

## Índice de Qualidade de Água (IQA) para ambientes amazônicos usando Estatística Multivariada

### Water Quality Index (WQI) for amazonian environments using Multivariate Statistics

Anderson da Silva Lages<sup>1\*</sup>, Sebastião Átila Fonseca Miranda<sup>1</sup>, Paulo Renan Gomes Ferreira<sup>1</sup>,  
Fábio Alexandre da Costa Mota<sup>2</sup>, Adriana Castro da Conceição<sup>1</sup>, Adriana Freitas Rosa<sup>1</sup>, Sávio  
José Filgueiras Ferreira<sup>1</sup>, Márcio Luiz da Silva<sup>1</sup>.

#### RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo propor um IQA para as águas ácidas de Manaus usando estatística multivariada. Foi escolhido um local isolado dos grandes centros urbanos para servir de *background* natural da região. Foram realizadas coletas mensais de água neste igarapé entre os meses de janeiro e julho de 2022 a fim de estabelecer marcadores ambientais de naturalidade. Analisou-se 22 variáveis ambientais, e, em seguida, se utilizou a Análise da Componente Principal – ACP para estabelecer as variáveis mais importantes do conjunto de dados. Os resultados apontaram que as variáveis que mais se destacaram foram Ntotal, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> e condutividade elétrica. A ACP também identificou influência moderada das variáveis NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> e coliformes fecais na composição das águas. Criou-se categorias de águas com base em equações exponenciais e logarítmicas despontadas pelas medidas realizadas. Por fim, as equações e curvas foram aplicadas em 12 corpos de água distribuídos na área urbana de Manaus e demonstraram que 75% das amostras avaliadas estavam na condição de péssima.

**Palavras-chave:** ACP; IQA; Bacia Hidrográfica do Educandos; Igarapé Açu; IETÉ

#### ABSTRACT

The present work aimed to propose a WQI for the acidic waters of Manaus using multivariate statistics. A location isolated from large urban centers was chosen to serve as the region's natural background. Monthly water collections were carried out in this stream between January and July 2022 in order to establish naturalness environmental markers. 22 environmental variables were analyzed, and then Principal Component Analysis – PCA was used to establish the most important variables of the data set. The results showed that the variables that stood out the most were Ntotal, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> and electrical conductivity. The PCA also identified a moderate influence of the variables NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> and fecal coliforms on the water composition. Water categories were created based on exponential and logarithmic equations that emerged from the measurements taken. Finally, the equations and curves were applied to 12 bodies of water distributed in the urban area of Manaus and demonstrated that 75% of the evaluated samples were in a very poor condition.

**Keywords:** PCA; WQI; Educandos watershed; Stream Açu; IETÉ

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA. Avenida André Araújo, n 2936, bairro Aleixo, Manaus – AM. CEP 69055-010

\*E-mail: [asl.qmc@gmail.com](mailto:asl.qmc@gmail.com)

<sup>2</sup>Instituto Federal do Amazonas – IFAM. Avenida Cosme Ferreira, n 8045, São José Operário, Manaus, AM. CEP 69083-000

## INTRODUÇÃO

A construção do Índice de Qualidade da Água – IQA, varia de país para país, e, em alguns casos, de regiões para regiões. No Brasil, geralmente se aplica para águas variadas o IQA elaborado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB. Este IQA conta com nove parâmetros: Temperatura, Turbidez, Sólidos Totais em Suspensão, Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Fósforo Total e Nitrogênio Total, pH e Coliformes Fecais. O que passa despercebido, contudo, é que esse IQA não pode ser aplicado em qualquer ambiente, como ambientes amazônicos, por exemplo.

A explicação do IQA elaborado pela CETESB não servir para todo tipo de água se aplica na maior bacia hidrográfica do planeta. A Amazônia possui muitos ambientes cujos valores de pH não excedem a 5,0 (SIOLI, 1968; BRINGEL, 1986; CALVO e OLIVEIRA, 2022) o que inviabiliza os padrões, os pesos e as curvas adotadas pela CETESB para as águas do sul e sudeste de Brasil. Desta forma, fica evidente que cada região do planeta necessita elaborar um IQA que respeite as características naturais daquele meio.

Pela clássica classificação de Harol Sioli (1958), existem três tipos básicos de águas na amazônia: as águas pretas, que são ácidas, com alto teor de matéria orgânica alóctone da floresta (LENNHER, 1997), que apresentam predomínio de sódio e potássio, resultado da lixiviação de terrenos geológicos antigos, como o planalto das Guianas (pH não excede a 5,0 e com baixos valores de condutividade elétrica que não excedem os  $20 \mu\text{S cm}^{-1}$ ); as águas brancas que são provenientes de regiões andinas e possuem pH próximo da neutralidade (pH acima de 7,0 e com condutividade elétrica superior a  $200 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) com predomínio de íons cálcio e magnésio e por fim; as águas claras que são águas mais transparentes que os de água branca, carregam poucos materiais em suspensão e tem origem na Amazônia Central, que em virtude do relevo mais regular, oferece menor possibilidade de erosão. Esses rios não formam várzeas e sim praias, possuem poucos lagos e igapós e há pouca produção de material orgânico.

A elaboração de um IQA normalmente compreende quatro processos. No Primeiro, os parâmetros de qualidade da água de interesse são selecionados. No segundo, os dados de qualidade de água são determinados por métodos variados, e, para cada parâmetro de qualidade da água, os valores são convertidos em um subíndice adimensional de valor único. O terceiro processo consiste na geração de um fator de ponderação para cada

parâmetro de qualidade da água, e, por fim, o quarto processo é a determinação do índice final de qualidade da água, de valor único, calculado por uma função de agregação usando os subíndices e fatores de ponderação para todos parâmetros de qualidade da água (UDDIN *et al.*, 2021). No Brasil, MORETTO *et. al* (2012) calibraram um IQA para as regiões subtropicais e sistemas lóticos temperados, atribuindo novos pesos ao modelo e demonstrando a importância da Análise da Componente Principal (ACP) na avaliação da qualidade da água. Há muitas referências no mundo quando o assunto é elaborar IQA usando estatística multivariada (LIU *et al.*, 2022; BAJANA *et al.*, 2022; ADIMALLA, 2021; KHAN *et al.*, 2021; MUKATE *et al.*, 2019; WU *et al.*, 2018).

