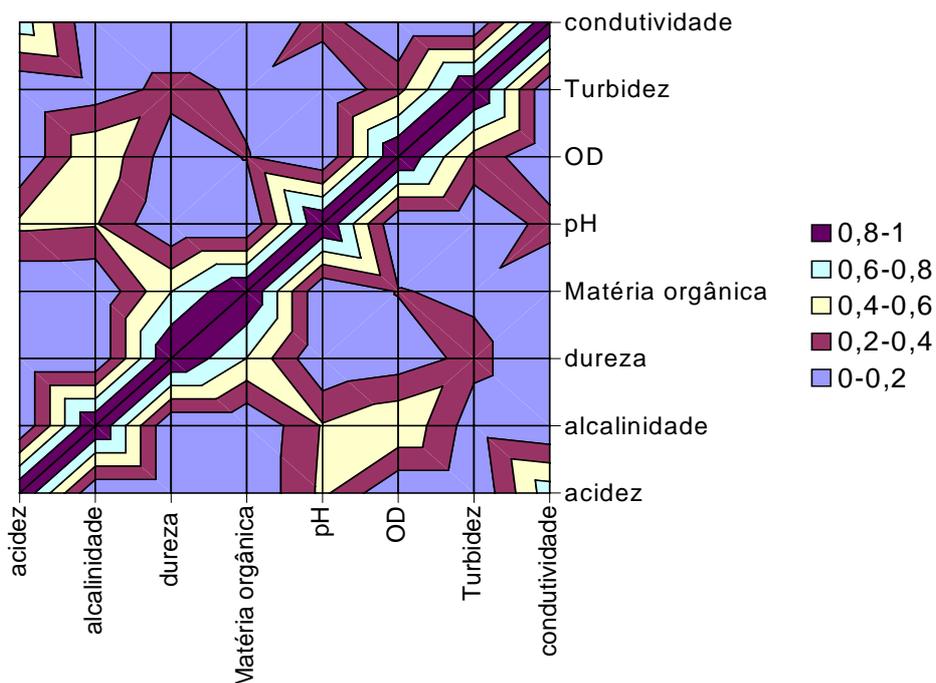


Figura 5. Gráfico de superfície para as correlações encontradas.

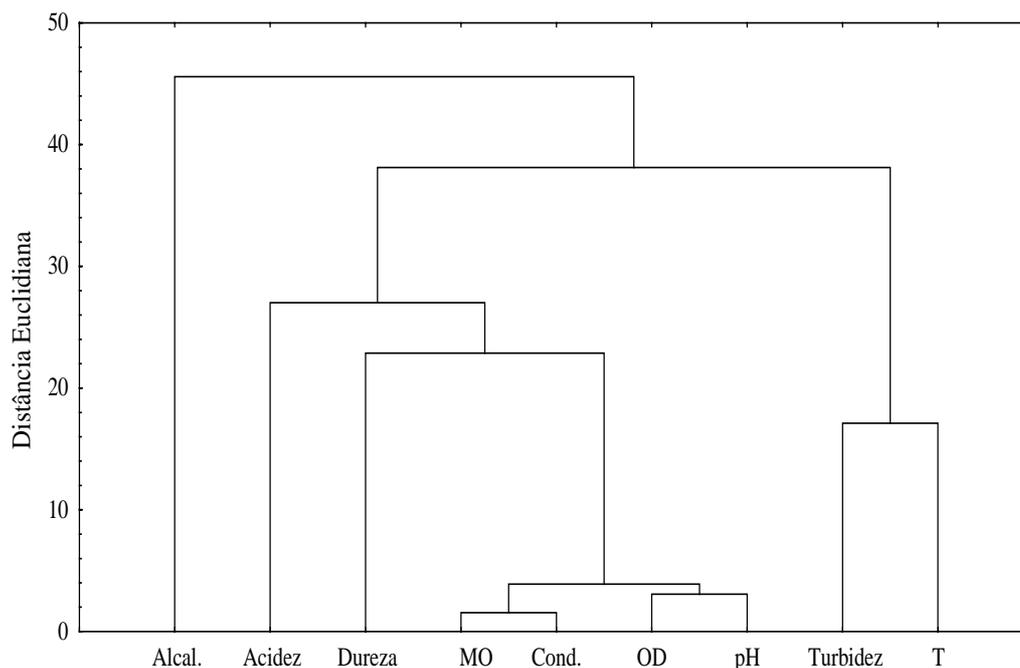


Figura 6. Dendrograma dos parâmetros físico-químicos.

Os resultados obtidos para os elementos químicos na água superficial do rio Murucupi estão mostrados na Tabela 6. Cada ponto reflete a média de sete dias de coleta onde cada amostra foi analisada em triplicata.

Os gráficos da variabilidade dos elementos químicos ao longo do rio Murucupi estão mostrados nas Figuras 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13.

Tabela 6. Resultados das análises dos elementos químicos.

