



IV-123 - SISTEMA DE INFERÊNCIA NEBULOSA NA ELABORAÇÃO DE UM NOVO ÍNDICE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS – UM ESTUDO DE CASO NO RIO PARAÍBA DO SUL

André Lermontov⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (EQ/UFRJ). Mestre em Processos Químicos e Bioquímicos pela EQ/UFRJ. Doutorando em Processos Químicos e Bioquímicos pela EQ/UFRJ.

Lídia Yokoyama

Professora adjunto da EQ/UFRJ.

Mihail Lermontov

Professor adjunto GMA/IM/UFF.

Maria Augusta Soares Machado

Professora adjunto Faculdades IBMECRJ.

Endereço⁽¹⁾: TPQB/EQ/UFRJ, Centro Tecnologia-Bloco E, sala 206, 21949-900 - Brasil - Tel: (24) 9258-3487, Rio de Janeiro. E-mail: lermontov@globocom

RESUMO

As metodologias que utilizam lógica nebulosa, uma das ferramentas da inteligência artificial, vem cada vez mais sendo utilizada no tratamento das incertezas e subjetividades intrínsecas dos problemas ambientais. Este estudo propõe a criação de um novo índice de qualidade das águas, o Índice Nebuloso de Qualidade das Águas (INQA), através de uma interface facilitadora, o sistema de inferência nebulosa. Compara-se então este novo índice aos já calculados pelas diversas metodologias existentes. Esta nova metodologia é validada utilizando-se as análises do monitoramento do rio Paraíba do Sul, no trecho Paulista – SP, realizadas pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB) durante os anos de 2004 a 2006.

PALAVRAS-CHAVE: Índice de Qualidade das Águas, Lógica Nebulosa, Inferência Nebulosa

INTRODUÇÃO

A escassez progressiva de água nos países em desenvolvimento tem tornando a avaliação da qualidade da água de rios nos últimos anos um problema (Ongley, 1998). Quando relatórios de qualidade de águas são gerados, estes são voltados para um público técnico, apresentando dados de monitoramento com ênfase em parâmetros individuais, sem prover uma visão global da qualidade de um recurso hídrico aos “players” institucionais (gestores e tomadores de decisões), que muitas vezes não são técnicos. As metodologias para integrar variáveis de qualidade de água em índices específicos, estão sendo cada vez mais requisitadas no cenário nacional e internacional. Vários autores integraram variáveis de qualidade de água em índices (Mitchell, 1996; Pesce e Wunderlin, 1999; Cude, 2001; Liou et al., 2004; Said et al., 2004; Silva e Jardim, 2006). Tecnicamente estes índices são denominados de Índices de Qualidade de Água (IQA). A maioria teve sua origem num conceito de indexação desenvolvida pela U.S. National Sanitation Foundation (NSF, 2007).

É notória a necessidade crescente de técnicas mais avançadas para gerenciar a importância das variáveis de qualidade da água e metodologias para integrar parâmetros distintos envolvidos na avaliação dos processos. Neste sentido, emergem novas e alternativas metodologias de integração. A Inteligência Artificial passou assim a ser uma ferramenta na modelagem de qualidade da água (Chau, 2006). Através da lógica nebulosa novas metodologias vêm sendo desenvolvidas no âmbito do monitoramento e da gestão de variáveis ambientais (Silver, 1997, 2000).

Monitorar a qualidade da água e tomar decisões qualitativas e quantitativas com base em dados se tornou um desafio para os engenheiros ambientais nas diversas etapas, desde a coleta, armazenamento, processamento até a análise e interpretação dos resultados das amostras. Em todas as etapas incertezas se propagam ao longo da cadeia.



As limitações e complexidade das modelagens determinísticas, assim como as aproximações através de metodologias tradicionais de Índices de Qualidade das Águas, objetivaram o desenvolvimento de uma metodologia mais avançada de indexação, capaz de integrar e contabilizar as informações imprecisas, vagas e nebulosas que envolvem a qualidade da água.

O objetivo primário deste estudo é propor a criação de um novo Índice de Qualidade das Águas através de uma interface da Inteligência Artificial, baseada na Lógica Nebulosa e as ferramentas de Inferência Nebulosa, denominado este novo índice de Índice Nebuloso de Qualidade de Águas (INQA). O objetivo secundário é validar o INQA pelo meio de uma análise comparativa aos índices calculados através de algumas metodologias existentes na literatura. Para tal são utilizados os dados do monitoramento hidrográfico do rio Ribeira de Iguape, da região sudoeste de São Paulo, Brasil, durante os anos de 2004 a 2006, disponíveis nos Relatórios de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo (CETESB, 2004, 2005 e 2006).

DESENVOLVIMENTO

Índices de qualidade das águas

Um índice não objetiva descrever a variação de concentração de um poluente ou a alteração de um parâmetro isoladamente. Sintetizar em um único número uma realidade complexa é o maior desafio na elaboração de um IQA, pois inúmeras variáveis ambientais influenciam este diretamente. Portanto, uma definição clara dos objetivos que se desejam alcançar com um índice se faz necessária. A elaboração de um de IQA pode ser simplificada ao levar em consideração somente as variáveis críticas que afetam determinado corpo hídrico.

Dentre suas vantagens, os índices são considerados ferramentas facilitadoras de comunicação com o público leigo. Representam o status maior do que as variáveis isoladas. Também integram variáveis diversas em um único número, combinando unidades de medidas diferentes. Uma desvantagem no processo de indexação é que alguns parâmetros podem vir a influenciar drasticamente no resultado final, resultando em um índice tendencioso.

Horton (1965) desenvolveu, através de um estudo pioneiro, índices gerais, selecionando e ponderando parâmetros de qualidade de água diversos. Esta metodologia foi em seguida aperfeiçoada pela U.S. National Sanitation Foundation (NSF, 2007).

A fórmula convencional e pioneira para se calcular um IQA se dá, matematicamente, através da média ponderada de alguns parâmetros pré-estabelecidos e normalizados numa escala entre 0 e 100, multiplicados seus pesos relativos correspondentes disponíveis nas curvas de normalização e pesos relativos (NSF, 2007).

Conesa Fernandes-Vitora (1997) modificou a metodologia tradicional do cálculo do IQA e criou o um outro índice, denominado Índice Subjetivo de Qualidade das Águas – IQA_{sub} . Este novo índice difere do índice tradicional ao ter, introduzido em sua formulação, uma constante subjetiva, denominada k . Esta constante assume valores entre 1 e 0,25 com intervalos de 0,25, sendo o valor 1 representando uma água com aspecto visual cristalina e sem contaminante e 0,25 uma amostra visualmente muito poluída (fortes odores e cores intensas). Os parâmetros que compõem esta formulação (eq. 1) devem ser previamente normalizados através das curvas de Conesa (1995) com os devidos pesos relativos. O Índice Objetivo de Qualidade das Águas – IQA_{obj} resulta da eliminação desta constante k subjetiva.

$$IQA_{sub} = k \frac{\sum_i C_i \times P_i}{\sum_i P_i} \quad (1)$$

Onde:

k é a constante subjetiva;

C_i é o valor de cada parâmetro após a normalização (Conesa Fernandes-Vitora, 1997);

P_i é o valor do peso relativo de cada parâmetro (Conesa Fernandes-Vitora, 1997).



O IQA utilizado no Brasil foi adaptado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, a partir do índice da NSF. De 35 variáveis iniciais estudadas, o índice incorpora 9 consideradas relevantes para a avaliação da qualidade das águas, tendo como determinante principal a sua utilização para abastecimento público de água potável. As curvas de normalização para cada parâmetro, bem como os pesos relativos correspondentes, encontram-se disponíveis nos Relatórios de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo (CETESB, 2004, 2005 e 2006).

O IQA é calculado através do produtório ponderado (eq. 2) da qualidade das águas normalizadas graficamente, correspondentes a nove variáveis, n_i : Temperatura (Temp), pH, Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Coliformes Termotolerantes (Coli), Nitrogênio Total (NT), Fósforo Total (FT), Resíduo Total (RT) e Turbidez (Turb). Cada parâmetro é ponderado, w_i , por um valor variando entre 0 e 1, cujo somatório iguala-se a 1. O resultado é expresso em um valor numérico variando de 0 a 100 e divididos em 5 faixas de qualidades: [100 - 79] - Qualidade Ótima; [79 - 51] - Qualidade Boa; [51 - 36] - Qualidade Média; [36 - 19] - Qualidade Ruim; [19 - 0] - Qualidade Péssima (CETESB, 2004, 2005 e 2006).