Se regiões e cidades precisam de IQAs próprios, o mesmo pode ser aplicado para microregiões ou microbacias hidrográficas urbanas. A Amazônia é entrecortada por diversos corpos de água. A cidade de Manaus é um ótimo exemplo disso. São centenas de corpos de água que cruzam a capital do Amazonas. Tais corpos de água são denominados igarapés – *caminho de canoa*, do tupi. Em Manaus, há duas bacias hidrográficas urbanas representativas, sob o aspecto da pressão urbana poluidora. Trata-se das bacias hidrográficas do São Raimundo e do Educandos. Esta última tem como principal corpo de água o igarapé do Quarenta, que drena uma vasta área do polo industrial de Manaus e influencia a vida de aproximadamente 1/3 da população de Manaus, que mora as suas margens ou próximos de suas águas. Diante disso, é importante a construção de um *background* que contemple as condições naturais das águas superficiais de Manaus, e, represente de forma adequada os parâmetros ambientais dos igarapés da região.

Desta forma, respeitando as peculiaridades amazônicas, a cidade de Manaus necessita do desenvolvimento de um IQA próprio, que sirva de parâmetro de classificação de suas águas, hoje amplamente degradadas pela pressão urbana. Portanto, o objetivo deste estudo foi propor um IQA usando análise estatística multivariada - com a Análise da Componente Principal, a partir de um igarapé natural – o igarapé Açu. Tal proposta possibilitou maior entendimento da dinâmica química dessas águas e no fornecimento de subsídios para intervenções ambientais em bacias hidrográficas antropizadas da cidade de Manaus.

## METODOLOGIA

A construção de um IQA envolve as noções de um *background* da região, que sirva de modelo ou padrão, para a classificação de águas não naturais. Neste trabalho, usou-se as águas do igarapé Açu como marcadoras de *background*, localizado na Reserva Biológica do Cuieiras do INPA – RBC/INPA, a aproximadamente 50 quilômetros da área urbana de Manaus, porém, inserida na mesma Formação geológica dos igarapés que serão avaliados nesse estudo.

### Área de Estudo: Geologia e Climatologia

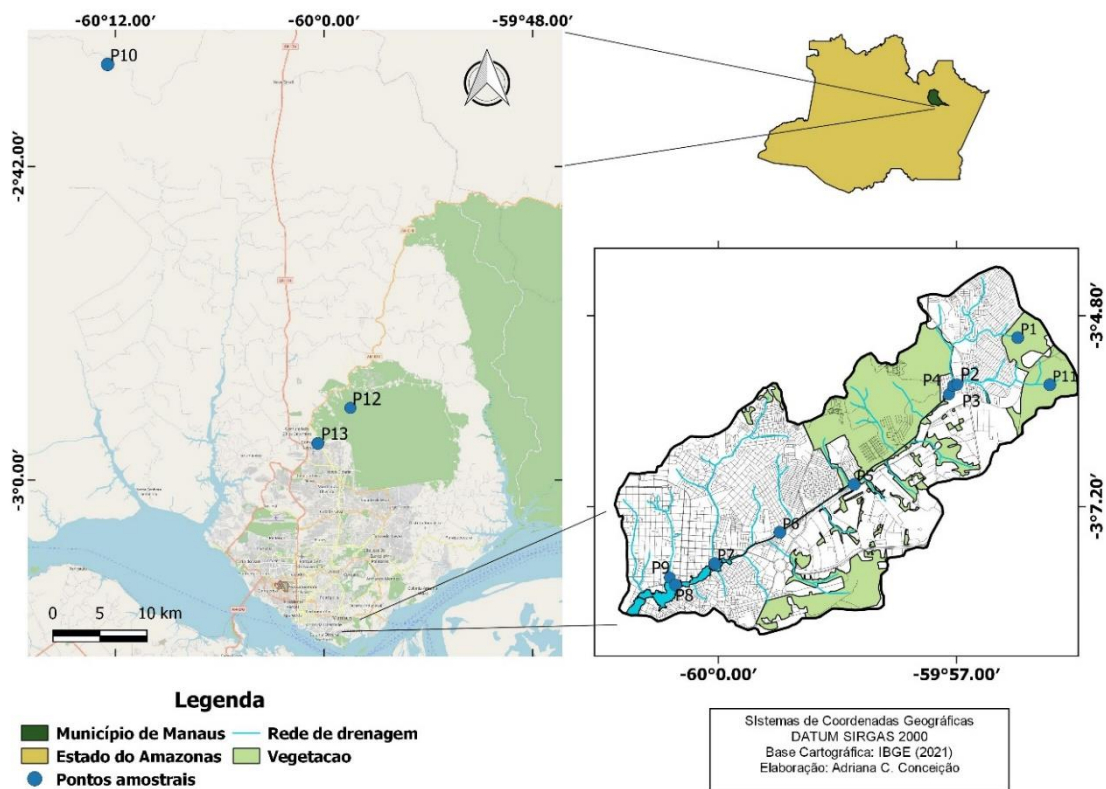
A área de estudo está situada na Formação Alter do Chão, formada por arenitos e pelitos avermelhados. Aparece assentada discordantemente sobre os calcários da Formação Nova Olinda, de idade carbonífera. A sucessão inferior é predominantemente arenosa e a superior pelítica. O arranjo indica que a estruturação original da Bacia Alter do Chão não foi obliterada pela atividade tectônica recorrente e está, aparentemente, restrita a falhamentos lístricos pouco acentuados. Localmente, ocorrem crostas lateríticas sílico-ferruginosas, com espessura média de cerca de 1 metro e extensão lateral na ordem de dezenas de metros, sendo responsáveis pela preservação do modelado tabular do relevo. Todas essas características contribuem para que esse ambiente seja pouco mineralizado (PITA *et al.*, 2018).

Segundo a classificação do Köppen, essa região possui um clima equatorial caracterizado como quente e úmido, apresentando uma temperatura média de 25,8 °C e um índice pluviométrico de 2.300 mm ao ano (ALVARAES, 2014). É uma região cuja climatologia destaca-se pela intensidade de chuvas de novembro a abril e pela estiagem no período de junho a outubro.