Amostra	Elementos químicos (µg/L)													
	Ca	Mg	Na	K	Fe	Al	Ba	Mn	Sr	Zn	Ni	Pb	Cu	Cr
CONAMA	-	-	-	-	300	100	700	100	-	180	25	10	9	50
RMW - 1	3101,8	1024,0	1906,7	920,0	676,7	237,6	19,4	15,0	19,9	<4,9	6,4	<9,7	<1,7	<0,9
RMW - 2	3141,5	1089,1	1917,0	957,1	788,6	231,4	18,8	20,4	21,3	<4,9	<4,2	10,1	<1,7	<0,9
RMW - 3	2935,9	1017,1	1983,9	911,6	738,7	244,0	18,5	18,8	18,9	<4,9	8,1	<9,7	<1,7	<0,9
RMW - 4	2677,7	1009,2	2020,2	915,1	736,1	246,2	17,1	20,8	17,5	<4,9	5,6	<9,7	<1,7	<0,9
RMW - 5	2428,7	942,7	2158,6	915,8	726,8	214,1	16,0	23,0	15,7	<4,9	<4,2	<9,7	2,6	<0,9
RMW - 6	2485,9	943,1	2502,9	1003,5	838,3	365,2	16,1	29,7	15,7	<4,9	<4,2	<9,7	<1,7	<0,9
RMW - 7	2470,8	981,2	3009,1	1091,1	937,3	215,1	15,4	38,9	15,3	<4,9	<4,2	<9,7	<1,7	<0,9
RMW - 8	2310,7	978,4	3191,3	1139,5	975,8	297,6	15,3	41,0	14,6	<4,9	<4,2	<9,7	<1,7	<0,9
RMW - 9	2282,8	952,8	3589,2	1211,2	1030,7	202,3	14,6	42,6	14,2	<4,9	<4,2	<9,7	<1,7	<0,9
RMW - 10	2354,8	965,5	3729,0	1254,6	1082,0	303,6	14,9	42,5	14,4	<4,9	<4,2	<9,7	<1,7	<0,9
RMW - 11	6972,1	1886,2	20323,0	5987,3	762,2	375,2	47,1	100,9	38,5	42,2	<4,2	15,0	7,3	<0,9
RMW - 12	7176,5	1963,1	6401,5	1709,7	4183,2	1186,0	53,8	194,3	42,2	29,7	5,2	<9,7	7,2	<0,9
RMW - 13	9968,5	2495,4	42990,0	15056,0	574,4	510,3	76,7	162,5	51,9	100,7	5,7	11,0	15,6	4,6
Média	3869,8	1249,8	7363,2	2544,0	1080,8	356,0	26,4	57,7	23,1	13,3	2,4	2,8	2,5	0,4
D. Padrão	2489,3	513,0	11795,5	4001,3	943,6	264,1	19,8	58,2	12,6	29,6	3,2	5,4	4,8	1,3
CV (%)	64,3	41,1	160,2	157,28	87,3	74,2	75,0	100,9	54,5	222,6	133,3	192,9	192,0	325,0
Máximo	9968,5	2495,4	42990,0	15056,0	4183,2	1186,0	76,7	194,3	51,9	100,7	8,1	15,0	15,6	4,6
Mínimo	2282,8	942,7	1906,7	911,6	574,4	202,3	14,6	15,0	14,2	<4,9	<4,2	<9,7	<1,7	<0,9

Obs.: CONAMA = Conselho Nacional do Meio Ambiente (resolução 357/05 para rio classe2); D. Padrão = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação.

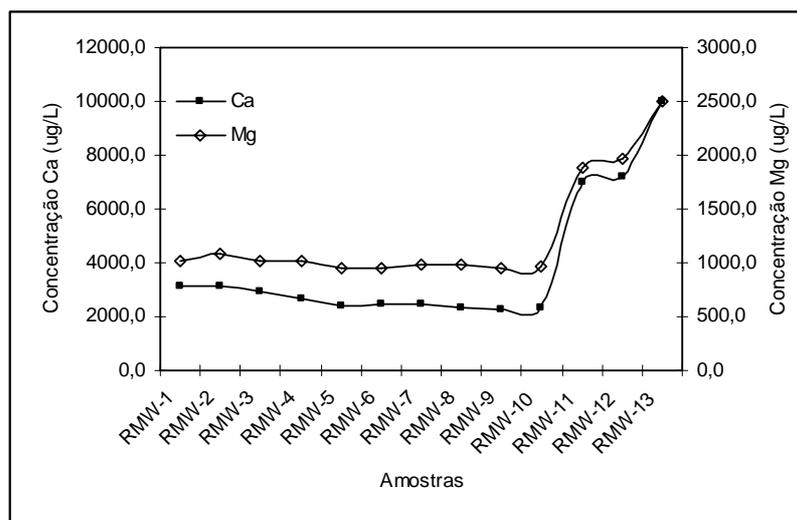


Figura 7. Variabilidade do Ca e Mg ao longo do rio Murucupi.

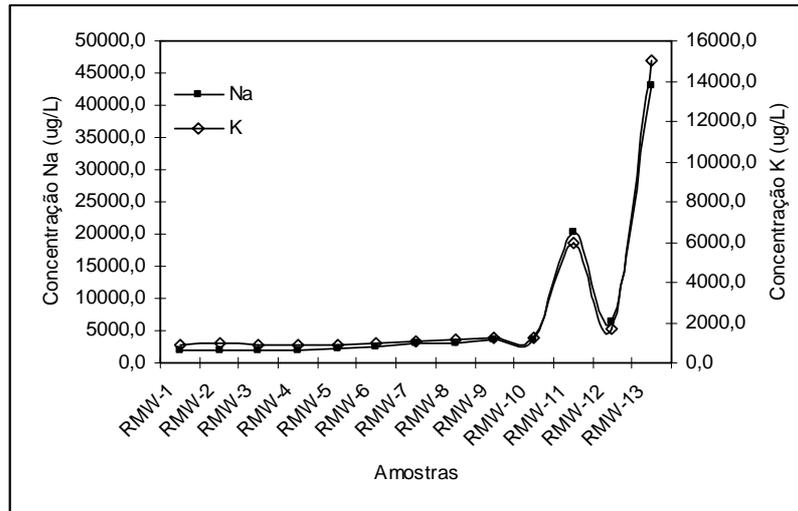


Figura 8. Variabilidade do Na e K ao longo do rio Murucupi.