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (2)$$

Silva e Jardim (2006) usaram o conceito do operador mínimo a fim de desenvolver o seu índice, denominado de Índice de Qualidade das Águas para a proteção da vida aquática (IQA_{PVA}). Este índice integrou poucas variáveis ambientais na sua formulação, somente as necessárias para a sua aplicação. Isto causou a minimização de um clássico e indesejável efeito na elaboração de índices, o efeito eclipse. Este efeito é resultante da agregação de inúmeras variáveis ambientais em um único número, produzindo uma atenuação do impacto negativo de uma das variáveis frente ao comportamento estável das demais (Landwehr, 1976; House, 1987). O IQA_{PVA} utiliza somente dois parâmetros, a amônia total (AT) e o oxigênio dissolvido (OD) conforme equação (eq. 3):

$$IQA_{pal} = \min(AT_n, OD_n) \quad (3)$$

Um quarto índice, denominado de IQA_{min} , foi proposto por Pesce e Wunderlin (2000). O IQA_{min} é calculado através da média aritmética dos valores normalizados (eq. 4) pelas curvas de Conesa (Conesa, 1995) de três parâmetros ambientais: Oxigênio Dissolvido (OD), Turbidez (Turb) e Fósforo Total (FT).

$$IQA_{min} = \frac{OD + Turb + FT}{3} \quad (4)$$

Encontramos na literatura outras metodologias de cálculo de índices. Bordalo et al. (2001) modificou a equação do Índice de Qualidade das Águas Escocês (SDD, 1976) e adaptou esta à rios tropicais, usando esta nova equação para indexar um rio na Tailândia. Stambuk Giljanovic (1999) apresentou um índice de avaliação das águas. Diferentemente de outros índices, eles integraram no índice parâmetros físico-químicos e coeficientes de mineralização e corrosão. Estes dois últimos índices e outros não citados aqui não serão considerados neste estudo.

Inferência nebulosa

Os sistemas baseados em conhecimento ou sistemas especialistas são alguns dos campos da Inteligência Artificial (IA). A essência destes sistemas é a aquisição de uma base de conhecimento heurístico, geralmente representada através de um conjunto de expressões condicionais qualitativas e com significado verbal, cujo mérito é ser semanticamente claro. Esses sistemas são capazes de ampliar sua base de conhecimento definida inicialmente, através de um processo de inferência ou “aprendizado” e são, por isso, às vezes, chamados de sistemas inteligentes.

Um dos segmentos de pesquisa da IA é a denominada Lógica Nebulosa. Foi concebida inicialmente como uma forma para representar um conhecimento inerentemente vago ou de natureza lingüística. Sua base é



constituída pela matemática dos conjuntos nebulosos, a qual foi concebida para tratar das incertezas através de uma abordagem alternativa (ZADEH, 1965).

A inferência nebulosa é o resultado do casamento da lógica nebulosa com os sistemas baseados em conhecimento (Yager, 1994). Os modelos mais comuns utilizados para representar o processo de classificação de corpos hídricos se denominam de modelos determinísticos conceituais. Determinísticos, porque ignoram as propriedades estocásticas inerentes ao processo; e conceituais, porque buscam uma interpretação física para os diversos subprocessos envolvidos. Esses modelos utilizam, muitas vezes, uma grande quantidade de parâmetros, o que torna a sua modelagem uma tarefa bastante complexa e demanda muito tempo.

Os modelos baseados em regras nebulosas têm-se apresentado como instrumentos adequados para representar incertezas e imprecisões de conhecimento e de dados. Esses modelos podem representar aspectos qualitativos do conhecimento e dos processos de inferência humana, sem empregar análise quantitativa precisa. São, portanto, menos precisos do que os modelos numéricos convencionais. Entretanto, o ganho em simplicidade, velocidade computacional e flexibilidade que resultam do uso desses modelos, podem compensar uma possível perda de precisão (Bárdossy, 1995).

Há, ainda, pelo menos três razões pelas quais a abordagem baseada em regras nebulosas podem ser justificadas (Bárdossy, 1995): primeiro, o fato de que uma ampla variedade de relações não lineares pode ser descrita; segundo, o fato desses modelos serem simples, porque cada modelo é composto de um conjunto de modelos locais simples; e terceiro, o fato deles serem verbalmente interpretáveis, o que lhes dá uma característica próxima aos modelos de IA.

O sucesso com o qual os sistemas baseados em regras nebulosas têm sido utilizados para modelar sistemas dinâmicos em outros campos da ciência e da engenharia sugere que esta abordagem possa mostrar-se um efetivo e eficiente caminho para modelar a criação de um IQA, principalmente, quando o conhecimento explícito dos sub-processos internos do processo de indexação não é requerido.

A lógica nebulosa transcende a lógica tradicional com a introdução do conceito da verdade parcial, permitindo uma pertinência simultânea e parcial em vários conjuntos ao invés de uma inclusão total em um conjunto conforme definido por Ross (2004).

A inferência nebulosa é o processo que formula o mapeamento de um dado conjunto de entrada a um conjunto de saída usando a lógica nebulosa. Este mapeamento provê base para tomadas de decisões ou discernimento de padrões. O processo de inferência nebulosa envolve quatro etapas importantes: 1) conjuntos nebulosos e funções de pertinência; 2) operações com conjuntos nebulosos; 3) lógica nebulosa; e 4) regras de inferência. Um aprofundamento destes conceitos pode ser encontrado em Bárdossy (1995), Yen e Langari (1999), Ross (2004), Cruz (2004) e Caldeira (2007).

A teoria dos conjuntos nebulosos vem sendo cada dia mais desenvolvida, a fim de mapear as interpretações lingüísticas e incertezas dos fenômenos ambientais (Silvert, 1997, 2000). Algumas metodologias que fazem uso do sistema inferência nebulosa foram testadas em situações reais de gestão, monitoramento e problemas ambientais.

O conceito da teoria dos conjuntos nebulosos foi descrito por Chau (2006) como sendo útil na modelagem da qualidade das águas, uma vez que lida com uma aproximação alternativa em torno dos problemas em que os objetivos e fronteiras não estão bem definidos ou são imprecisos.

Ocampo-Duque et al. (2006) descreveram simples e profundamente a teoria em torno dos sistemas de inferência nebulosa envolvendo qualidade de águas. Utilizaram a ferramenta da inferência nebulosa para indexar 27 parâmetros de monitoramento de um rio. Após normalizar todos os parâmetros e os agrupar em 5 grupos de parâmetros afins, estes foram nebulizados em 3 conjuntos. O resultado após a inferência foi a criação de um índice nebuloso de qualidade da água. Icaga (2007) aplicou a inferência nebulosa em qualidade de rios para enquadrá-los em suas classes de uso. Dahiya et al. (2007) aplicaram a teoria dos conjuntos nebulosos na avaliação dos parâmetros físico-químicos de águas subterrâneas para fins da determinação da sua potabilidade.



O rio Paraíba do Sul

O rio Paraíba do Sul é formado pela confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna, na serra da Bocaina (MG), e deságua no norte fluminense, no município de São João da Barra, percorrendo uma extensão aproximada de 1150km (Jornal da ASEAC, 2001). A bacia do Rio Paraíba do Sul está situada na região Sudeste do Brasil e ocupa aproximadamente 55.400 km², compreendendo os estados de São Paulo (13.500 km²), Rio de Janeiro (21.000 km²) e Minas Gerais (20.900 km²). A bacia abrange 180 municípios, com uma população total de 5.588.237 habitantes, 88,8% da qual vive em áreas urbanas. Apesar de a bacia do rio Paraíba do Sul ser fortemente urbanizada e industrializada, o principal usuário da água, em termos de volume de captação, é o setor de irrigação (49,73 m³/s), não considerando as transposições dos rios Paraíba do Sul (160 m³/s) e Pirai (20 m³/s) para a região metropolitana do Rio de Janeiro. O abastecimento urbano utiliza cerca de 16,5 m³/s enquanto que o setor industrial capta 13,6 m³/s, superando somente o setor da pecuária, cujo consumo é inferior a 4 m³/s.