O IQA proposto neste estudo se baseou nos dados ambientais do projeto de monitoramento da Bacia Hidrográfica do Educandos - projeto IETÉ. Foram 7 coletas mensais de água superficial nas águas do igarapé Açu (entre janeiro de 2022 e julho de 2022), com a avaliação de 22 parâmetros. Após a construção dos indicadores de *background*, foram construídas as curvas correspondentes às variáveis mais significativas apontadas pela Análise de Componente Principal – ACP, e, posteriormente, as equações foram aplicadas à resultados de 12 pontos de monitoramento da rede IETÉ, a saber: P1-

nascente do ifam zona leste; P2- antigo posto de vistoria do Detran; P3- entrada do conjunto dos industriários; P4- saída do conjunto dos industriários; P5- Manaus 2000; P6- Studio 5; P7- foz do igarapé da Cachoeirinha; P8- foz do igarapé do Quarenta e; P9- foz do igarapé Mestre Chico. Dessa forma, pode-se mencionar que foram avaliados 10 locais de monitoramento, sendo 9 para enquadramento das águas e o P10 é o ponto de referência – o igarapé Açú (Figura 1). Também foram acrescentados mais três corpos de água de outras microbacias hidrográficas de Manaus: P11- nascente da reserva florestal Refúgio da Vida Silvestre Sauim Castanheira; P12- igarapé Barro Branco e P13- igarapé Matrinxã. A inserção dos pontos P11, P12 e P13 foi para verificar a validade do modelo de IQA para outras bacias hidrográficas da cidade de Manaus.

Figura 1: Mapa de localização dos pontos de coleta de água superficial e de construção do IQA



Fonte: Lages *et al.*, 2023

## Procedimentos Analíticos

As amostras foram coletadas em frascos de polietileno próximo da superfície da coluna d'água. Em seguida, foram acondicionadas em campo e transportadas para o laboratório de Química Ambiental do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, da Coordenação de Dinâmica Ambiental – CODAM/INPA, onde as análises foram feitas. As variáveis determinadas foram: temperatura, pH, condutividade elétrica e turbidez por métodos eletroquímicos. A alcalinidade foi expressa em termos de bicarbonato, em função dos valores de pH, por volumetria de neutralização – com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,02 N. A matéria orgânica foi quantificada por volumetria de oxirredução com  $\text{KMnO}_4$  0,01 N.

Os íons sódio e potássio foram determinados por ICP-OES. Cálcio e magnésio foram analisados por volumetria de complexação usando o EDTA com agente titulante. Os Sólidos Totais em Suspensão – STS foram determinados por gravimetria. Os íons cloreto, nitrito, nitrato, amônio, fosfato, nitrogênio total e fósforo total e silicato foram determinados por espectrofotometria, com o auxílio da análise de injeção de fluxo (sistema FIA – *Flow Injection Analysis*). Também foram analisados os coliformes fecais com o uso do Colilert. O Oxigênio Dissolvido – OD e a Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO foram determinados por volumetria de oxirredução utilizando o tiosulfato de sódio como agente titulante. Todas essas 22 variáveis foram agrupadas e avaliadas com base na Análise da Componente Principal – ACP e os métodos analíticos podem ser encontrados no Standard Methods do manual APHA (2005).

## Análise estatística multivariada – Construção do Modelo

Utilizou-se a Análise da Coordenada Principal – ACP - aplicada aos resultados das águas do igarapé Açu, local de referência nesse estudo, que destacou as variáveis mais importantes no conjunto de dados. Usou-se o software estatístico R, versão 4,01 para estabelecer os resultados da PCA deste trabalho. Em seguida, se estipulou pesos aleatórios para construção dos índices de qualidade da água.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

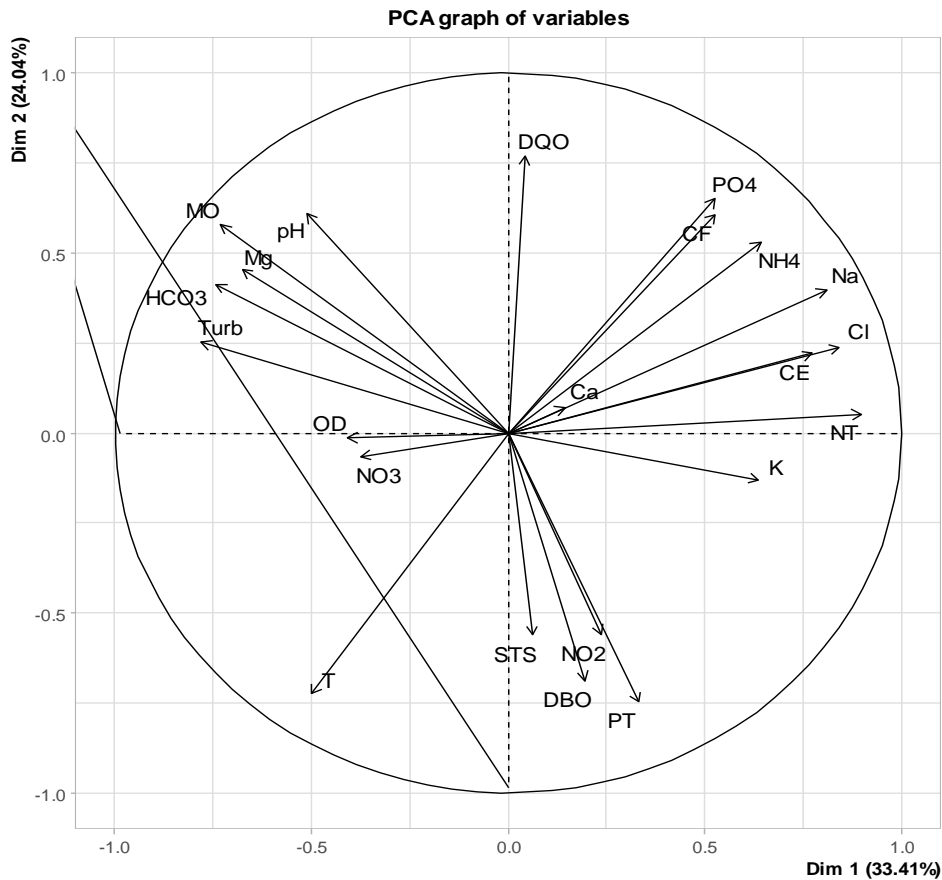
Os dados que serão apresentados em seguida, representaram as médias de sete meses de coletas de água no igarapé Açu. Dos 22 parâmetros analisados na Análise da Componente Principal – ACP, foram gerados seis *PC loadings*, provavelmente em função de seis fontes diferentes que contribuem com a composição química das águas do igarapé Açu. Contudo, se avaliou as duas primeiras componentes – PC1 e PC2 – porque trazem as maiores cargas estatísticas para o conjunto de dados, totalizando 57,454% das informações observadas (Tabela 1).