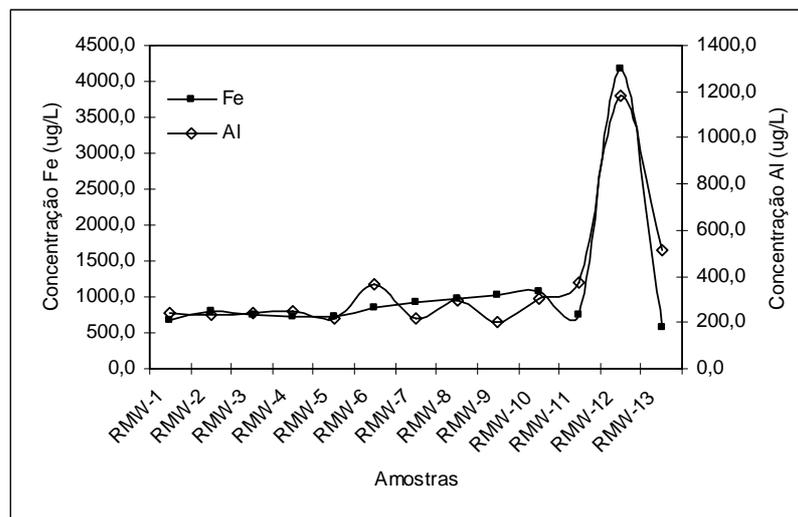


Figura 9. Variabilidade do Fe e Al ao longo do rio Murucupi.

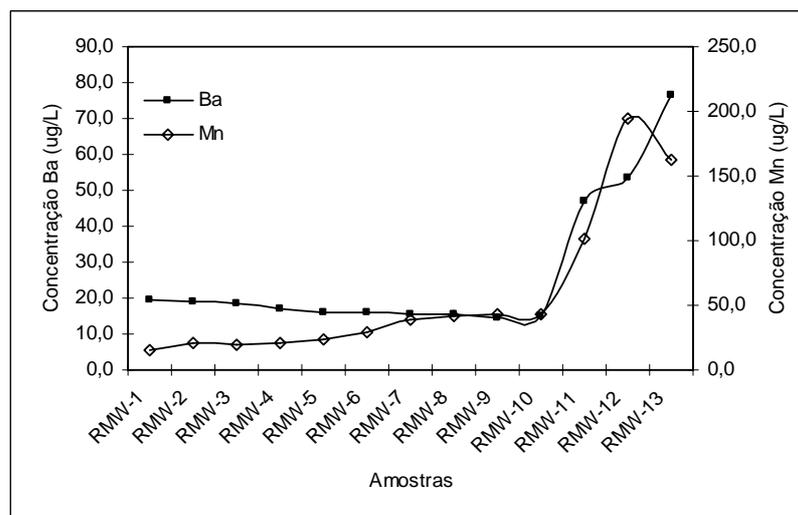


Figura 10. Variabilidade do Ba e Mn ao longo do rio Murucupi.

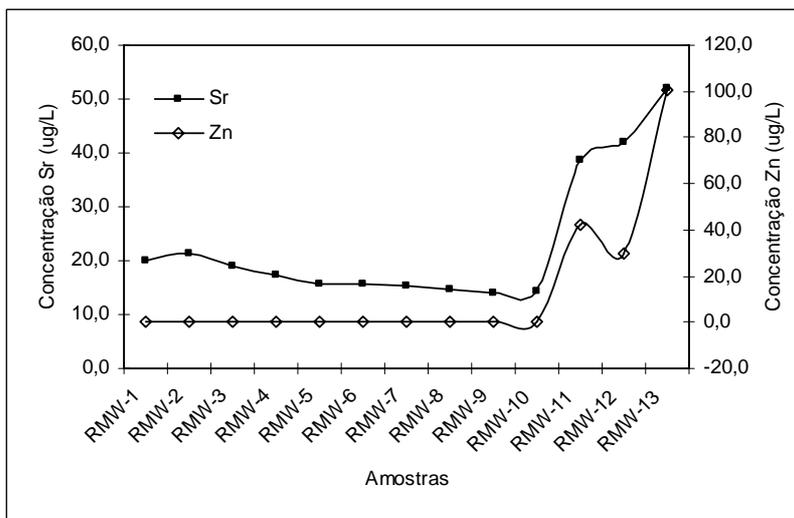


Figura 11. Variabilidade do Sr e Zn ao longo do rio Murucupi.

