

Qualidade das águas superficiais e avaliação do estado trófico do Rio Arari (Ilha de Marajó, norte do Brasil)

Igor Charles Castor ALVES¹, Maâmar EL-ROBRINI^{1,2}, Maria de Lourdes Souza SANTOS³, Sury de Moura MONTEIRO^{1,2}, Leandro Patrick Ferreira BARBOSA¹, José Tasso Felix GUIMARÃES^{1,4}

RESUMO

A deterioração da qualidade da água pode ser causada tanto por resultado da pressão antrópica sobre os ambientes aquáticos em maiores escalas, como por fatores naturais em menores escalas, tal como ocorre em parte da bacia hidrográfica do Rio Arari (Ilha de Marajó, Pará). Este artigo teve como objetivo a avaliação da qualidade das águas superficiais e o estado trófico do Rio Arari, no trecho entre Santana e Cachoeira do Arari, considerando as variações temporais e espaciais de variáveis físicas, químicas e biológicas da água em dois períodos hidrológicos distintos de 2009: descarga máxima (abril e maio) e descarga mínima (setembro e novembro). Os Índices de Qualidade da Água (IQA) e Estado Trófico (IET) foram determinados simultaneamente em amostras de água superficial durante 12 horas consecutivas nas três estações de coleta ao longo do Rio Arari. Os valores do IQA variaram entre “Ruim” e “Regular”, e estão provavelmente relacionadas aos elevados níveis de coliformes fecais, baixas concentrações de oxigênio dissolvido e pH ácido do Rio Arari. Conforme o IET, o rio pode ser classificado como supereutrófico e hipereutrófico, reflexo da grande disponibilidade de nutrientes (e.g. fósforo) e elevada biomassa fitoplanctônica em termos de clorofila *a*. O Rio Arari está sob um processo de eutrofização natural, visto que as fontes de contaminação antrópica ainda são incipientes, mas elas podem contribuir para um processo de longo prazo de eutrofização artificial.

PALAVRAS-CHAVE: Eutrofização, Índices de qualidade da água, Índice de estado trófico, Hidroquímica.

Surface water's quality and trophic status assessment in the Arari River (Marajo Island, Northern Brazil)

ABSTRACT

The deterioration of the water quality may be caused either by the result of human pressure on aquatic environments in larger scales, or by natural factors in smaller scales, such as part of the Arari River basin (Marajó Island, Pará state, Brazil). This work aimed to evaluate the surface water's quality and the trophic state of the Arari River, between *Santana* and *Cachoeira do Arari* localities, taking into account the seasonal and spatial variations of physical, chemical and biological parameters in two different hydrological periods in 2009: the maximum discharge (April to May) and minimum discharge (September to November). The Water Quality Index (WQI) and Trophic State Index (TSI) were determined simultaneously in water surface's samples collected during 12 consecutive hours in three stations along the Arari River. The WQI data ranged from “Poor” and “Regular” and are probably related to the high levels of fecal coliform, low concentrations of dissolved oxygen and acid pH of the Arari River. Regards the TSI, the river may be classified as “supereutrophic” and “hipereutrophic”, indicating the wide availability of nutrients (e.g. phosphorus) and high phytoplankton biomass in terms of chlorophyll *a* content. The Arari River is under a natural eutrophication, since the sources of anthropic contamination are still incipient, although they may contribute to the long-term process of artificial eutrophication.

KEYWORDS: Eutrophication, Water Quality Index (WQI), Trophic State Index (TSI), Hydrochemistry.

¹ Instituto de Geociências, Programa de pós graduação em Geologia e Geoquímica e Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros – Universidade Federal do Pará. igorcharles@ufpa.br; lpfbarbosa@hotmail.com

² Faculdade de Oceanografia – Universidade Federal do Pará. robrini@ufpa.br; surymonteiro@yahoo.com.br

³ Instituto Sócio Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade Federal Rural da Amazônia. mdlssantos@yahoo.com.br

⁴ Laboratório de Dinâmica Costeira – Universidade Federal do Pará. tasso_guimaraes@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Os cursos d'água das regiões metropolitanas, em várias partes do mundo, estão sob o impacto das diversas atividades antrópicas recorrentes em suas inúmeras drenagens, caso das cidades de Manaus (Horbe *et al.* 2005) e Belém (Braz e Mello 2006), áreas nas quais o imenso aporte de efluentes domésticos e industriais causa a degradação destes cursos d'água. Por outro lado, em outras regiões Amazonicas afastadas de áreas urbanas, ainda não foram constatados os efeitos deste antropismo ou o mesmo ainda é incipiente (Silva *et al.* 2008; Queiroz *et al.* 2009).

A deterioração da qualidade da água pode ser causada tanto por resultado da pressão antrópica sobre os ambientes aquáticos, em maior escala, como por fatores naturais, em menor escala, como ocorre em parte da bacia hidrográfica do Rio Arari, ilha de Marajó-Pará, onde a única área relativamente urbanizada existente corresponde à cidade de Cachoeira do Arari.

Nesta região as principais atividades econômicas são o turismo, a pecuária bovina e bubalina e extrativismo vegetal (Souza 2009; IBGE 2000). Na Ilha de Marajó a pecuária se tornou uma atividade tradicional, já que o estabelecimento das fazendas às margens do Rio Arari datam de 1680. Nestas fazendas a bubalinocultura é tida como principal atividade pecuária da região, o que equivale a 62% da produção do Estado do Pará e 24% da nacional (Barbosa 2005; IBGE 2000).

O Rio Arari recebe a contribuição das drenagens que passam por estas áreas de fazenda e de cultivo e que, provavelmente, contribuem com grande parte dos nutrientes que sustentam a elevada produtividade do Rio Arari, representada pela grande disponibilidade pesqueira além de ricas comunidades de mamíferos e macrófitas aquáticas.

Diversas famílias estabelecidas nas margens do Rio Arari retiram dele seu sustento e utilizam a água em inúmeras atividades (doméstica, agrícola, pesca, entre outras). Do total de 15.745 moradores da cidade de Cachoeira do Arari, 1.279 destinam seu lixo ao rio, 1.161 destinam a ele seu esgoto sanitário e 2.201 utilizam suas águas (IBGE 2000).

Para garantir a ingestão de uma substância que não seja nociva à saúde da população dependente do Rio Arari, a qualidade da água deve ser analisada através de diversas variáveis físicas, químicas e biológicas. Na avaliação da qualidade da água e grau de eutrofização de um corpo hídrico são utilizados Índices de Qualidade da Água (IQA) e Estado Trófico (IET) que determinam a possibilidade de utilização da água para abastecimento público, o enriquecimento por nutrientes e efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas ou proliferação de macrófitas (e.g. Maier 1987; Esteves 1998; Tavares 2005; CETESB 2006). O IQA é um índice

que dá relevância a poluição por esgoto doméstico, que é a principal fonte de poluição nas bacias hidrográficas. A área deste estudo é formada predominantemente por campos naturais e a poluição por esgoto doméstico no Rio Arari ainda pode ser considerada pequena. Dessa maneira, consideramos aplicar o IQA no Rio Arari e verificar a sua aplicabilidade neste ambiente amazônico.