Tabela 1: Autovalores gerados na Análise da Componente Principal para as águas do igarapé Açu

Eigenvalue	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Variance	7,351	5,289	3,949	2,549	1,814	1,048
% of var.	33,413	24,041	17,949	11,586	8,246	4,766
Cumulative % of var.	33,413	57,454	75,402	86,988	95,234	100,00

Com base nas duas primeiras PCs geradas, construiu-se um dendrograma com todas as variáveis do ponto de referência. Observam-se da figura 2, algumas tendências que são naturais para ambientes de água preta, como as águas naturais de Manaus. Tal fato só corrobora o quão relevante foi utilizar o igarapé Açu como ponto padrão neste estudo. A PCA demonstrou associações entre pH e matéria orgânica, o que explica a acidez das águas; demonstrou ainda como os teores de fosfato podem estar associados à presença de coliformes fecais e; como sódio e cloreto podem contribuir com o aumento da condutividade elétrica, muito embora, essas águas sejam pouco condutivas, com valores inferiores a  $20 \mu\text{S cm}^{-1}$  (SIOLI, 1958).

Figura 2: Dendograma da PCA para as variáveis monitoradas para a construção do IQA nas águas do igarapé Açú.



Fonte: Lages *et al.*, 2023

Como o objetivo do estudo não foi detalhar as interações nas águas do igarapé Açú e sim estimar as variáveis mais importantes neste corpo de água, que serve como indicador de ambiente preservado para águas pretas amazônicas, se buscou detalhar variáveis com maior significância, a partir dos dados Coordenada Principal. Na tabela 2 pode-se verificar os valores atribuídos pela PC1 e PC2 para todas as variáveis analisadas nesse estudo, em ordem decrescente. Quanto maior o valor da PC, maior o impacto que essa variável exerce no conjunto de dados, ou seja, maior relevância na dinâmica do corpo de água.



Tabela 2: Resultados das PC *loadings* apresentadas para as variáveis analisadas nas águas do igarapé Açú

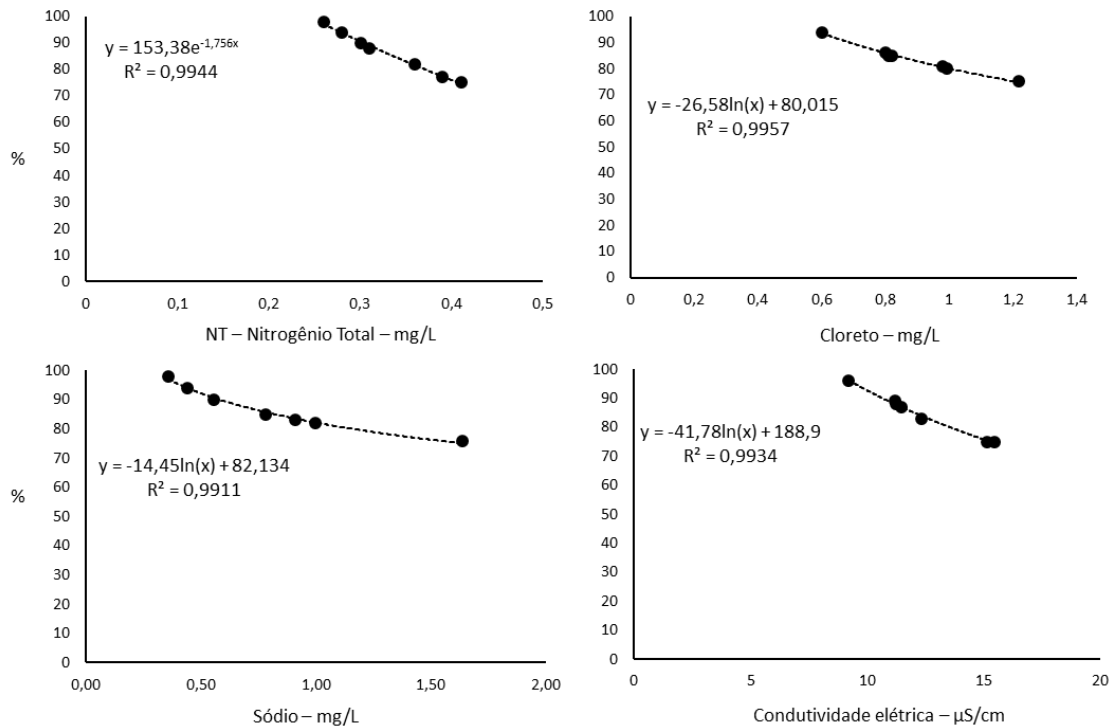
Variáveis	PC1	PC2
NT	0,899	DQO 0,769
Cl	0,842	PO4 0,65
Na	0,809	pH 0,609
CE	0,773	CF 0,606
NH4	0,643	MO 0,578
K	0,637	NH4 0,53
PO4	0,527	Mg 0,453
CF	0,525	HCO3 0,413
PT	0,331	Na 0,397
NO2	0,236	Turb 0,252
DBO	0,196	Cl 0,238
Ca	0,144	CE 0,221
STS	0,063	Ca 0,071
DQO	0,042	NT 0,052
NO3	-0,375	OD -0,013
OD	-0,407	NO3 -0,064
T	-0,501	K -0,131
pH	-0,511	NO2 -0,559
Mg	-0,676	STS -0,562
MO	-0,731	DBO -0,688
HCO3	-0,743	T -0,724
Turb	-0,779	PT -0,746

A PC1 trouxe a informação que o Nitrogênio Total – NT foi a variável mais significativa no conjunto estudado ( $PC=0,899$ ), seguido por cloreto – Cl ( $PC = 0,842$ ), sódio – Na ( $PC=0,089$ ) e Condutividade Elétrica – CE ( $PC=0,773$ ). SHOKUMBI *et al.*, (2020) indicaram que valores de *PCs* acima de 0,75 apontam para uma forte influência das variáveis no meio estudado e que valores de *PCs* entre 0,5 e 0,75 representam influência moderada. Valores abaixo de 0,5 denotam baixa influência que a variáveis exercem no sistema.