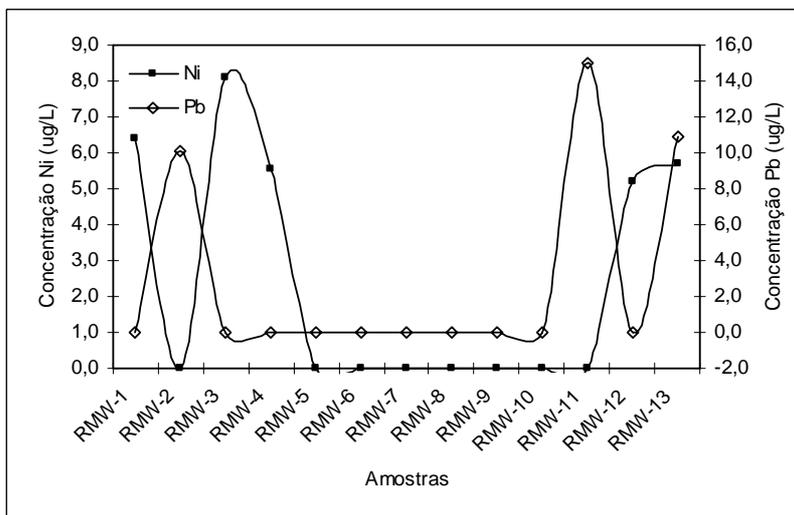


Figura 12. Variabilidade do Ni e Pb ao longo do rio Murucupi.

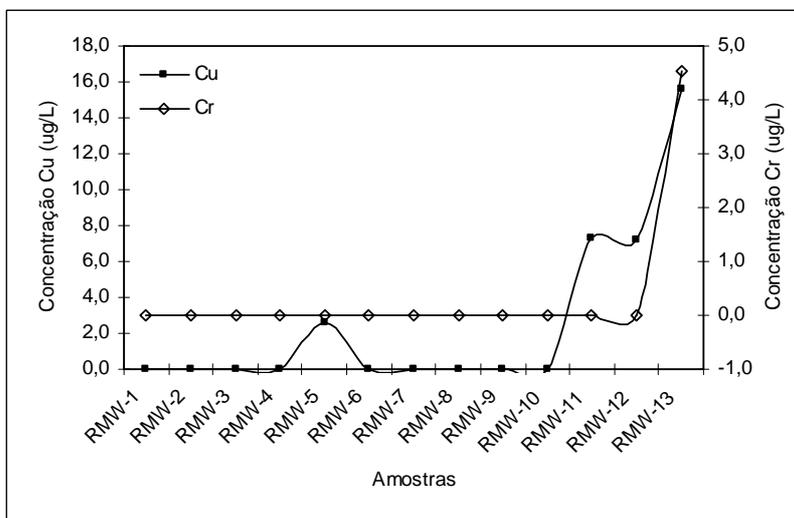


Figura 13. Variabilidade do Cu e Cr ao longo do rio Murucupi.

Foram analisados os seguintes elementos: alumínio, bário, cálcio, cádmio, cromo, cobre, ferro, potássio, magnésio, manganês, molibdênio, sódio, níquel, chumbo, estrôncio e zinco. Dentre esses elementos não foi possível detectar a presença de arsênio (LD=0,02 µg/L), cádmio (LD=0,66 µg/L) e molibdênio (LD=3,82 µg/L) nas águas estudadas. O cromo foi detectado apenas no ponto RMW-13 (4,55 µg/L).

De uma maneira geral, o comportamento dos elementos Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Ba, Mn, Sr, Zn, e Cu mantiveram-se constantes ao longo do rio aumentando consideravelmente nos pontos RMW-11, 12 e 13, esse comportamento é provavelmente devido à presença desses elementos nos efluentes industriais e domésticos lançados próximos a esses pontos e que foram incrementados pela ação da maré vazante ao longo dos últimos pontos selecionados. Ni e Pb tiveram comportamento diferenciado oscilando de valores abaixo do LD do elemento (<4,2µg/L para o Ni e <9,7µg/L para o Pb) até valores máximos de 8,1µg/L para o Ni no ponto RMW-3 e 15µg/L no ponto RMW-11 para o chumbo.

Em termos de média, o alumínio (356,0µg/L) e o ferro (1.080,0µg/L) apresentaram valores de concentrações 3,56 (Ni) e 3,60 (Fe) vezes maiores que o permitido pela resolução 357/05 do CONAMA (<100 e <300 µg/L respectivamente). Esses valores elevados demonstram que os despejos oriundos da produção de alumínio estão contribuindo para alterar a qualidade dos rios da Amazônia. O rio Murucupi é um dos afluentes do rio Pará (Vital et al., 1998) que banha a cidade de Belém e outras cidades da região com uma estimativa de mais de 2 milhões de habitantes que mais recentemente tem mostrado uma elevação dos teores de alumínio (1000,0µg/L) e ferro (575,0µg/L) devido a vazamentos de efluentes na área industrial de Barcarena (Pereira, 2007b).