Este trabalho apresenta a avaliação da qualidade das águas superficiais e do estado trófico do Rio Arari, no trecho entre Santana e Cachoeira do Arari, considerando as variações temporais e espaciais.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Configurações Fisiográficas

A área de estudo está localizada na porção leste da ilha do Marajó, norte do Brasil (Figura 1 a,b). Esta região é representada morfoestruturalmente pelo planalto rebaixado e planície Amazonica (Barbosa *et al.* 1974). O planalto rebaixado abrange o centro sul da ilha, e a planície corresponde ao setor leste e consiste em planícies colmatadas por sedimentos holocênicos e inseridas no domínio morfoclimático das planícies inundáveis cobertas por campos herbáceos/arbustivos e manguezais (Figura 1 b,c). A vegetação da ilha de Marajó é composta pela Floresta Ombrófila Densa Aluvial e das Terras Baixas na porção leste, savana arborizada, campos herbáceos inundáveis e manguezal restritos a oeste. A vegetação secundária predomina nas áreas utilizadas para atividades agrossilvopastoris (Figura 1 b,c).

A ilha de Marajó apresenta um sistema hidrográfico ocidental composto por diversas drenagens que são interligadas durante o período chuvoso e um sistema oriental representado pelas bacias dos rios Paracauari, Camará, Afuá e Arari. A bacia do Rio Arari é do tipo exorréica, possui extensão de 118 km desde a nascente no lago Arari até a foz no estuário do Rio Pará (Baía de Marajó) e área de 864 km², o Rio Arari apresenta meandramentos comprimidos, principalmente no extremo norte e noroeste da bacia e grada à jusante, para canais retilíneos (Souza e Rossetti 2009).

Clima e parâmetros estuarinos

O regime de chuvas na bacia hidrográfica do Rio Arari é dividido em dois períodos hidrológicos distintos: período chuvoso (> vazão), entre dezembro e maio, com precipitação média de 1799 mm e índices maiores entre fevereiro e maio, que representa 81.5% do total pluviométrico anual e um período menos chuvoso (< vazão) de junho a novembro, com os índices menores entre setembro e novembro e média de 407 mm de chuva, equivalente a 18.5% do total anual (Reis 1972; IDESP 1974). Este comportamento climático e

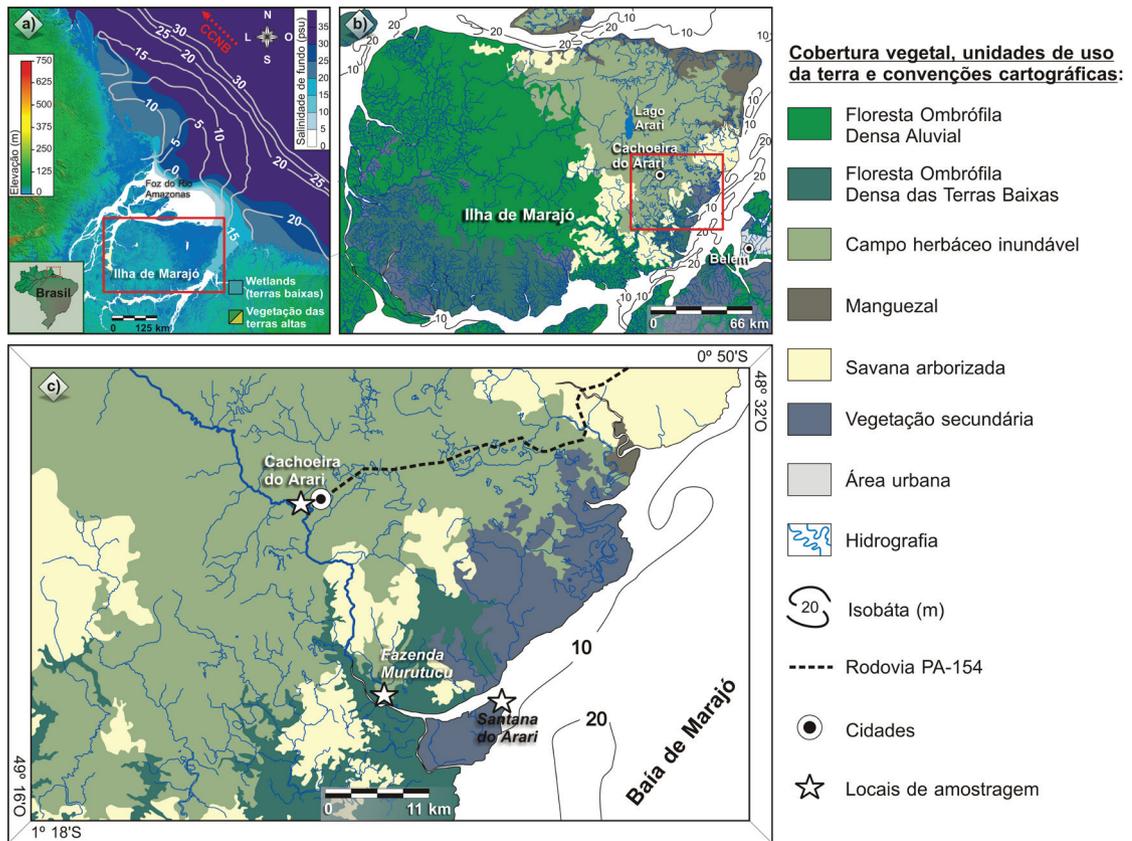


Figura 1- Mapa de Localização da área de estudo e das estações de amostragem no Rio Arari: (P1) Santana do Arari (foz), (P2) Fazenda Murutucú e (P3) Cachoeira do Arari.

hidrológico é similar aos demais rios da ilha de Marajó e Rio Amazonas (Figura 2).

Os estuários do Amazonas e Pará apresentam um regime de macromaré semidiurna (Dyer 1997), com amplitudes de 4 a 6 m (Gabioux *et al.* 2005; Gallo e Vinzon 2005). A descarga destes rios e as condições hidrodinâmicas permitem uma redução forte da salinidade da água ao longo de todo o estuário e costas adjacentes (Figura 1a; Vinzon *et al.* 2008; Santos *et al.* 2008; Rosário *et al.* 2009).

Amostragem de campo e procedimentos de laboratório

Quatro campanhas foram realizadas no Rio Arari em 2009 com duas no período de descarga máxima (08 de abril e 24 de maio) e duas no período de descarga mínima (20 de setembro e 02 de novembro). No trecho do Rio Arari compreendido entre Santana e Cachoeira do Arari (43,7 km de comprimento) foram distribuídas três estações de coleta, com o objetivo de avaliar a qualidade da água ao longo do rio Arari, em pontos livres de lançamentos diretos de esgoto: (P1) na foz do Rio Arari em Santana do Arari ($1^{\circ}12'3.16''S$;

$48^{\circ}45'47.32''W$) e (P2) na sede da Fazenda Murutucú ($1^{\circ}10'13.94''S$; $48^{\circ}53'37.71''W$) e um ponto sob influência dos lançamentos de esgoto (P3) na cidade de Cachoeira do Arari ($1^{\circ}0'31.95''S$; $48^{\circ}57'46.15''W$) (Figura 1c).