Além das quatro variáveis significativas apontadas na PC1 (NT, Cl, Na e CE) há ainda mais quatro variáveis que despontaram com influência moderada no conjunto: amônio – NH<sub>4</sub> ( $PC=0,643$ ), potássio - K ( $PC=0,637$ ), fosfato – PO<sub>4</sub> ( $PC=0,527$ ) e Coliformes Fecais – CF ( $PC=0,525$ ). Como demonstraram certa relevância no conjunto de dados, também foram incorporadas ao modelo de IQA para as águas pretas do igarapé Açú. Dessa forma, o Índice de Qualidade da Água proposto nesse trabalho se assentou na avaliação de oito variáveis destacadas pela PCA: NT, Cl, Na, CE, NH<sub>4</sub>, K, PO<sub>4</sub> e CF. A partir desta definição se elaborou as curvas para essas oito variáveis, bem como as equações características. Na Figura 3, por exemplo, tem-se as curvas e as equações

obtidas para as variáveis Nitrogênio Total, Cloreto, Sódio e Condutividade Elétrica. Diante das curvas apresentadas para o corpo de água referencial, sugeriu-se uma classificação em três categorias: uma de água ótima, outra de água intermediária e por fim, uma de água péssima.

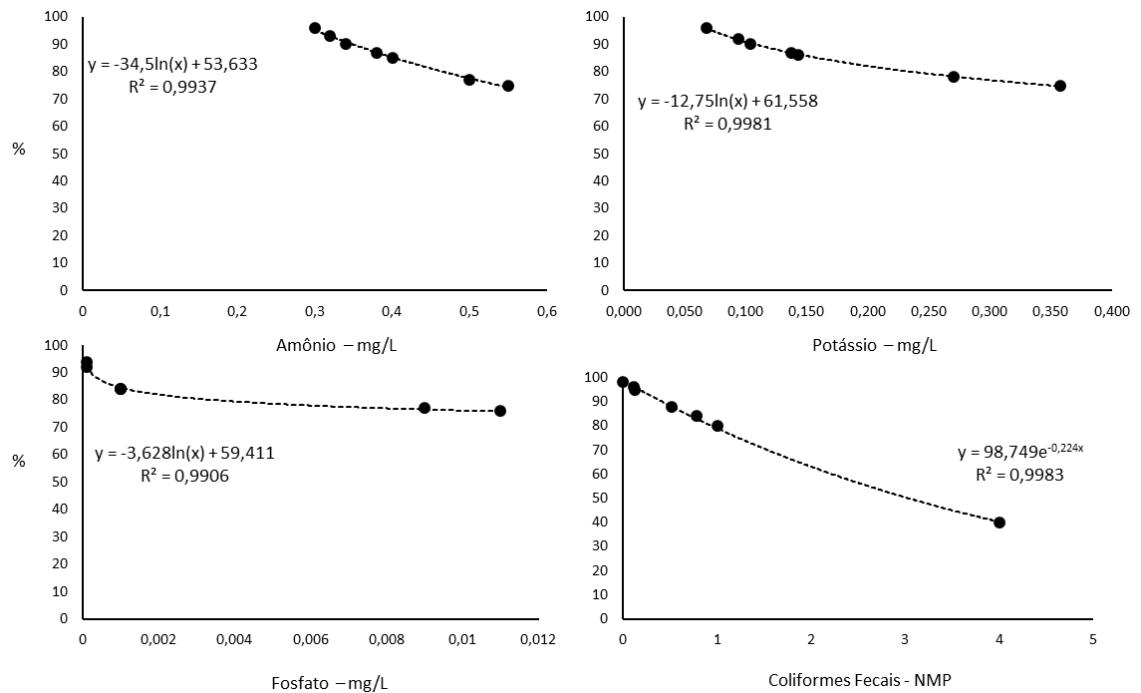
Figura 3: Curvas e equações obtidas para as variáveis Nitrogênio Total, Cloreto, Sódio e Condutividade Elétrica para águas do igarapé Açú, em Manaus.



Fonte: Lages *et al.*, 2023

A seguir, na Figura 4, tem-se as curvas e as equações obtidas para as variáveis amônio, potássio, fosfato, e coliformes fecais. As funções logarítmicas predominaram entre as equações propostas, seguidas pelas exponenciais. O modelo construído demonstrou que à medida que as variáveis tem seus valores aumentados, a qualidade das águas diminui.

Figura 4: Curvas e equações obtidas para as variáveis amônio, potássio, fosfato e coliformes fecais para águas do igarapé Açu, em Manaus.



Fonte: Lages *et al.*, 2023

Na tabela 3, sugere-se intervalos para as categorias de águas pretas superficiais observadas na cidade de Manaus. Tem-se os intervalos com base numa distribuição para 100%, em que, quanto mais próximo de 100, melhor a qualidade da água, conforme as próprias funções já demonstraram para as variáveis referencias desse estudo.

Tabela 3: Classificação em categorias para o modelo de IQA estatístico para as águas da do igarapé Açu.

Classificação	IQA
Péssima	< 49,0
Regular	50,0 – 75,0
Ótima	> 75,0

Diante desta classificação, montou-se uma equação geral, definida como:

$$\sum i. W$$

Onde  $i$  é o valor das médio das medidas obtidas durante os sete meses de coletas mensais e  $W$  o peso correspondente de cada variável. O valor de  $W$  foi estimado em função dos valores notados pela Análise da Componente Principal e na importância em

efeitos de contaminação. Dessa forma, os maiores pesos foram atribuídos ao Nitrogênio Total – NT e aos Coliformes Fecais – CF - 0,25. Os demais, todos com peso 0,1.

Com o modelo construído e com as equações característica para cada variável, buscou-se aplicar o IQA a outros corpos de água, como os da bacia hidrográfica do Educandos e corpos de água localizados na Reserva Adolpho Ducke. A bacia hidrográfica do Educandos é reconhecida como um ambiente já sob influência antropogênica, enquanto os corpos de água da reserva Ducke ainda são ambientes preservados, mas já sob certa pressão urbana ao seu entorno. Na tabela 4, tem-se os valores médios das oito variáveis observadas no igarapé Açu e os valores médios analisados nos demais corpos de água em que serão aplicados o modelo de IQA. Vale ressaltar que o P10 é o local de referência do presente estudo (Figura 1).

Tabela 4: Valores médios das variáveis analisadas durante o estudo – W são os pesos correspondentes atribuídos variáveis (medidas em mg L<sup>-1</sup>).