Este estudo foi restrito à área de abrangência da segunda Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI 02) da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), ligada à Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Estado de São Paulo como mostra a Figura 1. Os principais usos do solo são: urbano-industrial e rural, com presença de pastagens (545.156 hectares); culturas temporárias (57.709 hectares); fruticultura (2.996 hectares); horticultura (438) e silvicultura (83.667 hectares). Cerca de 5% da população do estado vive nesta UGRHI (1.944.638 pessoas) com 91% da população predominantemente urbana, espalhadas por 34 municípios. Os principais usos da água são o abastecimento público e industrial, geração de energia elétrica, afastamento de efluentes e irrigação de plantações. 89% dos efluentes produzidos nesta bacia são coletados e na ordem de 33% destes são tratados. A demanda por recursos hídricos em função da expansão demográfica nesta UGRHI cresce a cada dia. As prefeituras, com seus serviços autônomos, e as empresas estaduais de saneamento procuram atender às novas demandas apenas aumentando o fornecimento de água, sem a mesma contrapartida em relação ao tratamento de esgotos (DE SOUZA JR, 2004). Estima-se que aproximadamente 72 toneladas de DBO (carga poluidora remanescente) são lançadas neste rio para afastamento (CETESB, 2006).

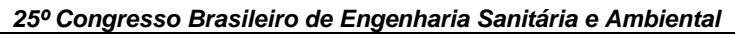
Desenvolvimento do índice nebuloso de qualidade das águas

O desenvolvimento do Índice Nebuloso de Qualidade das Águas (INQA) não é uma tarefa fácil. Integrar a lógica nebulosa e o sistema de inferência nebuloso às variáveis de monitoramento ambiental sem prejudicar o resultado final requer uma mudança de conceito.

Na metodologia proposta, os parâmetros foram normalizados e agrupados através de um sistema de inferência nebulosa. Os conjuntos nebulosos foram definidos nos termos de uma função de pertinência que mapeia um domínio de interesse num intervalo [0,1].

Os formatos das curvas mapeiam a função de pertinência em cada conjunto e estas mostram o grau em que um valor específico pertence ao respectivo conjunto (eq. 5).

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (5)$$


$$\mu_A = \left\{ \begin{array}{ll} = 1 & \text{x é membro integral de A} \\ (0,1) & \text{x é membro parcial de A} \\ = 0 & \text{x não é membro de A} \end{array} \right\} \quad (6)$$
$$f(x; a, b, c, d) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{se } x < a \text{ e } d < x \\ \frac{(a-x)}{(a-b)} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{(d-x)}{(d-c)} & c \leq x \leq d \end{array} \right\} \quad (7)$$

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

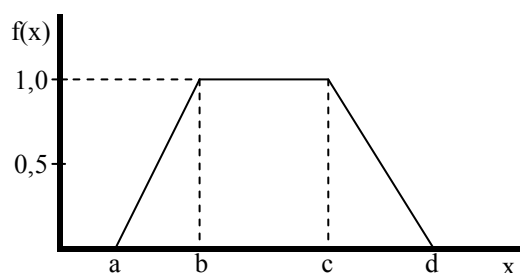


Figura 2 – Função de pertinência trapezoidal

Triangulares:

$$f(x; a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{se } x < a \text{ e } c < x \\ \frac{(a-x)}{(a-b)} & a \leq x \leq b \\ \frac{(c-x)}{(c-b)} & b \leq x \leq c \end{array} \right\} \quad (\text{eq. 8})$$

A função de pertinência triangular tem a forma da Figura 3.

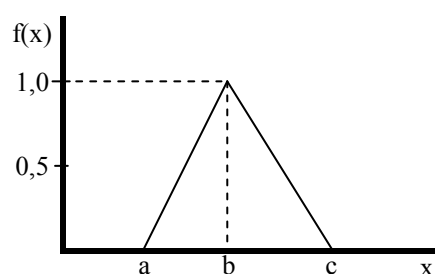


Figura 3 – Função de pertinência triangular

Como base para a criação dos conjuntos nebulosos antecedentes deste estudo foram empregados os intervalos, curvas e equações utilizados pela CETESB para os parâmetros pH, demanda bioquímica de oxigênio, coliformes termotolerantes, nitrogênio total, fósforo total, sólidos totais e turbidez e as curvas de Conessa Fernandez-Victória (1997) para os parâmetros analíticos temperatura e oxigênio dissolvido.

Em um sistema nebuloso baseado em regras, a cada conjunto nebuloso é atribuída uma descrição linguística. Inicialmente foram utilizados cinco conjuntos nebulosos para os antecedentes e consequentes: ótimo, bom, médio, ruim e péssimo. Entretanto, foi detectada a introdução de um desvio relativo elevado ao serem utilizados somente cinco conjuntos para efeito de normalização e agregação. Esta estratégia foi então abandonada. Partindo da premissa de uma necessidade de mais conjuntos, foram introduzidos subconjuntos antes, entre e após cada conjunto inicialmente escolhido. Assim foram introduzidos mais seis conjuntos, totalizando tanto para os antecedentes quanto para os consequentes das inferências IN01 a IN05 onze conjuntos nebulosos enumerados e nomeados linguisticamente conforme um grau perceptível de qualidade, variando de: muito ótimo, ótimo, muito bom, bom, médio bom, médio, médio ruim, ruim, muito ruim, péssimo até muito péssimo. Os conjuntos criados são apresentados nos Quadros 1,2,3, 4, 5 e, 6.

Para os parâmetros temperatura e pH foram usados dois conjuntos com os mesmos termos linguísticos. Estes parâmetros têm os exatamente os mesmos conjuntos acima e abaixo do ponto Muito Ótimo conforme se distanciam deste em ambas as direções. Os conjuntos situados abaixo deste melhor ponto foram marcados com o símbolo ▼. A função de pertinência trapezoidal foi empregada somente para os conjuntos Muito Ótimo de cada grupo e triangular para todas as outras variáveis.



Este estudo utilizou o modelo linguístico de inferência nebulosa, no qual os conjuntos de entrada, as variáveis de qualidade de água, chamadas de antecedentes, foram processadas através de um conjunto de regras linguísticas do tipo se / então, tendo como resultado um conjunto de saída, os grupos Gr01 a Gr05, denominados consequentes das primeiras inferências. Empregou-se uma inferência nebulosa tanto para normalizar quanto para agrupar parâmetros analíticos afins em grupos de saída. Os resultados dos consequentes destas cinco inferências foram utilizados como antecedentes para a inferência seis (IN 06), representadas na Figura 4, tendo como consequente um resultado final que foi denominado de índice nebuloso de qualidade das águas, o INQA proposto por esta metodologia.

Quadro 01 – Conjuntos nebulosos de entrada para normalização dos parâmetros do Grupo 01

Gr01								
Parâmetro	Temperatura				Potencial Hidrogeniônico			
Símbolo	Temp				pH			
Unidade	°C				Sorensen			
Intervalo	-6 - 45				1 - 14			
Variável linguística	a	b	c	d	a	b	c	d
Muito Ótimo - MO	15	16	21	22	6,80	6,90	7,10	7,75
Ótimo - O	14	15	16		7,10	7,75	8,25	
Ótimo - O ▼	21	22	24		6,60	6,80	6,90	
Muito Bom - MB	13	14	15		7,75	8,25	8,50	
Muito Bom - MB ▼	22	24	26		6,30	6,60	6,80	
Bom - B	10	13	14		8,25	8,50	8,75	
Bom - B ▼	24	26	28		6,10	6,30	6,60	
Médio/Bom - MedB	5	10	13		8,50	8,75	9,00	
Médio/Bom - MedB ▼	26	28	30		5,85	6,10	6,30	
Médio - Med	0	5	10		8,75	9,00	9,20	
Médio - Med ▼	28	30	32		5,60	5,85	6,10	
Médio/Ruim - MedR	-2	0	5		9,00	9,20	9,60	
Médio/Ruim - MedR ▼	30	32	36		5,20	5,60	5,85	
Ruim - R	-4	-2	0		9,20	9,60	10,00	
Ruim - R ▼	32	36	40		4,75	5,20	5,60	
Muito Ruim - MR	-6	-4	-2		9,60	10,00	10,50	
Muito Ruim - MR ▼	36	40	45		4,00	4,75	5,20	
Péssimo - P	-6	-6	-4		10,00	10,50	12,00	
Péssimo - P ▼	40	45	45		2,00	4,00	4,75	
Muito Péssimo - MP	-6	-6	-6		10,50	14,00	14,00	
Muito Péssimo - MP ▼	45	45	45		1,00	1,00	4,00	

Quadro 02 – Conjuntos nebulosos de entrada para normalização dos parâmetros do Grupo 02