Em cada ponto foi instalada uma régua limnimétrica, com o objetivo de identificar os momentos de enchente e vazante da maré, sendo feitas medições a cada 15 minutos, durante 12 horas. As coletas foram realizadas simultaneamente nas três estações de coleta de hora em hora durante o período de 12 horas (um ciclo de maré) para observar as alterações provocadas pelas marés enchente e vazante em condições de maré de sizígia.

As coletas foram feitas na camada superficial da água, com garrafa de van Dorn, armazenadas em frascos de polietileno de 500 mL, refrigeradas a $4^{\circ}C$ e protegidas contra a luz, para posterior filtração. Em campo foram obtidos dados de temperatura, pH e condutividade elétrica mediante uso de medidor multiparâmetros HANNA HI-9828. Para determinação do teor do oxigênio dissolvido (OD) foi utilizado o método de Winkler descrito em Strickland e Parsons (1972).

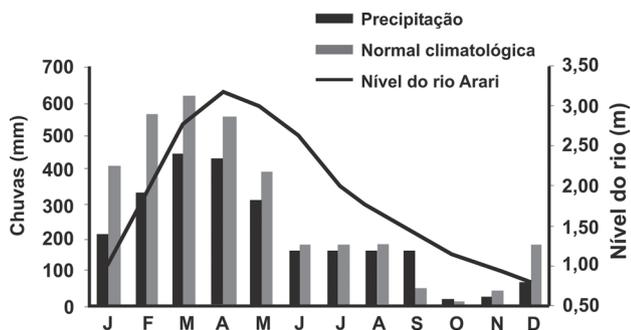


Figura 2 - Variação da precipitação acumulada mensal (2009), normal climatológica no município de Soure e variação sazonal do nível da água no Rio Arari (dados médios mensais obtidos em Cachoeira do Arari, no período de 1952 à 1971). Fonte: (IDESP, 1974; INMET, 2010).

Os dados de clorofila *a* foram obtidos conforme Teixeira (1973), sólidos totais pelo método de APHA (1995), turbidez com turbidímetro HACH-2100P, concentrações de fósforo total e nitrogênio total de acordo com Grasshoff *et al.* (1983). A precisão de nitrogênio total e fósforo total foi de $\pm 0,02$ e $0,01 \mu\text{mol}$, respectivamente, e a reta de calibração com valores de $R^2 = 0,998$ para o NT e de $0,999$ para o PT. Os coliformes fecais foram feitos segundo Colilert (APHA 1995).

Índice de Qualidade da Água (IQA)

O IQA foi calculado pelo produto ponderado da qualidade da água correspondente as variáveis: temperatura da amostra, pH, OD, demanda bioquímica de oxigênio ($\text{DBO}_{5,20}$ - 5 dias, 20°C), coliformes fecais, nitrogênio total, fósforo total, sólidos totais e turbidez (CETESB 2003).

Os indicadores de qualidade da água, a partir do IQA são: ótima ($80 \leq \text{IQA} \leq 100$), boa ($52 \leq \text{IQA} \leq 80$), regular ($37 \leq \text{IQA} \leq 52$), ruim ($20 \leq \text{IQA} \leq 37$) e péssima ($0 \leq \text{IQA} \leq 20$) (CETESB, 2003).

Índice de Estado Trófico (IET)

O Índice do Estado Trófico é composto pelo Índice do Estado Trófico para o fósforo - IET (PT) e o Índice do Estado Trófico para a clorofila *a* - IET (CL), modificados por Lamparelli (2004) e estabelecidos para ambientes lóticos conforme as equações:

$$\text{IET (CL)} = 10 \times (6 - ((-0,7 - 0,6 \times (\ln \text{CL})) / \ln 2)) - 20$$

$$\text{IET (PT)} = 10 \times (6 - ((0,42 - 0,36 \times (\ln \text{PT})) / \ln 2)) - 20$$

Onde:

PT é a concentração de fósforo total medida à superfície da água, em $\mu\text{g.L}^{-1}$;

CL é a concentração de clorofila *a* medida à superfície da água, em $\mu\text{g.L}^{-1}$;

ln é o logaritmo natural.

Os limites estabelecidos para as diferentes classes de trofia para rios são: ultraoligotrófico ($\text{IET} \leq 47$), oligotrófico ($47 < \text{IET} \leq 52$), mesotrófico ($52 < \text{IET} \leq 59$), eutrófico ($59 < \text{IET} \leq 63$), supereutrófico ($63 < \text{IET} \leq 67$) e hipereutrófico ($\text{IET} > 67$).

O IET final foi à média aritmética simples dos índices anuais relativos ao fósforo total e a clorofila *a*.

Análises estatísticas

Os dados obtidos foram analisados pelos métodos de estatística descritiva (Box-plot) e estatística multivariada (Análise de Componentes Principais-ACP). São apresentadas as principais correlações entre as variáveis e entre parênteses seus respectivos *loadings*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Distribuição dos parâmetros de qualidade de água no Rio Arari.

As paisagens da região de campos da ilha de Marajó são sujeitas as mudanças temporais em função do regime pluviométrico e hidrológico. No período chuvoso ocorre a interligação das redes de drenagem, transformando a área de estudo em um campo inundado. Assim a descarga fluvial do Rio Arari aumenta e impede que a maré semidiurna atinja a cidade de Cachoeira do Arari. Dessa forma, o rio segue um fluxo unidirecional em direção a Santana do Arari. O nível da água do rio sobe e não é registrado o refluxo de vazante. Durante o período menos chuvoso ocorre aumento do prisma de maré devido à diminuição do influxo fluvial. Então, a maré dinâmica avança a montante do Rio Arari e o regime de fluxo apresenta um fluxo bi-direcional, característico dos movimentos de enchente e vazante da maré. Estas marés são do tipo semi-diurnas e apresentam diferentes amplitudes ao longo do rio. Baseado na classificação de Davies (1964), entre Santana do Arari e fazenda Murutucu ocorrem meso-marés (2-4 m), enquanto que em Cachoeira do Arari as micro-marés (1-2 m) são predominantes.

Desta forma, o Rio Arari apresenta duas fases hidrodinâmicas distintas com regime dinâmico baixo durante o período chuvoso e regime dinâmico alto durante o menos chuvoso. Conseqüentemente, diferentes padrões de distribuição temporal podem ser observados para os parâmetros de qualidade da água e estados tróficos avaliados no Rio Arari.