A concentração de íons alumínio em águas naturais normalmente é pequena, tipicamente 27 µg/L. Esse baixo valor se deve ao fato de que em pH médio das águas naturais, de 6 a 9, a solubilidade do alumínio contido nas rochas e solos ao qual a água é exposta é muito pequena. A solubilidade do alumínio em águas é controlada pela solubilidade do $Al(OH)_3$, segundo a equação 3:



Conforme o equilíbrio da equação 3, percebe-se que a diminuição do pH das águas naturais provoca um aumento da concentração de íons alumínio na água. Portanto, o alumínio é mais solúvel em águas ácidas (pH < 6) do que aquele em que o pH não é menor que 6 ou 7 (Baird, 1999). O alumínio solubilizado nas águas dos rios que apresentam pH com caráter ácido, quando em contato com as guelras dos peixes provoca o aumento do pH e a formação do $Al_2(OH)_3$ pouco solúvel nas guelras, o que acaba por matar os peixes sufocados. Os valores encontrados neste trabalho para o alumínio são 13,2 vezes maiores que os valores normais encontrados em águas naturais (Schafer, 1985). Em tempos recentes, o temor quanto a ingestão de alumínio por humanos, por meio da água potável, deve-se a associação dele como a maior causa da doença de Alzheimer. Pesquisadores concluíram que o consumo de água com mais de 100 µg/L de alumínio, pode levar a danos neurológicos tais como perda de memória e pequeno aumento na possibilidade da incidência da doença de Alzheimer (Baird, 1999). Potencializa outros transtornos mentais, próprios da velhice, interfere na função do magnésio e está relacionado com a debilidade da mucosa digestiva e reduz a absorção do selênio e do fósforo (Lombardi et al., 2001). Sabe-se também que o efeito mais danoso das águas ácidas sobre os peixes se deve ao alumínio. Após ser solubilizado dos solos, ele existe como íon livre em águas ácidas, quando os íons hidróxido precipitam-se como gel nas

brânquias dos peixes, que são menos ácidas, dificultando a assimilação normal do oxigênio da água e sufocando os peixes (Baird, 1999).

O ferro em altas concentrações pode afetar a saúde humana, pois pode catalisar quimicamente a oxidação de lipídios e outras biomoléculas (Bast et al., 1991). O manganês quando inalado pode causar problemas no pulmão.

O manganês mostrou-se acima da resolução (<100 µg/L) nos pontos RMW-11, 12 e 13. Os elementos Al, Fe e Mn têm fonte definida no meio ambiente, pois fazem parte da geoquímica local, confirmada pelos resultados do estudo das correlações, não foi possível afirmar que a presença em excesso desses elementos está ligado somente ao efluente industrial despejado no rio Murucupi, entretanto, mesmo sem definir a verdadeira origem dos elementos, pode-se afirmar que em relação aos valores máximos permitidos para rios de classe 2, o rio Murucupi está contaminado por altas concentrações de alumínio e ferro em toda sua extensão e por manganês, em três pontos avaliados que recebem despejos de efluentes domésticos e efluentes industriais. Ba, Zn, Ni, Pb e Cu mantiveram as concentrações abaixo da resolução 357/05 do CONAMA (<1000, 180, 25, 30 e 20 µg/L) com valores condizentes com os de referência em águas doces superficiais. Ca, Mg, Na, K e Sr não possuem valores limites estabelecidos pelo CONAMA.

Como aconteceu com os parâmetros físico-químicos que variaram principalmente nos pontos RMW-11, 12 e 13 com forte influência dos despejos de efluentes domésticos e efluentes industriais e com a influência da maré, observou-se o mesmo comportamento para alumínio, ferro e manganês no ponto RMW-12 com concentração de 1.186,0 µg/L, 4.183,2 µg/L e 194,3 µg/L, respectivamente. Observou-se que o ferro começou a apresentar altas concentrações quando do início da vazante da maré, o incremento foi de 5,6%, chegando a atingir um incremento de 328,69% no ponto RMW-12 em relação ao início da maré vazante, mostrando assim a influência da intrusão da maré como agente purificador dos corpos hídricos.

No estudo da variabilidade dos resultados, excluindo-se o zinco, níquel, chumbo, cobre e cromo que apresentaram valores abaixo do limite de detecção, de acordo com o cálculo do coeficiente de variação, observou-se que o sódio foi o elemento com maior variabilidade (160,2%), seguido do potássio (157,28%) e manganês (100,9%). O magnésio foi o elemento que menos variou (41,1%), seguido do estrôncio (54,5%) e cálcio (64,3%). Ferro (87,3%), alumínio (74,2%) e bário (75,0%) apresentaram variação média. As altas variações apresentadas foram devidas aos altos valores obtidos nos pontos RMW-11, 12 e 13. O lançamento dos efluentes industriais e domésticos no rio Murucupi, oriundos de tubulações clandestinas no interior da floresta, ocasionou a variação observada. As características do efluente podem ocasionar a solubilização de alguns elementos que apresentaram concentrações acima da esperada para água superficial de rios amazônicos (Tabela 7).

Em termos de média, os valores encontrados para o rio Murucupi estiveram todos acima dos valores encontrados em outros rios do estado do Pará, com exceção do bário (1,2 vezes < que a média) e cromo (1,8 vezes < que a média) únicos elementos apresentarem concentração menor que a média encontrada em outros rios. Os elementos que apresentaram os maiores teores em relação à média dos outros rios foram: sódio (3,5 vezes > que a média), alumínio (3,1 vezes > que a média) e ferro (2,6 vezes > que a média), todos associados à composição química da lama vermelha. Metais pesados como níquel (2,0 vezes > que a média), zinco (1,7 vezes > que a média), cobre (1,3 vezes > que a média) e chumbo (1,1 vezes > que a média), encontram-se acima da média de outros rios do estado do Pará. Esses resultados mostram que o rio Murucupi está sendo contaminado sistematicamente pelos efluentes lançados em suas

águas e devido aos altos teores de alumínio e ferro suas águas não são recomendadas para uso sem tratamento.