Gr02								
Parâmetro	Oxigênio Dissolvido				Demanda Bioquímica de Oxigênio			
Símbolo	OD				DBO			
Unidade	mg/l				mg/l			
Intervalo	0 - 9				0 - 30			
Variável linguística	a	b	c	d	a	b	c	d
Muito Ótimo - MO	7,0	7,5	9,0	9,0	0	0	0,5	2
Ótimo - O	6,5	7	7,5		0,5	2	3	
Muito Bom - MB	6	6,5	7		2	3	4	
Bom - B	5	6	6,5		3	4	5	
Médio/Bom - MedB	4	5	6		4	5	6	
Médio - Med	3,5	4	5		5	6	8	
Médio/Ruim - MedR	3	3,5	4		6	8	12	
Ruim - R	2	3	3,5		8	12	15	
Muito Ruim - MR	1	2	3		12	15	22	
Péssimo - P	0	1	2		15	22	30	
Muito Péssimo - MP	0	0	1		22	30	30	



Quadro 03 – Conjuntos nebulosos de entrada para normalização dos parâmetros do Grupo 03

Gr03				
Parâmetro	Coliformes Termotolerantes			
Símbolo	Coli			
Unidade	NMP/100 ml			
Intervalo	0 - 18.000			
Variável linguística	a	b	c	d
Muito Ótimo - MO	0	0	1	1
Ótimo - O	1	2	3	
Muito Bom - MB	2	3	8	
Bom - B	3	8	16	
Médio/Bom - MedB	8	16	40	
Médio - Med	16	40	100	
Médio/Ruim - MedR	40	100	300	
Ruim - R	100	300	1000	
Muito Ruim - MR	300	1000	6000	
Péssimo - P	1000	6000	18000	
Muito Péssimo - MP	6000	18000	18000	

Quadro 04 – Conjuntos nebulosos de entrada para normalização dos parâmetros do Grupo 04

Gr04								
Parâmetro	Nitrogênio Total				Fósforo Total			
Símbolo	NT				FT			
Unidade	mg/l				mg/l			
Intervalo	0 - 100				0 - 10			
Variável linguística	a	b	c	d	a	b	c	d
Muito Ótimo - MO	0	0	0,5	2	0,0	0,0	0,1	0,2
Ótimo - O	0	2	4		0,1	0,2	0,3	
Muito Bom - MB	2	4	6		0,2	0,3	0,4	
Bom - B	4	6	8		0,3	0,4	0,6	
Médio/Bom - MedB	6	8	10		0,4	0,6	0,8	
Médio - Med	8	10	15		0,6	0,8	1,0	
Médio/Ruim - MedR	10	15	25		0,8	1,0	1,5	
Ruim - R	15	25	35		1,0	1,5	3	
Muito Ruim - MR	25	35	50		1,5	3	6	
Péssimo - P	35	50	100		3	6	10	
Muito Péssimo - MP	50	100	100		6	10	10	

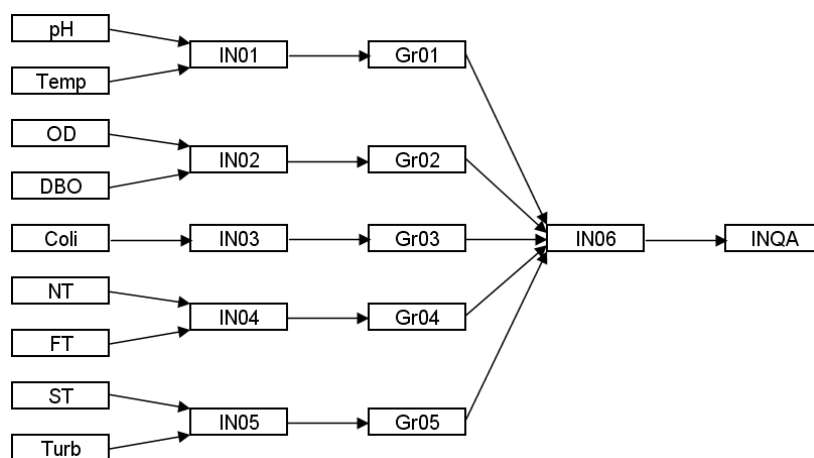
Quadro 05 – Conjuntos nebulosos de entrada para normalização dos parâmetros do Grupo 05

Gr05								
Parâmetro	Sólidos Totais				Turbidez			
Símbolo	ST				Turb			
Unidade	mg/l				mg/l			
Intervalo	0 - 750				0 - 150			
Variável linguística	a	b	c	d	a	b	c	d
Muito Ótimo - MO	0	0	5	50	0	0,0	0,5	2,5
Ótimo - O	0	50	150		0,5	2,5	7,5	
Muito Bom - MB	50	150	250		2,5	7,5	12,5	
Bom - B	150	250	320		7,5	12,5	22,5	
Médio/Bom - MedB	250	320	400		12,5	22,5	35	
Médio - Med	320	400	450		22,5	35	50	
Médio/Ruim - MedR	400	450	550		35	50	70	
Ruim - R	450	550	600		50	70	95	
Muito Ruim - MR	550	600	650		70	95	120	
Péssimo - P	600	650	750		95	120	150	
Muito Péssimo - MP	650	750	750		120	150	150	

O primeiro grupo (Gr01) normalizou e agregou os parâmetros físicos pH e temperatura. O segundo (Gr02) normalizou o oxigênio dissolvido e a demanda bioquímica de oxigênio. Os coliformes termotolerantes, grupo microbiológico, foram normalizados independentemente (Gr03), uma vez constatada a inexistência de outro parâmetro analítico semelhante ou afim. O quarto grupo (Gr04) englobou os nutrientes como o nitrogênio total e fósforo total e o quinto (Gr05) agregou e normalizou os sólidos totais e a Turbidez.

Quadro 06 – Conjuntos nebulosos de saída de cada grupo

Grupo de Saída				
Intervalo	0 - 100			
Unidade	adimensional			
Variável linguística	a	b	c	d
Muito Ótimo - MO	0	0	1	10
Ótimo - O	0	10	20	
Muito Bom - MB	10	20	30	
Bom - B	20	30	40	
Médio/Bom - MedB	30	40	50	
Médio - Med	40	50	60	
Médio/Ruim - MedR	50	60	70	
Ruim - R	60	70	80	
Muito Ruim - MR	70	80	90	
Péssimo - P	80	90	100	
Muito Péssimo - MP	90	100	100	


Figura 4 – Fluxograma de processamento das inferências

As regras para normalização e agrupamento seguiram a lógica conforme o exemplo descrito a seguir. O consequente das regras obedeceu a uma imposição similar à de um operador mínimo, ou seja, o consequente acompanha o parâmetro de pior qualidade:

Se PP é MO e SP é MO então saída do GR é MO

Se PP é MO e SP é O então saída do Grupo é O

Se PP é O e SP é MO então saída do Grupo é O

...

Se PP é MO e SP é MP então saída do Grupo é MP

Se PP é MP e SP é MO então saída do Grupo é MP

Sendo:

PP – Primeiro Parâmetro;

SP – Segundo Parâmetro ;

GR – Grupo.

Todo o processamento computacional desta metodologia foi implementado através da utilização do software MATLAB®. As rotinas computacionais completas para todos os parâmetros com seus respectivos conjuntos nebulosos e inferências utilizadas encontram-se no anexo deste trabalho.

O índice nebuloso de qualidade das águas ou INQA é o resultado da inferência nebulosa numero 6 da Figura 04, que tem como seus conjuntos antecedentes os valores quantitativos dos Grupos 01 a 05 das inferências IN01 a IN05 dentro de um novo sistema de inferência. Os resultados quantitativos dos Grupos 01 a 05 são novamente nebulizados a uma esfera qualitativa através de novos conjuntos nebulosos e processados dentro de uma nova rotina de inferência nebulosa com outro conjunto de regras mais complexas.

Os conjuntos dos antecedentes (Grupos 01 a 05) e o conjunto consequente (INQA) foram criados através de novas funções de pertinência trapezoidais e triangulares, como mostram o Quadro 07 e a Figura 05. Para o



desenvolvimento desta inferência foram utilizados somente cinco conjuntos nebulosos. Esta quantidade e as respectivas fronteiras entre os conjuntos foram delimitadas pelos padrões de qualidade do IQA utilizado pela CETESB, apresentados no Quadro 08. Assim, por exemplo, foi pressuposto que a fronteira que separa um índice entre Bom e Ótimo assume 50% de pertinência, tanto no conjunto nebuloso Ótimo quanto no Bom, e assim por diante. Esta metodologia demonstra assim, a inexistência de uma fronteira rígida entre as classes. A Figura 06 representa graficamente a inserção de cada conjunto nebuloso e sua relação com limites propostos pelo IQA utilizado pela CETESB.