A temperatura da água no Rio Arari (Figura 3a) variou entre $27,0^\circ\text{C}$ no período chuvoso e $31,1^\circ\text{C}$ no menos chuvoso (Tabela 1). A temperatura das águas superficiais do Rio Arari é característica de um ambiente amazônico, onde a amplitude de variação diária é maior do que a amplitude sazonal. As menores temperaturas da água ocorrem em

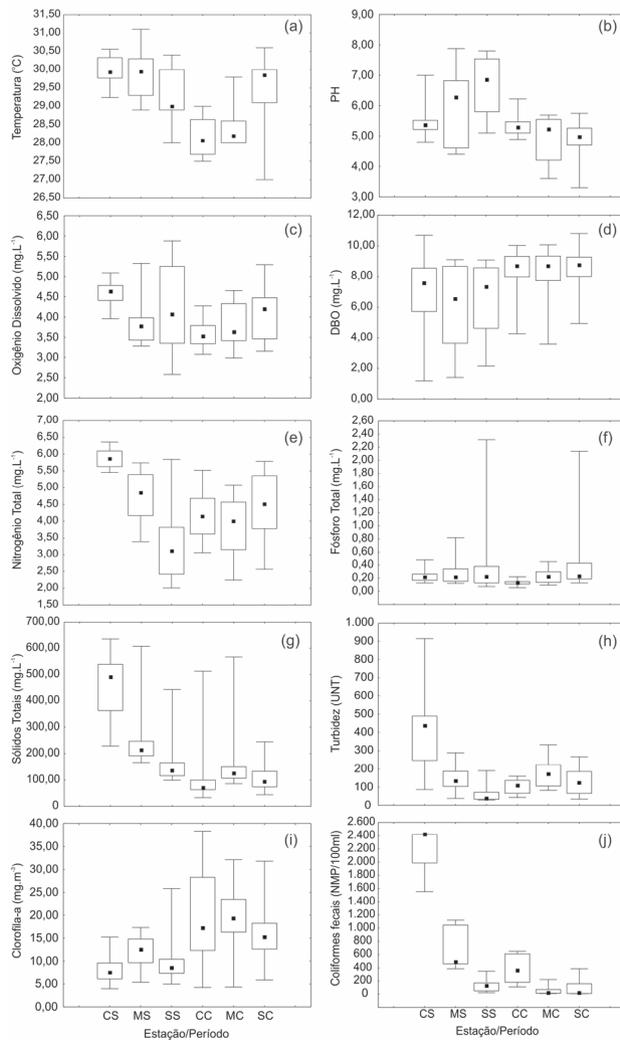


Figura 3 - Distribuição espacial e sazonal dos parâmetros: temperatura (a), pH (b), OD (c), DBO₅ (d), NT (e), PT (f), ST (g), turbidez (h), Clorofila-a (i) e Coliformes fecais (j) obtidos no Rio Arari durante os períodos chuvoso e menos chuvoso do ano de 2009. (CS) - Cachoeira menos Chuvoso, (MS) - Murutucú menos Chuvoso, (SS) - Santana menos Chuvoso, (CC) - Cachoeira Chuvoso, (MC) - Murutucú Chuvoso e (SC) - Santana Chuvoso.

função da cobertura de nuvens, praticamente durante o dia todo e que não permite a incidência de raios solares sobre a superfície d'água, enquanto que no período menos chuvoso ocorrem mais horas de incidência solar e possibilita o aumento da temperatura. As temperaturas em Cachoeira do Arari e Murutucú apresentaram valores próximos de 28,0 °C e 28,2 °C, respectivamente; entretanto em Santana a temperatura registrada foi de 29,0 °C (Tabela 1), o que pode ser em função da cobertura vegetal, visto que Cachoeira do Arari e Murutucú apresentam maior área de campos abertos e vegetação de campos herbáceos inundáveis enquanto que em Santana ocorrem áreas de florestas, com vegetação secundária (Figura 1c).

Os valores de pH indicam águas ácidas, com medianas de 5,22 e 6,28, nos períodos chuvoso e menos chuvoso, respectivamente (Figura 3b). No período menos chuvoso, os valores da mediana revelam um gradiente crescente ao longo do rio (5,36; 6,28 e 6,85, Tabela 1) em Cachoeira (CS), Murutucú (MS) e Santana (SS), respectivamente, indicando que o pH é influenciado por águas ácidas provenientes do Rio Arari e águas relativamente alcalinas provenientes da baía de Marajó, que durante esse período recebe águas do Oceano Atlântico.

No período chuvoso as medianas (5,29; 5,22 e 4,97, Tabela 1) foram próximas nas três estações e ocorre a formação de um discreto gradiente de pH (Figura 3b). O pH das águas Amazonicas apresenta valores ácidos 4,7-5,5, pois é influenciado pela lixiviação dos solos ácidos e pela grande quantidade de matéria orgânica presente no ambiente, que se decompõe e forma ácidos orgânicos (Esteves 1998; Cunha e Pascoaloto 2006; Pinto *et al.* 2009).

As maiores concentrações de OD ocorreram durante o período menos chuvoso (Figura 3c), como o nível da água do rio diminui consideravelmente, favorece a entrada das marés semidiurnas e consequentemente o processo de oxigenação das águas do Rio Arari.

Os valores de DBO₅ (Figura 3d) apresentaram relação temporal inversa ao OD, com as maiores concentrações registradas no período chuvoso e a mediana variou em torno de 8,67 mg.L⁻¹. A distribuição dos valores de DBO₅ (> 6 mg.L⁻¹) foram muito próximos ao longo do rio e são indicativos que ocorre um equilíbrio entre o *input* e o consumo. A entrada de matéria orgânica pode ocorrer por meio de processos de ressuspensão ou por ação das marés altas que inundam as margens e carregam materiais orgânicos para o rio.

O nitrogênio total (NT) formou um gradiente negativo no período menos chuvoso (5,87 mg L⁻¹; 4,85 mg L⁻¹ e 3,11 mg L⁻¹, Tabela 1), em Cachoeira, Murutucú e Santana, respectivamente, esta distribuição indica que as maiores concentrações de NT ocorreram a montante do rio e diminuíram ao longo do seu percurso. No período chuvoso a distribuição do NT foi mais homogênea com valores próximos em Cachoeira, Murutucú e Santana, respectivamente (4,14 mg L⁻¹; 4,00 mg L⁻¹ e 4,52 mg L⁻¹). Santos (2004) detectou na camada eufótica, da foz do Rio Amazonas, o valor médio para o NT de 7,51 mg L⁻¹ e o máximo de 16,4 mg L⁻¹, valores estes bem elevados quando comparados aos do presente estudo.

Para o fósforo total a mediana nos dois períodos foi de 0,23 mg L⁻¹ (Figura 3f). Esta distribuição com os valores medianos próximos, ou seja, pouca variação nos valores do PT revela um *input* constante de PT o ano inteiro. Em Santana, foram registrados os valores máximos. Santos *et al.* (2006) registraram o valor máximo de 0,20 mg L⁻¹ de PT no lago água preta (Região Metropolitana de Belém). Este lago recebe

Tabela 1 - Número de valores (N), Mediana, (Min) mínimo, (Máx) máximo e desvio padrão (Desv Pad) dos parâmetros obtidos nas três estações de coleta ao longo do Rio Arari durante o período chuvoso e menos chuvoso do ano de 2009.