	NT	Cl	Na	CE*	NH <sub>4</sub>	K	PO <sub>4</sub>	<i>E. coli</i> **
W	0,25	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,25
P10*	0,30	0,90	0,79	12,28	0,28	0,16	0,00	0,63
P1	0,31	1,18	1,02	9,88	0,28	0,12	0,00	6,00
P2	4,27	14,10	14,06	215,63	3,88	5,17	0,08	1780,90
P3	5,05	24,88	24,59	386,86	4,65	4,67	0,08	2140,06
P4	5,82	20,15	19,79	297,77	5,13	5,05	0,05	1563,93
P5	3,49	17,65	21,36	288,73	3,04	5,30	0,08	2128,49
P6	2,73	18,00	21,78	283,31	2,57	4,95	0,05	1612,75
P7	8,75	25,39	24,15	347,14	8,44	4,54	0,37	1578,93
P8	5,87	21,63	26,37	299,36	5,68	5,19	0,27	2126,49
P9	8,47	27,09	28,05	316,10	8,13	5,22	0,35	1275,63
P11	0,52	0,69	0,53	16,60	0,40	0,05	0,00	1,00
P12	0,29	0,49	0,31	9,58	0,29	0,05	0,00	2,10
P13	16,09	22,48	12,70	184,00	8,26	11,09	10,64	2126,49

\* μS cm<sup>-1</sup>

\*\* NMP – Número Mais Provável

Com base nas categorias propostas pelo modelo estatístico do IQA e pela aplicação das equações aos resultados presentes na tabela 4, tem-se os resultados da tabela 5, com a classificação de: acima de 75 - *água ótima* e abaixo de 50, *água péssima*. Não se observou água com condição intermediária – IQA entre 50 e 75.

Tabela 5: Resultados do IQA para os locais em que o modelo estatístico foi aplicado

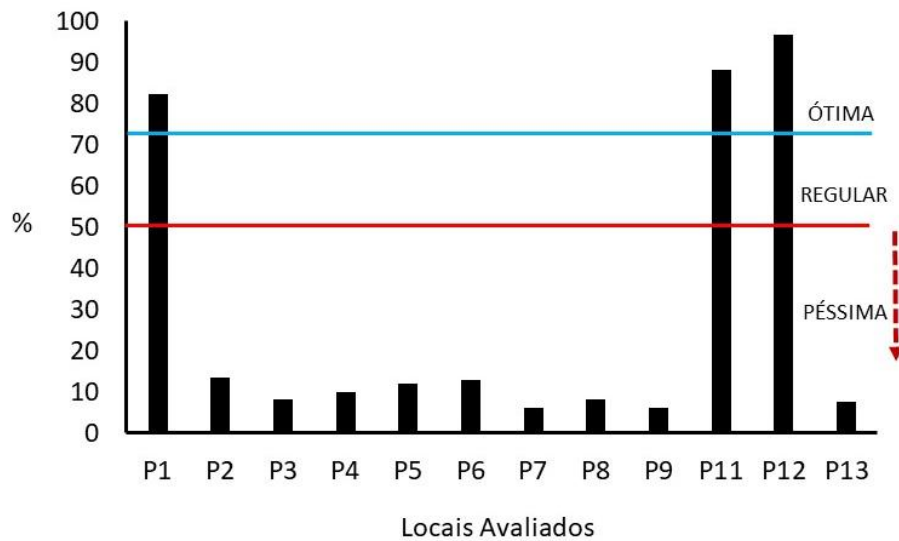
	NT	Cl	Na	CE	NH4	K	PO4	<i>E coli</i>	IQA
P1	22,82	7,56381612	8,18574768	9,32205144	9,765314749	8,859136	9,2347631	6,4384441	82,19
P2	0,02142276	0,96728198	4,39392473	-3,5607226	0,68566872	4,061756	6,8802642	1,39E-172	13,449596
P3	0,00542791	-0,5412886	3,58598314	-6,0027558	0,059253752	4,1913569	6,8782327	1,6E-207	8,1762101
P4	0,00140827	0,01934278	3,89952762	-4,9092508	-0,27613283	4,0909974	7,0183439	1,78E-151	9,8442364
P5	0,08311803	0,37081049	3,78979118	-4,7804049	1,532123434	4,0292874	6,8774209	2,13E-206	11,902147
P6	0,31950167	0,31929463	3,76107031	-4,7013144	2,112422573	4,1174449	7,0259742	3,17E-156	12,954394
P7	8,1133E-06	-0,5952263	3,61214512	-5,5501986	-1,99685125	4,2270704	6,3050806	6,19E-153	6,0020281
P8	0,0012856	-0,1697431	3,48502229	-4,9314407	-0,62918175	4,0563538	6,4215452	3,34E-206	8,2338414
P9	1,3375E-05	-0,7677689	3,39569924	-5,1588129	-1,86779941	4,0498173	6,3212402	1,98E-123	5,972389
P11	15,3867099	8,98778727	9,1275311	7,15231554	8,524503025	9,9753586	9,2826115	19,732893	88,169709
P12	22,9627225	9,897584	9,90575941	9,44906702	9,633966528	9,8772333	9,2826115	15,7728	96,781744
P13	2,0565E-11	-0,27186	4,54078512	-2,8980016	-1,92111483	3,0880942	5,0832157	3,34E-206	7,6211186

Observa-se na tabela 5 muitos valores negativos. Esses valores ocorreram em função da discrepância dos resultados encontrados na área urbana de Manaus. São valores que puxam os resultados para baixo nas equações, o que torna os resultados negativos. Portanto, se deduz que quanto maiores os valores medidos destes parâmetros na cidade, menores os valores de IQA. Isso implicou que algumas variáveis ficassem com os índices negativos. Entretanto, na avaliação final, os resultados se adequaram às categorias propostas no modelo.

Os pontos P1, P11 e P12 se revelaram como ambientes de *águas ótimas*. De fato, são ambientes preservados e que ainda conservam características de naturalidade para esse tipo de água. Tal fato, demonstra a necessidade de políticas de proteção desses ambientes, já que Manaus é uma cidade que pressiona de forma intensa os seus recursos hídricos.