Quadro 07 – Conjuntos nebulosos dos antecedentes e consequente da inferência IN06

Gr01, 02, 03, 04, 05 e INQA				
Intervalo	0 - 100			
Unidade	adimensional			
Variável linguística	a	b	c	d
Ótimo	65	90	100	100
Bom	44	65	90	
Médio	28	44	65	
Ruim	0	28	44	
Péssimo	0	0	9	28

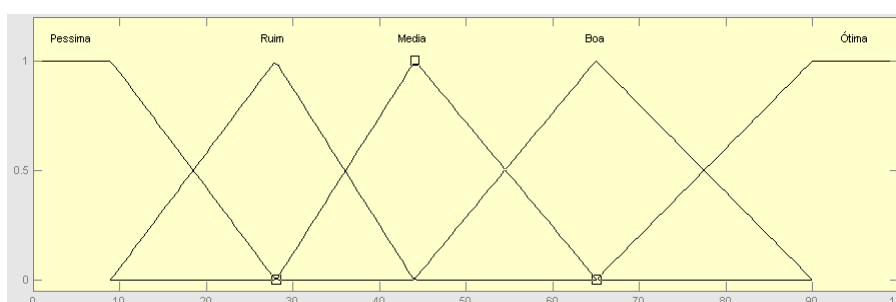


Figura 5 – Conjuntos nebulosos dos antecedentes e do consequente para a inferência IN06

Quadro 08 – Limites dos valores dos IQAs utilizados pela CETESB

IQA ≤ 19	- Péssimo
19 < IQA ≤ 36	- Ruim
36 < IQA ≤ 51	- Médio
51 < IQA ≤ 79	- Bom
79 < IQA ≤ 100	- Ótimo

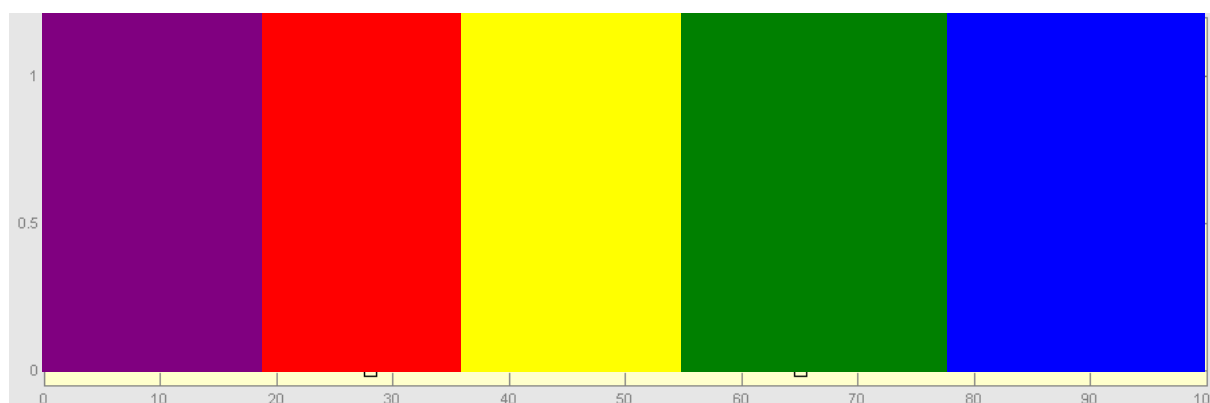


Figura 06 – Conjuntos nebulosos e sua relação com limites do IQA da CETESB

Para o processamento da inferência IN06 foram criadas as regras que seguiram um sistema lógico descrito a seguir:

A cada variável linguística de um conjunto nebuloso foi atribuído um valor variando de 1 a 5 e a cada grupo antecedente uma letra, de A a E, como mostram os Quadros 09 e 10.

**Quadro 09: Valores da variáveis linguísticas**

Variável	Valor atribuído
Ótimo	1
Bom	2
Mediano	3
Ruim	4
Péssimo	5

Quadro 10: Atribuição de letra para cada grupo antecedente

Variável	Valor atribuído
Grupo 01	A
Grupo 02	B
Grupo 03	C
Grupo 04	D
Grupo 05	E

Em seguida foi iniciado um longo processo de montagem de regras nebulosas.

Regra 0001: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 1 e E é 1	então INQA é 1
Regra 0002: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 1 e E é 2	então INQA é 1
Regra 0003: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 1 e E é 3	então INQA é 1
Regra 0004: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 1 e E é 4	então INQA é 1
Regra 0005: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 1 e E é 5	então INQA é 2
Regra 0006: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 2 e E é 1	então INQA é 1
Regra 0007: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 2 e E é 2	então INQA é 1
Regra 0008: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 2 e E é 3	então INQA é 1
Regra 0009: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 2 e E é 4	então INQA é 2
Regra 0010: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 2 e E é 5	então INQA é 2
Regra 0011: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 3 e E é 1	então INQA é 1
Regra 0012: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 3 e E é 2	então INQA é 1
Regra 0013: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 3 e E é 3	então INQA é 1
Regra 0014: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 3 e E é 4	então INQA é 1
Regra 0015: Se A é 1 e B é 1 e C é 1 e D é 3 e E é 5	então INQA é 1
...	
Regra 0621: Se A é 1 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 1	então INQA é 3
Regra 0622: Se A é 1 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 2	então INQA é 4
Regra 0623: Se A é 1 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 3	então INQA é 4
Regra 0624: Se A é 1 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 4	então INQA é 4
Regra 0625: Se A é 1 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 5	então INQA é 5
Regra 0626: Se A é 2 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 1	então INQA é 1
...	
Regra 1824: Se A é 3 e B é 5 e C é 3 e D é 5 e E é 4	então INQA é 4
Regra 1825: Se A é 3 e B é 5 e C é 3 e D é 5 e E é 5	então INQA é 5
Regra 1826: Se A é 3 e B é 5 e C é 4 e D é 1 e E é 1	então INQA é 2
Regra 1827: Se A é 3 e B é 5 e C é 4 e D é 1 e E é 2	então INQA é 3
...	
Regra 3120: Se A é 5 e B é 5 e C é 5 e D é 4 e E é 5	então INQA é 5
Regra 3121: Se A é 5 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 1	então INQA é 5
Regra 3122: Se A é 5 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 2	então INQA é 5
Regra 3123: Se A é 5 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 3	então INQA é 5
Regra 3124: Se A é 5 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 4	então INQA é 5
Regra 3125: Se A é 5 e B é 5 e C é 5 e D é 5 e E é 5	então INQA é 5

A lógica para determinação do valor do INQA correspondente a cada regra para o consequente encontra-se descrito a seguir.

A cada variável linguística é atribuído um valor numérico. Somando-se todos os valores atribuídos às variáveis, obtém-se como resultado um valor numérico compreendido entre 5 e 25. Usando todas as combinações possíveis, são obtidos 21 resultados. A cada resultado é atribuído um valor em uma escala de 0 a



100, perfazendo toda a escala de valores, o mais similar possível à do IQA da CETESB. Os valores e a respectiva escala são mostrados no Quadro 11. Ao INQA é atribuída uma variável linguística do Quadro 11.

Através deste procedimento foram criadas 3125 regras e 5 grupos, tendo cada um 5 possibilidades, para a inferência nebulosa IN06. Todo o procedimento contou com o auxílio do “fuzzy logic toolbox” e de rotinas de programação computacional do pacote MATLAB®.

Quadro 11: Soma dos valores atribuídos e respectivos intervalos proporcionais ao IQA da CETESB

Soma INQA	
5	100
6	95
7	90
8	85
9	80
10	75
11	70
12	65
13	60
14	55
15	50
16	45
17	40
18	35
19	30
20	25
21	20
22	15
23	10
24	5
25	0

A metodologia foi aplicada utilizando os dados analíticos do monitoramento de quatro bacias hidrográficas distintas, conforme já exposto. Os resultados do processamento computacional são apresentados e discutidos na Capítulo 4 e comparados estatisticamente com os resultados dos outros índices propostos neste estudo.