	PERÍODO CHUVOSO					PERÍODO MENOS CHUVOSO				
	N	Mediana	Mín	Máx	Desv Pad	N	Mediana	Mín	Máx	Desv Pad
CACHOEIRA DO ARARI										
pH	26	5,29	4,88	6,22	0,31	26	5,36	4,79	7,00	0,43
Temperatura (°C)	26	28,07	27,50	29,00	0,51	26	29,94	29,24	30,56	0,37
OD (mgL ⁻¹)	26	3,53	3,07	4,27	0,34	26	4,64	3,96	5,09	0,28
Turbidez (UNT)	26	108,25	42,60	160,00	39,92	26	438,00	85,90	914,00	225,26
ST (mgL ⁻¹)	26	71,50	33,00	513,00	102,28	26	491,00	229,00	635,00	103,93
NT (mgL ⁻¹)	26	4,14	3,06	5,52	0,68	26	5,87	5,45	6,36	0,25
PT (mgL ⁻¹)	26	0,13	0,06	0,22	0,04	26	0,21	0,13	0,48	0,08
Coliformes fecais(NMP)	7	365,40	109,00	648,80	214,64	7	2419,20	1553,10	2419,20	340,70
DBO (mgL ⁻¹)	26	8,68	4,20	10,04	2,10	26	7,22	1,17	10,69	2,62
Chl a (mgm ⁻³)	26	17,28	4,22	38,32	9,79	26	7,50	3,94	15,23	2,91
FAZENDA MURUTUCÚ										
pH	26	5,22	3,60	5,69	0,72	26	6,28	4,40	7,88	1,20
Temperatura (°C)	26	28,20	28,00	29,80	0,45	26	29,95	28,90	31,10	0,64
OD (mgL ⁻¹)	26	3,63	2,98	4,65	0,52	26	3,78	3,29	5,33	0,46
Turbidez (UNT)	26	172,50	81,65	331,00	76,48	26	135,00	37,00	288,00	61,09
ST (mgL ⁻¹)	26	125,50	86,00	567,00	123,48	26	214,50	166,00	607,00	83,09
NT (mgL ⁻¹)	26	4,00	2,24	5,08	0,89	26	4,85	3,39	5,74	0,73
PT (mgL ⁻¹)	26	0,23	0,09	0,45	0,11	26	0,22	0,12	0,82	0,15
Coliformes fecais(NMP)	7	23,00	9,80	220,00	75,51	7	488,40	387,30	1119,90	301,42
DBO (mgL ⁻¹)	26	8,70	3,60	10,07	1,45	26	6,54	1,41	9,10	2,60
Chl a (mgm ⁻³)	26	19,33	4,32	32,09	6,56	26	12,50	5,36	17,33	3,50
SANTANA DO ARARI										
pH	26	4,97	3,30	5,75	0,49	26	6,85	5,10	7,80	0,99
Temperatura (°C)	26	29,85	27,00	30,60	0,82	26	29,00	28,00	30,40	0,79
OD (mgL ⁻¹)	26	4,19	3,15	5,29	0,58	26	4,07	2,59	5,88	1,07
Turbidez (UNT)	26	123,10	34,00	266,00	69,63	26	38,61	28,80	190,00	34,51
ST (mgL ⁻¹)	26	93,00	44,00	245,00	53,43	26	137,00	99,00	444,00	77,50
NT (mgL ⁻¹)	26	4,52	2,56	5,78	1,01	26	3,11	2,01	5,84	0,99
PT (mgL ⁻¹)	26	0,23	0,13	2,14	0,38	26	0,23	0,07	2,31	0,43
Coliformes fecais(NMP)	7	21,80	6,20	387,30	141,87	7	130,00	22,10	350,00	109,23
DBO (mgL ⁻¹)	26	8,75	4,94	10,80	1,55	26	7,34	2,16	9,09	2,11
Chl a (mgm ⁻³)	26	15,24	5,85	31,77	6,30	26	8,53	4,98	25,81	4,15

uma grande descarga de esgotos domésticos e industriais da cidade (Santos *et al.* 2006a; Santos *et al.* 2006b; Alves *et al.* 2007). Dessa forma, a concentração de PT no rio Arari é muito próxima a de um ambiente sob forte pressão antrópica, apesar de que o rio recebe descarga de esgoto em apenas um ponto (Cachoeira do Arari) ao longo de mais de 100 km de extensão, o que sugere o aporte proveniente dos campos naturais como de grande contribuição para elevar os valores de PT.

Os valores de Sólidos Totais (Figura 3g) também variaram temporalmente, com as maiores concentrações no período menos chuvoso, mediana de 221,0 mg L⁻¹ e no chuvoso de 101,3 mg L⁻¹. Um gradiente negativo foi formado no período

menos chuvoso entre Cachoeira e Santana do Arari. Em Cachoeira do Arari os valores mínimos e máximos registrados foram de 33,58 mg L⁻¹ e 635,70 mg L⁻¹, em Murutucú foram de 86,20 mg L⁻¹ e 607,00 mg L⁻¹ e em Santana foram de 44,00 mg L⁻¹ e 442,20 mg L⁻¹, respectivamente.

A turbidez (Figura 3h) acompanhou a distribuição dos Sólidos Totais, o máximo de 900 UNT foi registrado em Cachoeira no período menos chuvoso e o mínimo foi de 28,80 UNT em Santana do Arari (Tabela 1) durante o período chuvoso. A intensificação do processo de ressuspensão no Rio Arari está diretamente relacionada à ação das marés, no período menos chuvoso e favoreceu o aumento da turbidez. As

águas do Rio Arari possuem elevada concentração de material em suspensão durante o ano todo, com coloração amarelada e aspecto barrento. Cursos d'água (rios, lagos, estuários) com essas características são muito freqüentes na bacia Amazonica e são consideradas como "águas brancas" (Sioli 1957).

A dispersão dos valores de Clorofila *a* (Figura 3i) apresentou as maiores concentrações registradas no período chuvoso (mínimo de 4,22 mg m⁻³, máximo de 38,31 mg m⁻³, mediana de 17,40 mg m⁻³) e diminuíram no menos chuvoso (mínimo de 3,90 mg m⁻³, máximo de 25,81 mg m⁻³, mediana de 8,91 mg m⁻³). Estes valores são próximos aos de outros ambientes eutróficos (Campelo *et al.* 1999; Santos 2000; Honorato da Silva 2003) e revelam o Rio Arari como uma área de alta fertilidade.

As concentrações maiores de coliformes fecais foram obtidas durante o período menos chuvoso (máximo de 2.400 NMP 100 ml⁻¹), registrado em Cachoeira do Arari, seguido de uma diminuição em direção a Murutucú (1.200 NMP/100 ml) e Santana do Arari (350 NMP 100 ml⁻¹, Tabela 1). No período chuvoso ocorre um padrão de distribuição similar, com os valores maiores registrados em Cachoeira do Arari 648 NMP 100 ml⁻¹ (Tabela 1). A única área que sofre influência de efluentes urbanos é Cachoeira do Arari. Contudo, as embarcações de transporte de passageiros e gado podem ser consideradas como fontes difusas de lançamento de esgoto, gerando contaminação por matéria orgânica de origem fecal. As maiores concentrações de coliformes em Cachoeira do Arari podem ser justificadas pelos lançamentos de esgotos da cidade diretamente no Rio Arari, enquanto que em Murutucú e Santana do Arari, áreas não urbanizadas, os valores são reduzidos, demonstrando a influência dos lançamentos de esgotos, em Cachoeira do Arari, na deterioração da qualidade das águas do Rio Arari.

Índices ambientais de qualidade da água no Rio Arari

O IQA para o período chuvoso pode ser classificado como "Ruim", enquanto que no período menos chuvoso a classificação foi "Ruim" em Cachoeira e Murutucú e "Regular" em Santana. Esta classificação para a qualidade da água do Rio Arari ocorreu principalmente devido aos coliformes fecais elevados em ambos os períodos, baixas concentrações de OD e pH ácido nas águas do rio. Além disso, os valores de ST e turbidez favorecem a diminuição do IQA.