Os demais pontos observados revelaram a tendência que vários estudos já apontaram para essas águas (LAGES *et al.*, 2022; CALVO e O, 2020; TORREZANI *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 1996). São águas já bastante degradadas e com altas taxas de despejo de efluentes domésticos e industriais. Diante disso, o modelo de IQA enquadrou de forma *péssima* os pontos P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e P9 na bacia hidrográfica do Educandos e o P13 da bacia hidrográfica do Acará, o chamado igarapé Matrinxã. A classificação de todos os pontos estudados pode ser vista na figura 5, abaixo:

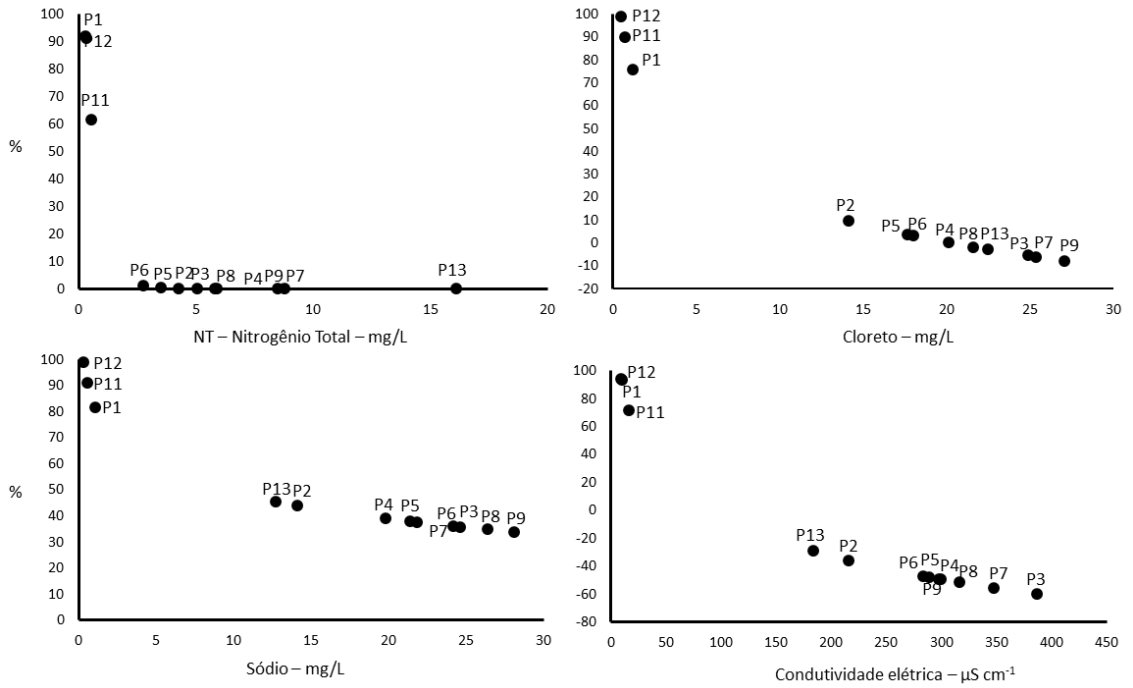
Figura 5: Classificação das águas estudadas pelo modelo de IQA construído com as águas do igarapé Açú



Fonte: Lages *et al.*, 2023

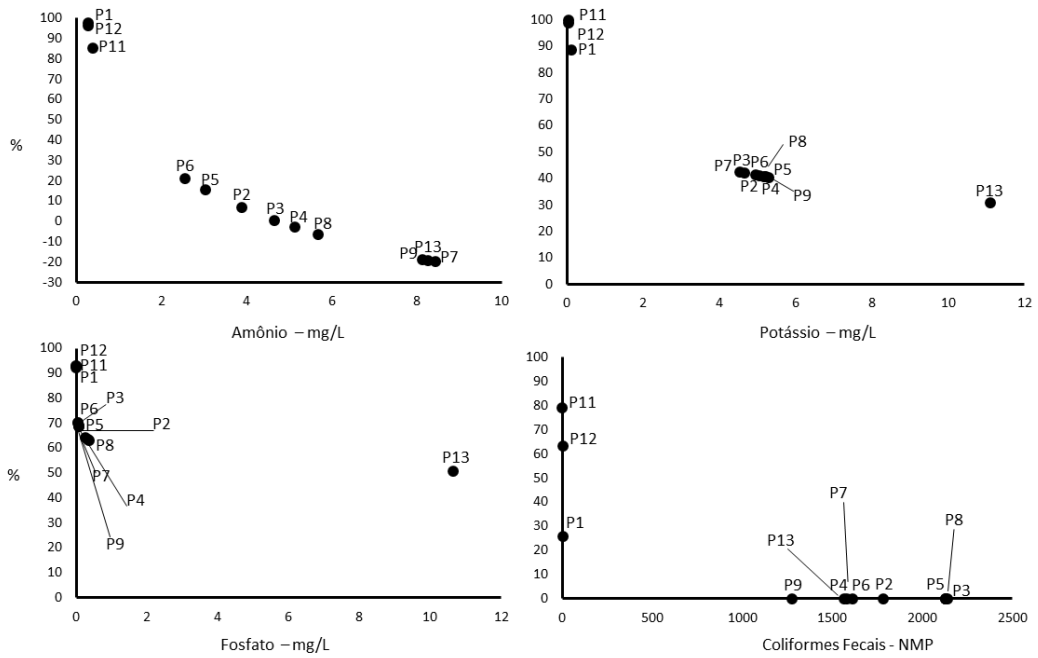
Por fim, já com os enquadramentos dos corpos de água definidos, procurou se demonstrar as curvas por variáveis, dentro dos valores de IQA observado para cada variável no conjunto de dados. Essa descrição auxiliou no entendimento sobre os pontos que são mais sensíveis à determinadas variáveis. Na figura 6 se nota o comportamento das curvas de Nitrogênio Total, cloreto, sódio e Condutividade Elétrica em todos os locais de coleta. Na Figura 7, tem-se as curvas para amônio, potássio, fosfato e Coliformes Fecais.

Figura 6: Curvas obtidas para Nitrogênio Total, cloreto, sódio e Condutividade Elétrica em todos os locais estudados.



Fonte: Lages *et al.*, 2023

Figura 7: Curvas obtidas para amônio, potássio, fosfato e Coliformes Fecais em todos os locais estudados.