RESULTADOS

Também nesta unidade de gerenciamento de recursos hídricos foram considerados os resultados publicados para os parâmetros referentes aos pontos de coleta apresentados no Quadro 12, da rede de monitoramento da CETESB no trecho paulista do rio Paraíba do Sul entre os anos de 2004 e 2006 (CETESB, 2004, 2005, 2006).

Os resultados do IQA_{CETESB} foram transcritos dos relatórios. O IQA_{sub} , IQA_{obj} , IQA_{min} e o IQA_{pal} foram calculados pelas suas respectivas fórmulas e metodologias. O INQA foi obtido através da metodologia proposta.

As Figuras 07, 08 e 09 apresentam gráficos com a média aritmética dos índices por ano. Os gráficos revelam que o IQA_{pal} predomina como o indicador de pior qualidade da água. O IQA_{obj} e o IQA_{min} se revezam em diversas posições como sendo os índices que representam uma água de melhor qualidade. O IQA_{CETESB} , IQA_{sub} e o INQA apresentam uma maior similaridade entre os resultados.



Quadro 12: Descrição dos pontos de coleta da UGRHI 2

Ponto de Coleta	Código CETESB	Latitude	Longitude	Local da Coleta	Cidade
PC 01	PARB 02050	23 22 32	45 53 12	Captação de Santa Branca, no bairro Angola de Cima.	Santa Branca
PC 02	PARB 02100	23 22 05	45 53 59	Ponte na rodovia SP-77, no trecho que liga Jacareí a Santa Branca.	Santa Branca
PC 03	PARB 02200	23 18 48	45 58 20	Junto à captação do município de Jacareí	Jacareí
PC 04	PARB 02300	23 11 42	45 55 48	Ponte de acesso ao loteamento Urbanova, em São José dos Campos.	São José dos Campos
PC 05	PARB 02310	23 11 16	45 55 04	Na captação de São José dos Campos.	São José dos Campos
PC 06	PARB 02400	23 04 54	45 42 40	Ponte na rua do Porto, no trecho que liga Caçapava ao bairro Menino Jesus.	Caçapava
PC 07	PARB 02490	22 57 40	45 33 10	Na captação da SABESP em Taubaté que abastece Tremembé	Tremembé
PC 08	PARB 02530	22 54 42	45 28 13	Na captação da SABESP de Pindamonhangaba	Pindamonhangaba
PC 09	PARB 02600	22 50 40	45 14 04	Na captação de Aparecida	Aparecida
PC 10	PARB 02700	22 42 12	45 07 10	Ponte na rodovia BR-459, no trecho que liga Lorena a Piquete.	Lorena
PC 11	PARB 02900	22 32 32	44 46 26	Ponte na cidade de Queluz.	Queluz

A Figura 07 apresenta uma queda significativa de qualidade entre o PC 02 e PC 04. Este fato provavelmente está relacionado ao aporte de esgotos oriundos das cidades no trecho em questão. Em seguida o rio tende a se depurar a te o PC 07, onde novamente recebe despejos com consequente repetida queda da qualidade até o PC 09. Entre o PC 09 e o PC 11 o rio Paraíba do Sul apresenta uma significativa recuperação em sua qualidade, levando em consideração uma análise sob a ótica de uma média aritmética anual de cada índice. Todos os índices mantiveram uma tendência semelhante de variação ao longo do trecho analisado, excluindo-se o IQA_{pal} que apresentou pontos distante da curva de tendência para os PCs 01, 04, 05 e 06. Algum parâmetro em especial na formulação deste índice deve ter influenciado este resultado discrepante.

Uma conclusão semelhante pode ser extraída ao se observar a Figura 08, sendo que nesta o IQA_{pal} acrescentou mais pontos divergentes da tendência geral dos índices. Visualmente também é perceptível um achatamento da curva com menos variações ao longo do trecho analisado.

Uma análise visual da Figura 09, que apresenta os resultados dos mesmos pontos para o ano de 2006, mostra que nesse ano a qualidade do rio, representada pelos diversos índices, teve a menor variação absoluta. Inúmeros motivos poderiam ser propostos como sendo responsáveis por esta diminuição na variação absoluta de qualidade ao longo dos pontos e anos estudados. Este estudo não objetiva uma análise aprofundada, entretanto investimentos em ações estruturais de tratamento de esgotos nos municípios contribuintes à bacia, com recursos próprios ou com recursos oriundos da cobrança pelo uso da água, devem estar relacionados às melhorias observadas (AGEVAP, 2007). Esta observação é corroborada pelo fato de que o IQA_{pal} , que tem como parâmetros a amônia e oxigênio dissolvido, relacionados a esgotos sanitários em corpos hídricos, se aproxima mais da tendência geral dos restantes índices.