A acidez, carga de matéria orgânica de origem vegetal e elevada turbidez das águas são características típicas dos rios amazônicos de águas brancas (Sioli 1957) e o efeito combinado entre algumas variáveis torna as águas Amazonicas diferenciadas de outros rios do Brasil. Neste sentido, é possível ter conclusões diferenciadas quando as variáveis são analisadas individualmente, principalmente no caso do Rio Arari, onde o

lançamento de esgoto ainda é incipiente e a carga de matéria orgânica relativamente alta é em sua maior parte de origem natural, proveniente dos campos alagados, e em menor escala proveniente dos lançamentos de esgoto na cidade de Cachoeira do Arari.

O IET (Figura 4b) indica o Rio Arari como supereutrófico durante o período chuvoso, enquanto que no período menos chuvoso foi hipereutrófico em Murutucú e Supereutrófico em Santana do Arari e Cachoeira do Arari. Esta classificação entre supereutrófico e hipereutrófico reflete a grande disponibilidade de fósforo e a elevada biomassa fitoplânctonica do Rio Arari, em termos de clorofila *a*.

Análise de Componentes Principais (ACP)

As duas primeiras componentes (PC1 e PC2) descrevem 69,6% da variação original. A PC1 explicou 42% da variância total, enquanto que a PC2 representou 27,5%. A PC1 pode ser interpretada como um gradiente entre DBO₅ (0,26), maré (0,23), IET (0,60) e clorofila-*a* (0,67) e turbidez (-0,71), NT (-0,67), ST (-0,81), coliformes (-0,75), condutividade (-0,69), temperatura (-0,58) e OD (-0,48). A PC2 representa na extremidade negativa a turbidez (-0,45), NT (-0,39), PT (-0,23), DBO₅ (-0,33) e IET (-0,31) e na extremidade positiva a maré (0,49), pH (0,77), temperatura (0,36), a condutividade (0,22), OD (0,39) e IQA (0,93) (Figura 5a).

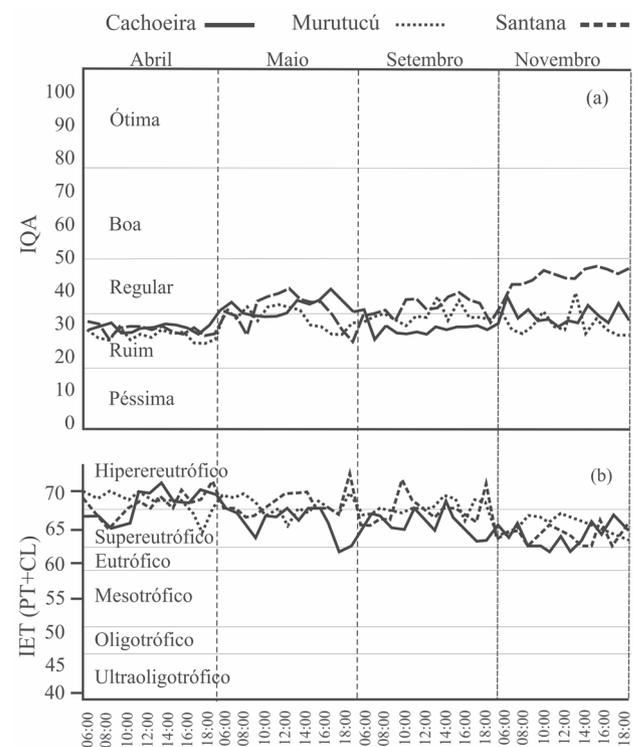


Figura 4 - Distribuição do IQA (a) e IET (CL+PT) (b) nas três estações de coleta no Rio Arari, durante os dois períodos do ano de 2009.

Dentre as variáveis que compõem o IQA, coliformes fecais, DBO_5 , turbidez, NT, PT e ST têm correlação inversa com o índice, enquanto pH, temperatura e OD mostraram correlação direta (Figura 4). Dentre estes, o pH foi o que mais contribuiu para a variação dos valores observados, mas diversos estudos nos rios da região Amazônica mostram a tendência de pH ligeiramente ácido, sem danos ao ambiente aquático (Esteves 1998; Horbe *et al.* 2005; Horbe *et al.* 2009). Assim, os valores de pH ácidos encontrados no Rio Arari não são relacionados a poluição e revelam uma necessidade de adequar a legislação vigente, no sentido de flexibilizar a adoção de parâmetros e padrões de qualidade compatíveis com as características dos ecossistemas amazônicos.

A DBO_5 e OD mostraram correlação inversa entre si, que indica um consumo do OD no processo de degradação da matéria orgânica (MO) e o aumento nos valores de DBO_5 . A correlação inversa entre DBO_5 e coliformes fecais permite inferir sobre a fonte da MO no Rio Arari, indicando que a fonte de MO pode ser diferente da fonte de lançamento de coliformes fecais e maior parte da carga de DBO_5 é proveniente de fonte natural.

Os coliformes se relacionaram diretamente com a temperatura, NT, condutividade, ST e turbidez, que podem ser considerados indicadores de qualidade da água e o aumento da concentração destas variáveis está relacionado à contaminação da água por esgoto doméstico e/ou ressuspensão de sedimentos e, no presente caso, indica o efeito combinado de fontes antrópicas, despejo de esgoto doméstico em Cachoeira do Arari e pelas embarcações que navegam pelo rio Arari e por fontes naturais, processos de ressuspensão provocados pelas marés.

As descargas de esgotos elevam as concentrações de NT e condutividade elétrica, enquanto que as temperaturas

elevadas típicas de regiões tropicais favorecem a proliferação de bactérias do grupo coliformes. Em ambientes de elevadas concentrações de sólidos totais e turbidez, Crabill *et al.* (1999), An *et al.* (2002) e Bonnet *et al.* (2008) verificaram uma relação direta entre o aumento da concentração de coliformes e à ressuspensão de sedimentos. O sedimento serve de substrato para o crescimento de coliformes e por meio da ressuspensão, os microrganismos ascendem à coluna d'água e contaminam o reservatório (Crabill *et al.* 1999).

A correlação positiva encontrada na PC1 entre o OD, ST e turbidez e na PC2 entre OD e maré mostra que a oxigenação do Rio Arari é fortemente correlacionada aos processos hidrodinâmicos (correntes de marés) que aumentam a oxigenação e turbidez das águas. A relação inversa do OD e turbidez com a clorofila-*a* suporta essa interpretação e revela a diminuição da turbidez favorecendo o desenvolvimento da biomassa fitoplanctônica. De acordo com Junk *et al.* (1981), Melack e Fisher (1983) e Esteves (1998) nos ecossistemas aquáticos amazônicos a fonte de oxigênio a partir da atmosfera é considerada muito importante, cerca de 60% do oxigênio do epilimnio é de origem atmosférica.

Os valores de IET(P) mantiveram-se praticamente constantes durante o ano de 2009 (Figura 3e), sem variação temporal, enquanto que o IET (CL) apresentou uma variação temporal bem definida (Figura 3i). Assim, dentre as duas variáveis usadas para compor o IET, a clorofila *a* apresentou a maior contribuição para a variação dos valores observados que o fósforo.