Fonte: Lages *et al.*, 2023

As curvas apresentadas só atestaram a eficácia do modelo, onde as variáveis se enquadraram no mesmo comportamento das funções expressas para o local de referência – o igarapé Açu. Nota-se, desse modo, que as águas já contaminadas apresentaram valores inferiores a 50%. A exceção foram os pontos P1, P11 e P12, que só tiveram valores abaixo de 75% para coliformes fecais, provavelmente, em decorrência de influência natural de animais da floresta. Aliás, esses são os únicos locais em que ainda se verificou condições de naturalidade, conforme o próprio IQA proposto nesse estudo. São ambientes que ainda se resguardam da intensa atividade antrópica vista em Manaus.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As águas ácidas da Amazônia são únicas do planeta e guardam características próprias, como a alta acidez e a baixa condutividade elétrica. Por isso, em qualquer elaboração de critérios de qualidade da água, esses conceitos precisam ser levados em conta. A Análise da Componente Principal se mostrou uma importante ferramenta e se revelou muito propícia. Diante disso, podem-se agrupar algumas considerações sobre o IQA proposto para as águas pretas amazônicas:

- A PCA identificou variáveis importantes dentro do conjunto para águas pretas: Nitrogênio Total, Cloreto, sódio e condutividade elétrica. De fato, são variáveis importantes dentro do contexto de águas pretas amazônicas, tanto que foi demonstrado a forte influência que exercem no meio. A acidez das águas deve ser um bom condicionante para isso;
- As variáveis amônio, potássio, fosfato e coliformes fecais demonstram ter influência moderada no conjunto de dados. Contudo, apesar do baixo valor numérico, são variáveis que comprometem de forma decisiva a qualidade da água, como fosfato, e, principalmente os coliformes fecais;
- Das oito equações propostas no modelo IQA, seis foram logarítmicas e duas exponenciais, o que refletiu de forma positiva o enquadramento das águas: quanto maiores os valores medidos, menor a qualidade das águas;
- A aplicação do modelo IQA deste estudo mostrou que dos 12 locais avaliados, 3 se mostraram com qualidade ótima e 9 com qualidade péssima. Isso representa que 75% das águas avaliadas se encontra fora dos padrões mínimos de qualidade;



- Sugere-se, por fim, que mais corpos de água possam ser incorporados para a aplicação do modelo estatístico, até para a inserção de outras classificações e de enquadramentos para esses ambientes.

## AGRADECIMENTOS

O presente artigo é decorrente do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&DI) "IETÉ", que conta com financiamento da Samsung, usando recursos da Lei de Informática para a Amazônia Ocidental (Lei Federal nº 8.387/1991), estando sua divulgação de acordo com o previsto no artigo 39.º do Decreto nº 10.521/2020". Sendo este financiamento uma parceria INPA/SAMSUNG.”

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM pela oportunidade na qualificação científica, apoio logístico, material técnico e de consumo para o desenvolvimento das pesquisas.

## REFERÊNCIAS

ADIMALLA, Narsimha. Application of the entropy weighted water quality index (EWQI) and the pollution index of groundwater (PIG) to assess groundwater quality for drinking purposes: a case study in a rural area of Telangana State, India. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 80, p. 31-40, 2021.

American Public Health Association– APHA-2005. Standard Methods of the Experimentation of Water and Waster water. New York. 14 ed.

ALVARAES, C. A. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 22, No. 6, 711–728. 2014.

BRINGEL, S. R. B. Estudos do nível de poluição nos igarapés do Quarenta e do Parque Dez de Novembro. Manaus, Universidade de Tecnologia do Amazonas/UTAM, 86p. il. (Relatório Técnico), 1986.

CALVO, B. D.; OLIVEIRA, T. C. O. Hydrochemical Analysis of a Basin under Anthropogenic Influence and Effects in Manaus’ Shoreline – Central Amazonia. *Caminhos de Geografia*, pp 209 – 219, 2020.

FERREIRA, Sávio José Filgueiras et al. Efeito da pressão antrópica sobre igarapés na Reserva Florestal Adolpho Ducke, área de floresta na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 42, p. 533-540, 2012.

GUNTER, F. Principles of geochemistry. 2ª ed. Holanda, 1998

KHAN, Ramsha et al. Effect of COVID-19 lockdown on the water quality index of River Gomti, India, with potential hazard of faecal-oral transmission. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 25, p. 33021-33029, 2021.

LAGES, Anderson da Silva et al. Dynamics of heavy metals in the waters of Igarape do Quarenta: The water body that crosses the industrial hub in the Brazilian Amazon. **Open Science Journal**, v. 7, n. 2, 2022.

LENNHER, J. A. 1997. Origin and Nature of Humic Substances in the Waters of the Amazon River Basin. *Acta Amazônica*, 10: 513-526.

LIU, Changjiang et al. Assessing the factors influencing water quality using environment water quality index and partial least squares structural equation model in the Ebinur Lake Watershed, Xinjiang, China. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-16, 2022.

MORETTO, D. L., COSTA, A. B., LOBO, E. A., PANTA, E. Calibration of water quality index (WQI) based on resolution n 357/2005 of the environment national council (CONAMA) Brazil. *Acta Limnol Bras* 24(1):29-42, 2012.

MUKATE, SHRIKANT et al. Development of new integrated water quality index (IWQI) model to evaluate the drinking suitability of water. **Ecological indicators**, v. 101, p. 348-354, 2019.

PITA, R. C. S.; ROSARIO, G. C. S.; SILVA, F. F.; SILVA, M. L. S. Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. *Revista do Instituto de Geociências – USP. Geol. USP, Sér. cient.*, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 27- 96, março 2018. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v18-134253.

SHOKUNBI, Oluwatosin Sarah; OLUMUYIWA AJAYI, Olubode; SHOKUNBI, Olutayo Sunday. Seasonal variations of heavy metals concentrations and pollution assessment of major dumpsites in Ilisan-Remo, Nigeria. **Environmental Health Engineering and Management Journal**, v. 7, n. 3, p. 193-202, 2020.

SILVA, M. S. R.; RAMOS, J. F.; PINTO, A. G. N. Metais de transição nos sedimentos de igarapes de Manaus. *Acta Limnológica Brasiliensis*, v. 11, n. 2, p. 89 – 100, 1996.

SIOLI, H. 1968. Hydrochemistry and Geology in the Brazilian Amazon Region. *Amazoniana*. 3:267-277.

SIOLI, H. 1958. Valores de pH de águas da Amazônia, *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, 1: 1-18.

TORREZANI, Larissa et al. Índice de geoacumulação de mercúrio na bacia do Igarapé do Educandos (Manaus/Amazonas). **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 2, n. 3, p. 161-170, 2016.

UDDIN, M. G.; Nash, S.; Olbert, A. I. A Review of Water Quality Index Models and their use of Assessing Surface Water Quality. *Ecological Indicators* 122, 2021

WU, Zhaoshi et al. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. **Science of the Total Environment**, v. 612, p. 914-922, 2018.