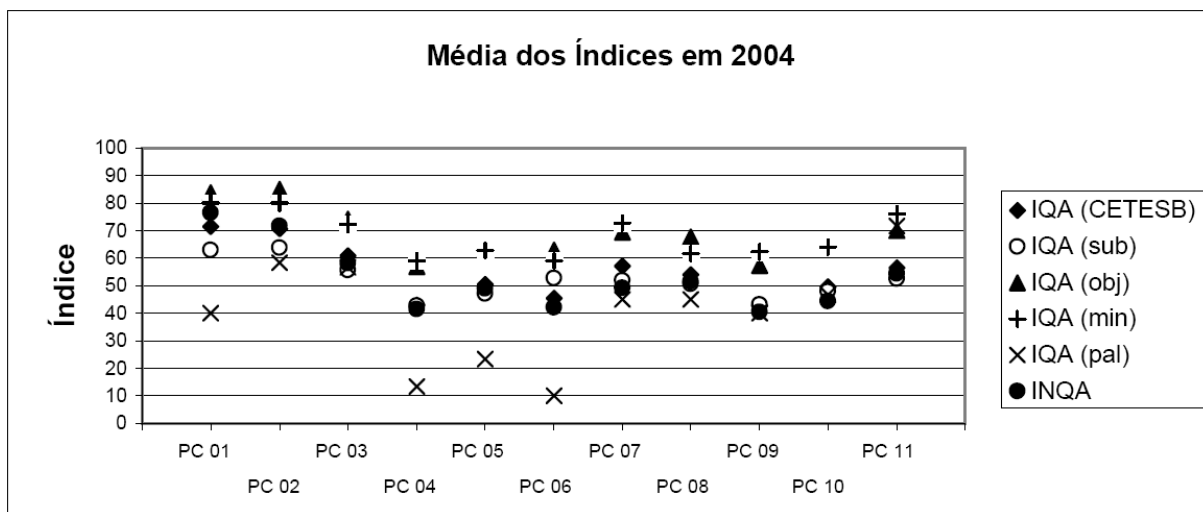


Figura -07 – Comparativo dos índices pela suas médias anuais, ano 2004

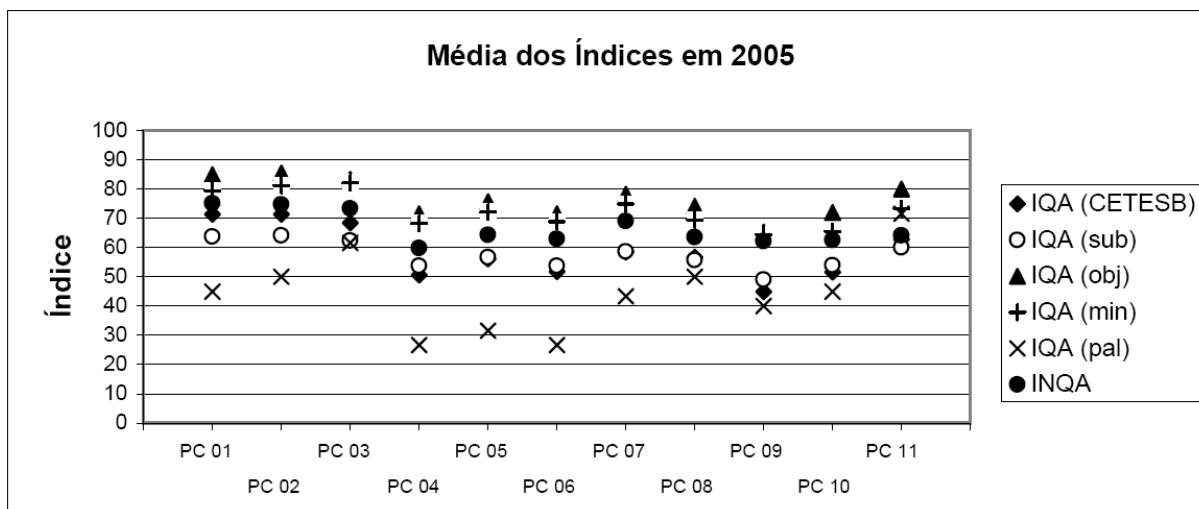


Figura 08 – Comparativo dos índices pela suas média anuais, ano 2005

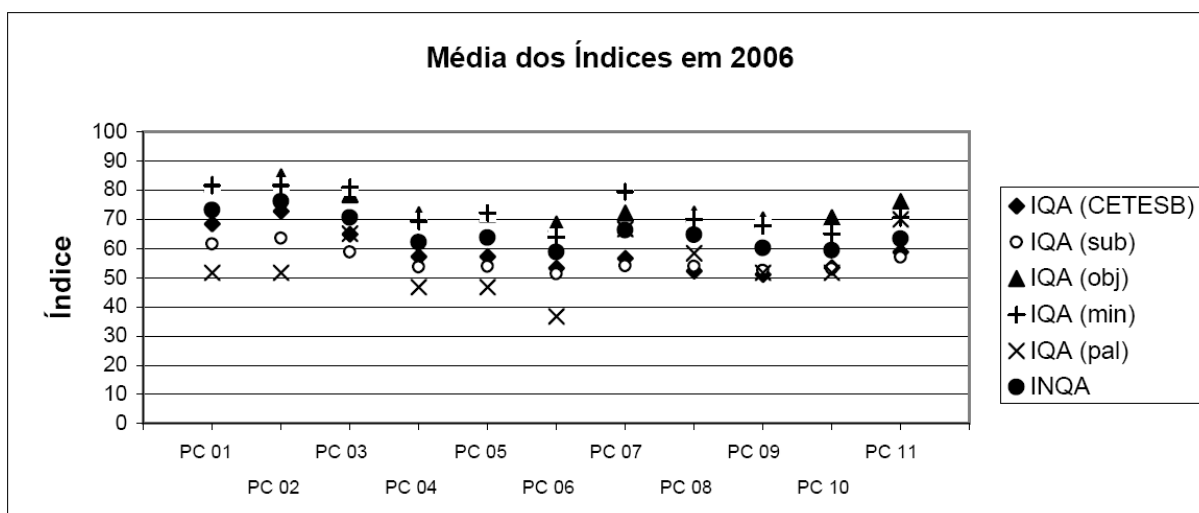


Figura 09 – Comparativo dos índices pela suas média anuais, ano 2006

Quadro 13: Estatística básica dos resultados

UGRHI	Índice	N	Média	Média	Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Variância	Desvio Padrão
			Aritmética	Geométrica	Harmônica						
Paraíba do Sul Industrializada	IQA (CETESB)	184	57.1	55.9	54.8	56.0	54.0	35	87	138.2	11.758
	IQA (sub)	190	54.9	54.4	53.8	55.7	Múltiplas	36	76	60.0	7.747
	IQA (obj)	190	73.0	72.3	71.5	74.3	Múltiplas	48	93	103.8	10.188
	IQA (min)	190	71.3	70.2	69.0	73.3	76.7	40	93	145.5	12.063
	IQA (pal)	190	46.8	-	-	50.0	50.0	0	80	419.8	20.489
	INQA	190	61.4	59.8	58.0	64.5	Múltiplas	29	87	169.4	13.016

Quadro 14: Variação do desvio entre as diversas médias dos índices

UGRHI	Índice	Desvio da MA	Desvio da MG	Desvio da MH	Desvio da MA	Desvio da MG	Desvio da MH
		em relação ao IQA (CETESB)	em relação ao IQA (CETESB)	em relação ao IQA (CETESB)	em relação ao INQA	em relação ao INQA	em relação ao INQA
		%	%	%	%	%	%
Paraíba do Sul Industrializada	IQA (CETESB)				7.0	6.5	5.5
	IQA (sub)	3.8	2.8	1.8	10.5	9.1	7.2
	IQA (obj)	-27.8	-29.2	-30.6	-19.0	-20.9	-23.4
	IQA (min)	-24.9	-25.6	-26.0	-16.2	-17.4	-19.1
	IQA (pal)	18.1			23.8		
	INQA	-7.5	-6.9	-5.8			

onde:

MA - Média aritmética

MG - Média geométrica

MH - Média harmônica



O desvio % de variação da média de um índice em relação ao outro foi calculado através da Equação 09.

$$\% \text{ desvio} = (I1 - I2) / I1 \times 100$$

(09)

Onde: I1 – Primeiro índice e I2 – Segundo índice

As Figuras 10 e 11 apresentam gráficos de “Box & Whiskers” para os índices ao longo dos 3 anos estudados. Estes gráficos permitem visualizar a tendência central e a variabilidade dos dados e são úteis para a comparação em um mesmo gráfico dos principais resultados da amostra de dados. No gráfico da Figura 10, o quadrado menor representa o valor da média e o retângulo maior os limites superior e inferior da média \pm o desvio padrão. A linha delimita os valores da média \pm 1,96 vezes o desvio padrão na fronteira inferior e superior, respectivamente, encontrados para os índices. No gráfico da Figura 11, o quadrado menor representa o valor da mediana enquanto o retângulo maior representa os limites do quartil inferior e o quartil superior. A linha delimita os valores mínimos e máximos na fronteira inferior e superior, respectivamente, encontrados para os índices.

Finalmente, são apresentados, nas Figuras 12, 13, 14, 15 e 16, os gráficos de correlação entre cada índice e o índice nebuloso de qualidade das águas para cada uma das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

O Quadro 15 apresenta os respectivos dados estatísticos de correlação, r , r^2 , e r^2 ajustado, correspondente às Figuras 12 à 16.

Quadro 15: Variação do desvio entre as diversas médias dos índices

	Paraíba do Sul UGRHI industrial		
	r	r^2	r^2 ajustado
INQA x IQA _{CETESB}	0,7943	0,6310	0,6289
INQA x IQA _{sub}	0,8127	0,6625	0,6587
INQA x IQA _{obj}	0,8742	0,6625	0,6587
INQA x IQA _{min}	0,7483	0,5600	0,5577
INQA x IQA _{pal}	0,5191	0,2695	0,2656

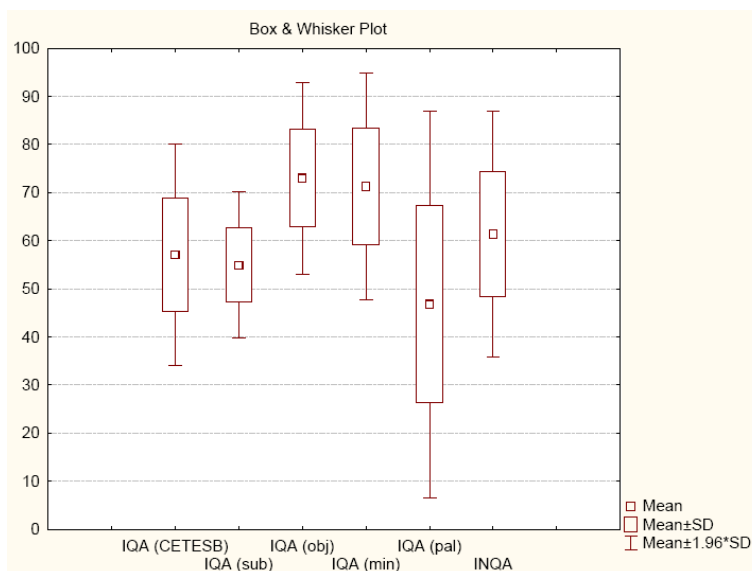


Figura 10: Gráficos de “Box & Whiskers” da média, mediana \pm desvio padrão e mediana \pm 1,96 vezes o desvio padrão.