O diagrama da ordenação a partir dos escores obtidos da ACP para as 156 amostras (Figura 5b), revelam uma nítida separação temporal das amostras hidrológicas, com os escores do período chuvoso na extremidade positiva e o menos chuvoso na extremidade negativa da PC1, indicando

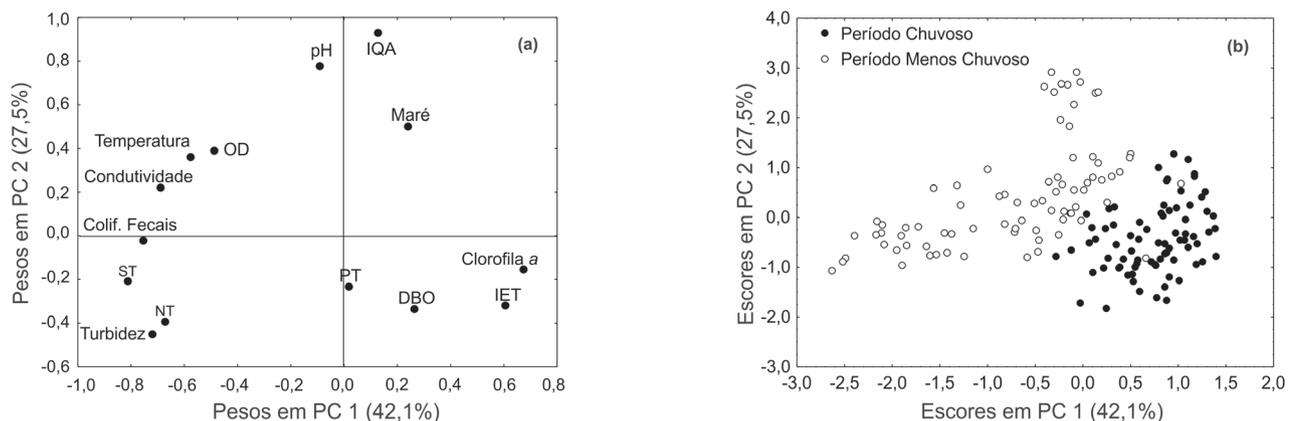


Figura 5 - (a) Pesos das variáveis nas duas primeiras componentes principais PC1 e PC2 com todos os dados obtidos no Rio Arari no ano de 2009 e (b) Diagrama da ordenação nas duas primeiras componentes principais, com estratificação entre os períodos Chuvoso e menos Chuvoso de 2009.

a influência da sazonalidade na distribuição dos parâmetros de qualidade de água no Rio Arari. No período chuvoso os parâmetros favorecidos são clorofila *a* e DBO₅, enquanto no período menos chuvoso foram o OD, pH, temperatura, condutividade, coliformes fecais, ST, turbidez, e nitrogênio total. No período chuvoso as três estações apresentam características bastante semelhantes, enquanto no menos chuvoso ocorre uma divergência e revela águas com características mais diferenciadas, que explica a formação dos gradientes observados.

CONCLUSÕES

Os parâmetros de qualidade da água avaliados individualmente e dentro do contexto da bacia hidrográfica do Rio Arari revelam um processo de eutrofização natural, visto que as fontes de contaminação antrópica ainda são incipientes e provavelmente contribuirão em longo prazo para o processo de eutrofização artificial. Atualmente, as fontes autóctones são mais relevantes para a contribuição nos valores registrados dos parâmetros estudados.

No Rio Arari os valores dos parâmetros físicos e físico-químicos são característicos de rios de águas brancas. Durante o período menos chuvoso, a intensificação das marés provoca uma compartimentação do rio com formação de gradientes.

A aplicação do IQA nas águas do Rio Arari não demonstrou eficiência, uma vez que IQA usa cálculo para alguns parâmetros muito restritivos quando se trata de águas Amazonicas. Neste caso, o índice deve ser adaptado e/ou os valores mais flexíveis, observando as condições regionais dessas águas. Por outro lado, o IET revela uma boa representatividade do estado trófico do Rio Arari, interpretado como resultado de um lento processo de eutrofização. A cidade de Cachoeira do Arari pode ser considerada uma fonte pontual de contaminação, pois despeja esgoto doméstico diretamente no rio, enquanto que as embarcações são uma fonte difusa de poluição.

A oxigenação do Rio Arari acompanha o aumento da hidrodinâmica e a atmosfera é a principal fonte de oxigênio para estas águas. A diminuição da turbidez da água favorece aumento dos valores de clorofila *a*, o que revela a disponibilidade de luz como um fator limitante da produtividade primária no Rio Arari.

AGRADECIMENTOS

Aos Laboratórios: de Controle de Resíduos, de Geologia Marinha e de Modelagem de Estuários da UFPA, pelas análises de laboratório, pelos equipamentos de campo e processamento dos dados. Ao PPGG e CAPES pela concessão de bolsa de Mestrado.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Alves, I.C.C.; Santos, M.L.S.; Sodré, S.S.; Miranda, M.V.T.; Queiroz Junior, A. J.; Pereira, J.A.R. 2007. Estudo de parâmetros abióticos no Lago Água Preta (Belém/PA). In: XI Congresso Brasileiro de Limnologia. CD Rom.
- An, Y.J.; Kampbell, D.H.; Breidenbach, G.P. 2002. Escherichia coli and total coliforms in water and Sediments at lake marinas. *Environmental Pollution*, 120: 771-778.
- APHA-American Public Health Association. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington: Library of Congress. 19th ed. 1134 pp.
- Barbosa, G. V., Rennó, C. V. & Franco, E. M. S. 1974. 'Geomorfologia da Folha SA-22 Belém' in *Levantamento de Recursos Naturais, Folha SA.22 Belém*, Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Projeto Radam, 5.
- Barbosa, N.G.S. 2005. Bubalinocultura no Estado do Pará. *Revista Brasileira de Reprodução Animal*, 29: 34-38.
- Bonnet, B.R.P.; Ferreira, L.G. Wolf, F.C. 2008. Relationship between water quality and land use in Goiás: A analysis of the Basin river scale. *Revista Árvore*, 32: 311-322. (In Portuguese).
- Braz, V. M. N.; Mello, V. A. 2006. A temporal study of water quality in the Guamá river (Belém-Pará). *Traços*, 06: 31-38. (In Portuguese).
- Campelo, M.J.A.; Passavante, J.Z.O.; Koenig, M.L. 1999. Phytoplankton biomass (chlorophyll *a*) and environmental parameters on the Carne de vaca beach, Goiás, Pernambuco, Brazil. *Oceanographic Jobs of the Federal University of Pernambuco*. 27: 27-41. (In Portuguese).
- CETESB - Company of Technology and Environmental Sanitation. 2003. Report of Inland quality waters of the State of São Paulo, São Paulo, from 2000 to 2003. (in Portuguese).
- CETESB - Company of Technology and Environmental Sanitation. 2006. Water quality variables (www.cetesb.sp.gov.br). Acesso em 01/11/10.
- Crabill, C.; Donald, R.; Snelling, J.; Foust, R.; Southam, G. 1999. The impact of sediment fecal coliform reservoirs on seasonal water quality in Oak Creek, Arizona. *Water Research*, 33: 2163-2171.
- Cunha, H.B. ; Pascoaloto, D. 2006. *Hidroquímica dos rios da Amazônia*. Manaus, Governo do Estado do Amazonas, Secretaria de Estado da Cultura. 127 pp.
- Davies, J.L. 1964. A morphogenic approach to world shorelines, *Zeitschrift für Geomorphology*, 8: 127-142.
- Esteves, F.A. 1998. *Fundamentals of Limnology*. (2. Ed.). New York: Interciência. 602 pp. (in Portuguese).
- Gabioux, M.; Vinzon, S.B.; Paiva, A.M. 2005. Tidal propagation over fluid mud layers on the Amazon shelf. *Continental Shelf Research*, 25: 113-125.
- Gallo, M.N.; Vinzon, S.B. 2005. Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. *Ocean Dynamics*, 55: 441-448.
- Grasshoff, K.; Ehrhardt, M.; Kremling, K. 1983. *Methods of seawater analysis* (2.ed.). Florida, Verlage Chemie. 417 pp.