Na Figura 14, são mostradas as correlações existentes entre os elementos químicos avaliados no rio Murucupi.

Tabela 7. Concentração dos elementos químicos nos rios do estado do Pará (µg/L).

	<i>Al</i>	<i>As</i>	<i>Ba</i>	<i>Ca</i>	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>
CONAMA	100	10	700	-	1	50	9	300
Rio Pará ^a	110,2	4,2	-	-	-	-	4,7	-
Rio Xingu ^b	54,6	4,1	47,9	4391,7	-	0,6	0,8	508,6
Rio Tapajós ^c	280,0	-	2,5	1670,0	-	-	-	564,9
Rio Tocantins ^d	21,3	-	40,9	3557,4	0,1	0,8	0,2	191,5
Rio Murucupi ^e	356,0	-	26,4	3869,8	-	0,4	2,5	1080,8
Mín. rio Pará ^a	-	-	-	-	-	-	-	-
Mín. rio Xingu ^b	9,1	-	1,0	303,2	-	-	-	4,7
Mín. rio Tapajós ^c	47,6	-	-	210,2	-	-	-	113,6
Mín. rio Tocantins ^d	1,5	-	17,9	2320,6	-	-	-	22,9
Mín. rio Murucupi ^e	202,3	-	14,6	2282,8	-	-	-	574,4
Máx. rio Pará ^a	290,9	7,0	-	-	-	-	8,9	-
Máx. rio Xingu ^b	792,4	62,2	93,8	114410,0	0,2	19,1	12,7	2426,8
Máx. rio Tapajós ^c	788,1	-	4,6	7066,0	-	-	-	1000,2
Máx. rio Tocantins ^d	64,9	-	104,2	5162,3	0,7	2,9	3,0	1170,4
Máx. rio Murucupi ^e	1186,0	-	76,7	9968,5	-	4,6	15,6	4183,2
	<i>K</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Na</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Sr</i>	<i>Zn</i>
CONAMA	-	-	100	-	25	10	-	180
Rio Pará ^a	-	-	38,1	-	-	6,3	-	17,2
Rio Xingu ^b	1087,8	1299,0	21,2	1814,4	0,1	0,4	15,7	5,4
Rio Tapajós ^c	-	471,6	12,0	-	-	-	12,1	-
Rio Tocantins ^d	-	1592,1	32,9	2408,6	2,3	0,7	30,6	1,4
Rio Murucupi ^e	2544,0	1249,8	57,7	7363,2	2,4	2,8	23,1	13,3
Mín. rio Pará ^a	-	-	-	-	-	-	-	-
Mín. rio Xingu ^b	242,4	265,9	7,4	45,9	-	-	2,0	-
Mín. rio Tapajós ^c	-	261,2	2,2	-	-	-	2,9	-
Mín. rio Tocantins ^d	-	1300,6	4,1	1653,5	-	-	21,0	-
Mín. rio Murucupi ^e	911,6	942,7	15,0	1906,7	-	-	14,2	-
Máx. rio Pará ^a	-	-	108,1	-	-	13,4	-	52,2
Máx. rio Xingu ^b	2076,8	23834,3	66,2	5288,1	2,9	3,5	32,4	83,1
Máx. rio Tapajós ^c	-	1226,3	23,0	-	-	-	42,6	-
Máx. rio Tocantins ^d	-	2095,3	230,4	5592,8	11,6	17,8	52,5	16,5
Máx. rio Murucupi ^e	15056	2495,4	194,3	42990,0	8,1	15	51,9	100,7

^a (Pires, 2005); ^b (Freitas, 2005); ^c (Costa, 2006); ^d (Pereira, 2007a); ^e (estudo atual).

Analisando-se o cálculo das correlações entre os elementos, observa-se que cálcio e magnésio têm excelente correlação ($r > 0,8$) com bário, sódio, potássio, manganês e estrôncio, e boa correlação ($0,6 < r < 0,8$) com alumínio. Sódio e potássio apresentam boa correlação com bário e manganês e excelente correlação com cálcio, magnésio e estrôncio. Manganês apresentou excelente correlação com alumínio, cálcio, magnésio e estrôncio, e boa correlação com bário, ferro, sódio e potássio. O alumínio apresenta excelente correlação com ferro e

manganês, além de boa correlação com cálcio, magnésio e estrôncio, e apenas regular correlação com bário ($0,4 < r < 0,6$).

Já o ferro apresentou excelente correlação com alumínio e boa correlação com o manganês. A correlação do ferro com o manganês se deve a forma semelhante com que ambos reagem no ambiente aquático. O ferro precipita-se principalmente como carbonato, sulfeto e hidróxido, e solubiliza-se como bicarbonato, isso se aplica ao manganês no ambiente aquático. Além do fato de que a oxidação de ferro e manganês é utilizada como fonte de obtenção de energia para as bactérias do gênero *Leptothrix*, *Crenothrix polyspora*, *Gallionella*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Ferrobacillus ferrooxidans* e *Metallogenium*, que metabolizam a matéria orgânica complexada a esses elementos (Baird, 1999).

Destaca-se a excelente correlação entre alumínio e ferro, uma vez que eles estão presentes em grande quantidade no resíduo do processamento da bauxita (lama vermelha).