- Honorato da Silva, M. 2003. *Phytoplankton of Formoso River estuary (Formoso River, Pernambuco, Brazil): biomass, taxonomy and ecology*. Master Thesis. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 131pp (In Portuguese whit abstract in english).
- Horbe, A.M.C.; Gomes, I.L.F.; Miranda, S.F.; Smith, M.S.R. 2005. Contribution to the hydrochemistry of drainages in the municipality of Manaus-AM. *Acta Amazonica*, 35: 119 - 124 (In Portuguese whit abstract in english).
- Horbe, A.M.C.; Queiroz, M.M.A.; Seyler P.; Moura, C.V. 2009. Hydrochemistry of the Solimões River in the region between Manacapuru and Alvarães Amazonas Brazil. *Acta Amazonica*, 39: 941-950 (In Portuguese whit abstract in english).
- IBGE - Brazilian Institute of Geography and Statistics. 2000. Estimates of the resident population on 1 July 2009, according to the municipalities available (www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2009). Acesso em 15/03/10.
- IDESP - Institute for Economic and Social Development of Para. 1974. Integrated studies of Marajo Island. Belém. 333 pp. (In Portuguese).
- INMET - National Institute of Meteorology. 2010. Automatic Monitoring Stations - Station Automatic Data Query: Soure (PA). (www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php). Acesso em 01/03/10.
- Junk, W.J.; Robertson, B.A.; Darwich, A.J.; Vieira, I. 1981. Limnological and ichthyological investigations in Curuá-Una, the first hydroelectric dam in central Amazonia. *Acta amazonica*, 11: 689-716.
- Lamparelli, M.C. 2004. *Degrees of trophic in water bodies of São Paulo: Evaluation of monitoring methods*. Doctoral Thesis, Institute of Biosciences, University of São Paulo, São Paulo. 235 pp. (in Portuguese).
- Maier, M.H. 1987. Ecology of River Basin Jacaré Pepira (47°55' - 48°55'W; 22°30' - 21°55'S - Brasil): Water Quality of Major River. *Ciência e Cultura*, 39: 164-185.
- Melack, J.M.; Fisher, T.R. 1983. Diel Oxygen Variations and Their Implications in ecological Amazon floodplain Lakes. *Archeology and Hydrobiology*. 98: 422-442.
- Pinto, A.G.N.; HORBE, A.M.C.; Silva, M.S.R.; Miranda, S.A.F.; Pascoaloto, D.; Santos, H.M.C. 2009. Efeitos da ação antrópica sobre a hidrogeoquímica do rio Negro na orla de Manaus/AM. *Acta Amazonica*, 39: 627-638.
- Queiroz, M.M.A.; Horbe, A.M.C.; Seyler, P.; Moura, C.A.V. 2009. The Solimões river hydrochemistry between Manacapuru and Alvarães- Amazonas-Brazil. *Acta Amazonica*. 39(4): 943-952. (in Portuguese with abstract in English).
- Reis, C.M. 1972. *Sketch of an alternative for water control in the Arari river basin (Marajo Island-Pará) and its economic feasibility study*. Master Thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 63 pp.
- Rosario, R.P.; Bezerra, M.O.M.; Vinzon, S.B. 2009. Dynamics of the saline front in the Northern Channel of the Amazon River - influence of fluvial flow and tidal range (Brazil). *Journal of Coastal Research*, 2: 503-514.
- Santos, M.L.S. 2000. *Influence of Amazonas and Pará rivers on phytoplankton biomass*. Master thesis. Center for Technology and Geosciences, Federal University of Pernambuco. 108 pp. (in Portuguese with abstract in English).
- Santos, M. L. S. 2004. *Distribution of nutrients (phosphorus and nitrogen) on the Amazon continental shelf*. PhD thesis. Center for Technology and Geosciences, Federal University of Pernambuco, Recife. 143 pp. (in Portuguese with abstract in English).
- Santos, M.L.S.; Saraiva, A.L.L.; Veloso, S.S.C.; Alves, I.C.C.; Xavier, D.A.; Pereira, J.A.R. 2006a. Estudo Hidrológico nos Mananciais utilizados no abastecimento de água na Região Metropolitana de Belém (PA/Brasil). In: XII Simpósio luso-brasileiro de engenharia sanitária e ambiental. CD-Rom.
- Santos, M.L.S.; Sodré, S.S.V.; Alves, I.C.C.; Xavier, D.A.; Sousa, R.R.; Pereira, J.A.R. 2006b. Avaliação das formas de fósforo no Lago Água Preta (Belém-PA). In: XLVI Congresso Brasileiro de Química. CD-Rom.
- Santos, M.L.S., Medeiros, C., Muniz, K., Feitosa, F.A.N., Schwamborn, R., Macedo, S.J., 2008. Influence of the Amazon and Pará Rivers on Water Composition and Phytoplankton Biomass on the Adjacent Shelf. *Journal of Coastal Research* 24: 585-593.
- Sioli, H. 1957. pH values to Amazonian waters. *Bulletin of the Museum Paraense Emilio Goeldi*, 1: 1-35.
- Silva, A.E.P.; Angelis, C.F.; Machado, L.A.T.; Waichaman, A.V. 2008. Impacts of precipitation on the water quality of the Purus River. *Acta amazonica*, 38: 733 - 742. (In Portuguese whit abstract in english).
- Souza, L.S.B.; Rossetti, D.F.; Elis, W.R. 2009. Vertical electrical sounding on the island of Marajo. In: *Simp. of Geol. Amaz.*, 9, Manaus. CD-ROM: Technical and Scientific Issues (geophysics, remote sensing / GIS). (In Portuguese).
- Strickland, J.D.H.; Parsons, T.R. 1972. A Practical handbook of sea water analysis. *Bulletim Fisheries Research Board of Canada*, 167: 1-311.
- Tavares, A.R. 2005. *Monitoring of water quality of the Paraíba do Sul River and conservation assessment*. Master Thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA, São José dos Campos, São Paulo. 176 pp. (in Portuguese with abstract in english).
- Teixeira, C. 1973. Introduction to methods for measuring primary production in marine phytoplankton. *Bulletin of the Oceanographic Institute of São Paulo*, 22: 59-92.
- Vinzon, B.S.; Vilela, C.P.X.; Pereira, L.C.C. 2008. *Processos físicos na Plataforma Continental Amazonica*. Relatório-Técnico, Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de Petróleo e Derivados na Zona Costeira Amazônica. Petrobrás, Brasil. 31 pp.

Recebido em 17/11/2010

Aceito em 18/03/2011