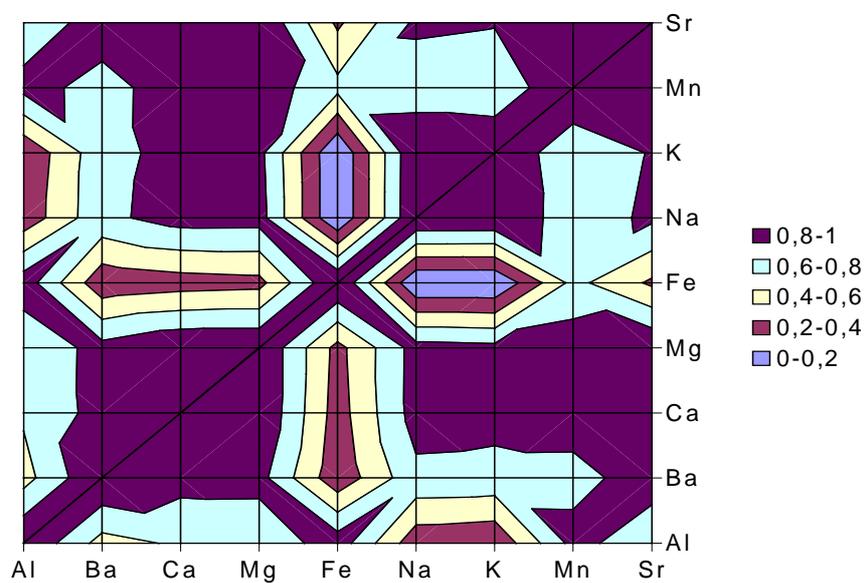


Figura 14. Correlações entre os elementos analisados.

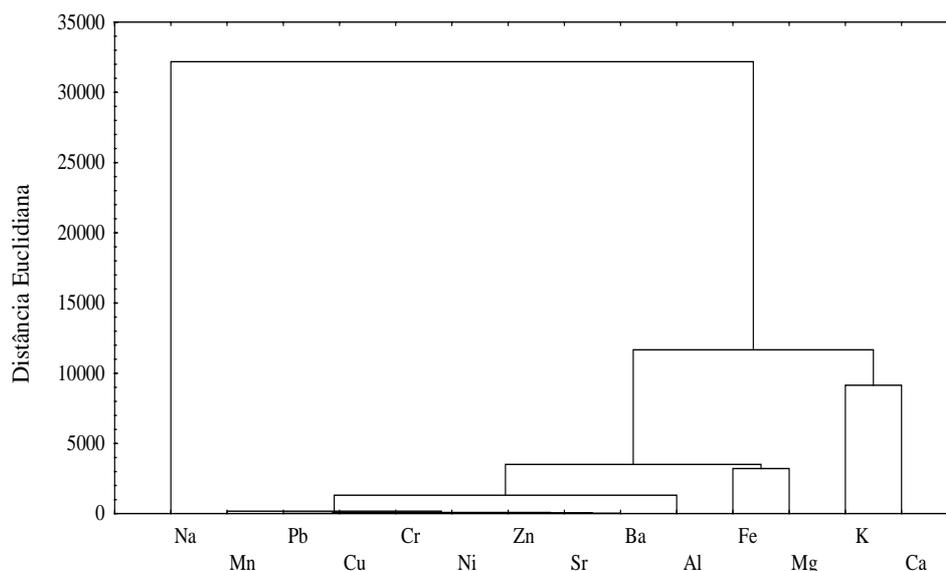


Figura 15. Dendrograma dos elementos químicos.

Quanto às similaridades entre os elementos químicos, obtidas da análise do dendrograma (Figura 15), observou-se que as melhores similaridades foram entre os elementos Mn, Pb, Cu, Ca, Ni, Zn, Sr e Ba. O sódio se isolou dos demais elementos com uma indicação de que a presença desse elemento está associado a efluentes ricos em NaOH usado no tratamento da bauxita visando à extração da alumina. Há relatos da população de vazamentos constantes de um material de aspecto vermelho que mata os peixes do rio e causa problemas a saúde da população local.

4. CONCLUSÃO

Considerando que a coleta foi realizada em período de estiagem (setembro), a contribuição do intemperismo, por meio da lixiviação de terrenos, é menos intensa. Nessa época, as águas oceânicas pluviais modificam sazonalmente a composição das águas superficiais do sistema estudado, principalmente pela influência das marés e pelos ciclos hidrogeológicos (enchente, vazante, fluxo, etc).

O teor de eletrólitos encontrados (cálcio, magnésio, sódio e potássio), o pH ácido (4,4 a 6,2), a baixa condutividade elétrica e a pobreza de íons cálcio e magnésio são característicos da região geoquímica amazônica. Isso, também, pode-se dizer dos teores de alumínio e ferro que podem se originar tanto a partir das rochas que contêm esses elementos, assim como da influência da poluição provocada pelo homem.

O aumento do teor de sódio, potássio e manganês podem estar associados a processos hidrogeoquímicos, assim como o intemperismo e também o efluente que é despejado no rio. Deve-se considerar também a intensificação dessas observações quando tem início a vazante da maré, do ponto RMW-9 a 13. O ponto RMW-12, apesar de ser uma das nascentes do rio, não pode ser considerado como área preservada, devido à proximidade da área industrial e urbana da região em estudo.

Os parâmetros físico-químicos, na maioria dos casos, apresentaram variações significativas apenas quando teve início a vazante da maré, na qual a influência dos efluentes domésticos e industriais pode ser mais bem observada.

Alguns elementos obtiveram valores de concentrações maiores que o permitido pelo CONAMA, dentre eles o alumínio e o ferro apresentaram-se na totalidade dos pontos analisados e o manganês em três pontos, tendo fonte definida no meio ambiente pois fazem parte da geoquímica local, e em efluentes oriundos de uma indústria produtora de alumina ou pela ação deste sobre as rochas que contêm esses metais, além da ação do intemperismo. A presença dos elementos alumínio e ferro, principalmente, podem causar danos à saúde da população que utiliza a água do rio Murucupi sem tratamento convencional necessitando um cuidado no consumo indiscriminado dessa água.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da Eletronorte, CNPq e ao Programa de Pós-Graduação em Química da UFPA.

6. REFERÊNCIAS

BAIRD, C. *Environmental Chemistry*. 2. ed. Ontario: University of Western Ontario, 1999. 557 p.

- PEREIRA, S. F.; LIMA, M. A.; FREITAS, K. H.; MESCOUTO, C. S.; SARAIVA, A. F. Estudo químico ambiental do rio Murucupi – Barcarena, PA, Brasil, área impactada pela produção de alumínio. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 2, n. 3, p. 62-82, 2007. (doi:10.4136/ambi-agua.34)
-
- BAST, A.; HAENEN, G. R. M. M.; DOELMAN, C. J. A. Oxidants and antioxidants: state of the art. **The American Journal of Medicine**, v. 91, p.3C-25-3C-135, 1991.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução 357 de 17 de Março de 2005**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 12 setembro 2007.
- CHAPMAN, D.; KIMSTACH, V. Selection of water quality variables. In: **Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring**. 2ª. ed. Behalf of UNESCO, WHO and UNEP. London: E & FN Spon, 1992.
- CLARISSE, M. D.; AMORIM, M. C. V.; LUCAS, E. F. Despoluição ambiental: uso de polímeros na remoção de metais pesados. **Rev. de Química Industrial**, v. 715, p. 16-24, 1999.
- COSTA, A. A. **Qualidade dos recursos hídricos da Amazônia rio Tapajós**: avaliação de caso em relação aos elementos maiores, menores e traço. 87f. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Licenciatura em Ciências) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência, 1988. 575 p.
- FREITAS, K. H. **Estudo ambiental das águas superficiais na região denominada Volta Grande do Xingu**. 149f. 2005. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dados da população do município de Barcarena-Pa** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/universo.2000>>. Acesso em: 20 ago. 2007.
- LIMA, W. N.; KOBAYASHI, C. N. Sobre o quimismo predominante nas águas do sistema flúvio-estuarino de Barcarena, Pa, **Geochimica Brasiliensis**, v. 2, n.1, p.53-71, 1988.
- LOMBARDI, J. V.; BROSSI'GARCIA, A. L.; MACHADO NETO, J. G.; MARQUES, H. L. A.; KUBO, E. Metais Tóxicos - Poluição à mesa., **Revista Brasileira de Toxicologia**, v. 35, p. 41, 2001.
- MUÑOZ, E.; PALMERO, S.; GARCÍA-GARCÍA, M. A. A Continuous flow system design for simultaneous determination of heavy metals in river water samples. **Talanta**, v. 57, p. 985-992, 2002.
- NUNN, R. F. Advances in Red Mud dewatering and disposal technologies. **Light Metals**, ISBN: 0-87339-390-2, p. 107-113, fevereiro, 1998.
- PEREIRA, S. F. P. **Estudo hídrico da represa de Tucuruí com ênfase aos aspectos químicos, biológicos, sócio-ambiental e estatísticos**. Brasília: ANEEL, 2007a. 310 p. (Relatório de projeto).
- _____. **Estudo preliminar dos níveis de contaminação ambiental provocado por vazamento de efluente da Imerys Rio Capim Caulim na região de Vila do Conde - Barcarena/PA**. Belém: LAQUANAM/ DEMA 2007b. 89 p.

PEREIRA, S. F.; LIMA, M. A.; FREITAS, K. H.; MESCOUTO, C. S.; SARAIVA, A. F. Estudo químico ambiental do rio Murucupi – Barcarena, PA, Brasil, área impactada pela produção de alumínio. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 2, n. 3, p. 62-82, 2007. ([doi:10.4136/ambi-agua.34](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.34))

PIRES, O. O. **Caracterização de elementos traço nas águas superficiais da foz do rio Amazonas**. 116f. 2005. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

SALGADO, P. E. T. Metais em alimentos. In: OGA, S. **Fundamentos de toxicologia**. São Paulo: Atheneu, 1996. p. 443-460, 1996. cap. 5.2.

SALOPEK, B.; STRAZISAR, J. The influence of Red Mud impoundments on the environment. **Light Metals**, ISBN: 0-87339-197-7 p. 41-44, fevereiro, 1993.

SANTOS, P. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. vol. 1.

SCHAFFER, A. **Fundamentos de ecologia e biogeografia das águas continentais**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985.

VITAL, H.; STATTEGGER, K.; POSEWANG, J.; THEILEN, F. Lowermost Amazon River: morphology and shallow seismic characteristics. **Marine Geology**, v. 152, p. 277-294, 1998.

YABE, M. J. S.; OLIVEIRA, E. de. Metais pesados em águas superficiais como estratégia de caracterização de bacias hidrográficas. **Química Nova**, v. 21, n. 5, p. 551-556, 1998.