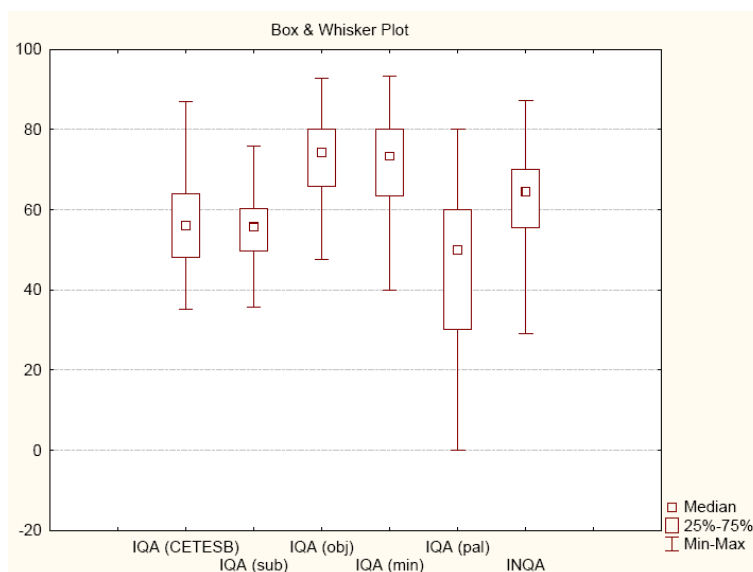


Figura 11: Gráficos de “Box & Whiskers” da mediana, quartil superior e inferior e valor mínimo e máximo.

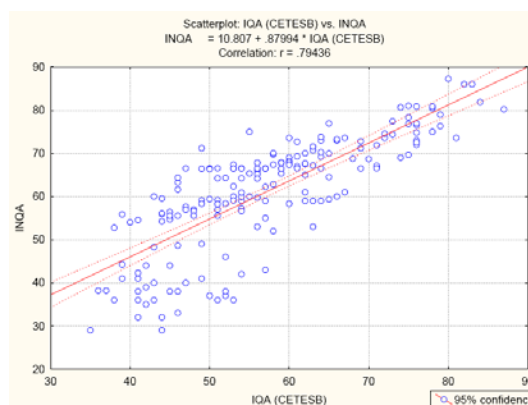


Figura 12: Gráficos de correlação do INQA com o IQA_{CETESB}

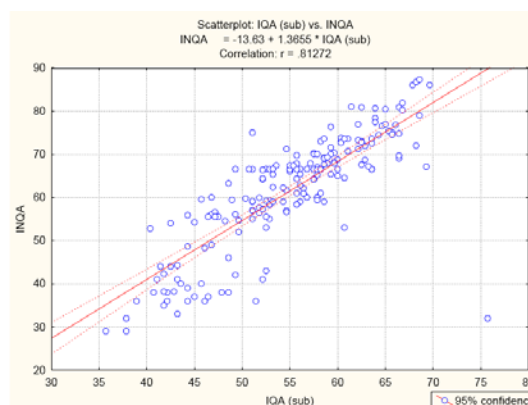


Figura 13: Gráficos de correlação do INQA com o IQA_{sub}

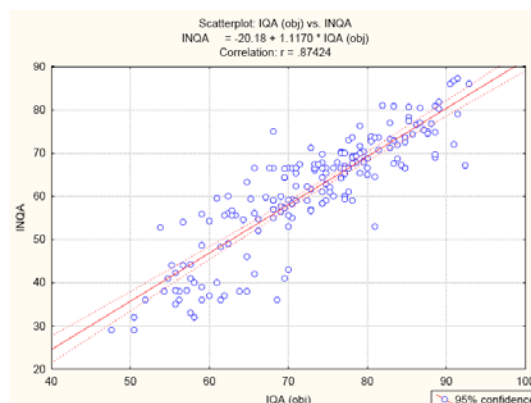


Figura 14: Gráficos de correlação do INQA com o IQA_{obj}

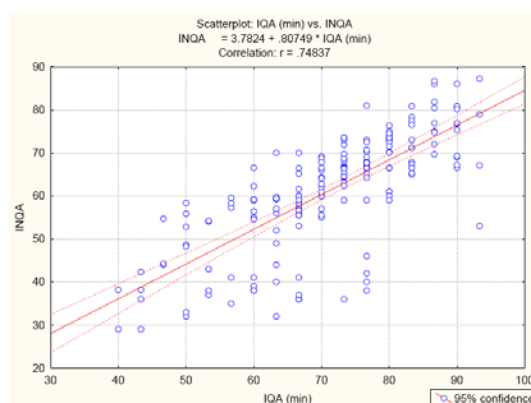


Figura 15: Gráficos de correlação do INQA com o IQA_{min}

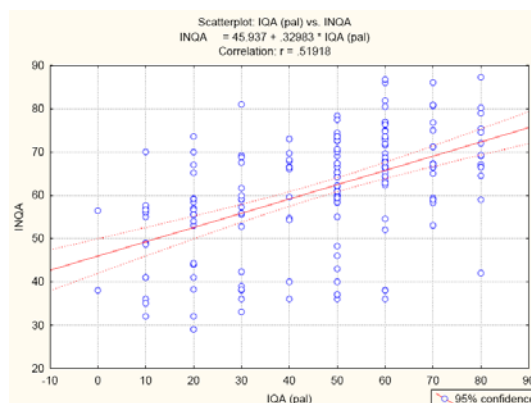


Figura 16: Gráficos de correlação do INQA com o IQA_{pal}

Outras conclusões podem ser extraídas dos índices apresentados, fugindo entretanto ao contexto deste estudo.

CONCLUSÕES

A aplicação de diversos índices e o desenvolvimento, aplicação e discussão uma nova metodologia de indexação de qualidade de rios através da técnica do sistema de inferência nebulosa foi estudada. Um novo índice, denominado de Índice Nebuloso de Qualidade das Águas – INQA foi criado para suprir as lacunas existentes no que tange o monitoramento ambiental, a classificação da qualidade da água e a gestão das unidades de gerenciamento hídricas, quando metodologias convencionais determinísticas tradicionais podem se mostrar imprecisas ou conceitualmente limitadas. As aplicações práticas deste novo índice foram testadas com um estudo de caso realístico no rio Ribeira do Iguape no estado de São Paulo, Brasil. O índice desenvolvido se mostrou confiável e compatível com as outras metodologias tradicionais. Entendemos assim que esta metodologia pode ser utilizada como uma ferramenta alternativa no tratamento de dados de qualidade



de águas de bacia hidrográficas, no planejamento de estratégias e tomadas de decisões no âmbito da gestão ambiental integrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BORDALO A. A. *et al.* (2001). "Water quality and uses of the Bangpakong river". Water Research 35, 15, p. 3635-3642
2. BÁRDOSSY, A., DUCKSTEIN, (1995). "Fuzzy rule-based modeling with applications to geophysical, biological and engineering systems". CRC Press, Boca Raton, New York, London, Tokyo.
3. CHAU, K. (2006). "A review on integration of artificial intelligence into water quality modeling". Marine Pollution Bulletin 52, p.726-733.
4. CALDEIRA, A. M. *et al.* (2007). "Inteligência Computacional aplicada a administração, economia e engenharia em Matlab". São Paulo, Thomson Learning.
5. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) (2004, 2005 e 2006). "Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo". São Paulo.
6. CONESA F. V. (1997). In: "Methodological Guide for Environmental Impact Evaluation", 3rd ed., p.412. Mundi-Prensa, Madrid, Spain.
7. CRUZ, A. J. DE O. (2004). "Lógica Nebulosa". Notas de aula, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
8. CUDE, C.O. (2001). "Water quality index: a tool for evaluating water quality management effectiveness", J. Am. Water Resour. Assoc. 37, p.125-137.
9. DAHIYA S. (2007). "Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation". Journal of Hazardous Materials 147 938-946
10. HORTON, R. K. (1965). "An index number system for rating water quality". Journal of Water Pollution Control Federation 37 (3), p.300-305.
11. HOUSE, M. A.; ELLIS, J. B. (1987). "The development of water quality indexes for operational management". Water Sci. Technol. 19, 145.
12. Içaga, Y. (2007). "Fuzzy evaluation of water classification". Ecological Indicators 7, p.710-718.
13. LANDWEHR, J. M.; DEININGER, R. A. (1976). "Comparison of several water quality indexes". Journal Water Pollut. Con. F. 48, p.954-958.
14. LIOU, S.; LO S.; WANG, S. (2004). "A generalized water quality index for Taiwan". Environmental Monitoring Assessment 96, p. 35-52.
15. Matlab® 7.0 (2006). "Packaged software for technical computing", Release 14, The Math works, Inc.
16. MITCHELL, M.K., STAPP, W.B., 1996. Field Manual for Water Quality Monitoring: an Environmental Education Program for Schools, Thomson-Shore Inc., Dexter, Michigan, p. 277.
17. [NSF] National Sanitation Foundation International. (2007). Available in: <http://www.nsf.org> [Accessed on October of 2007].
18. OCAMPO-DUQUE W. (2006). "Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study". Environment International 32, p. 733-742.
19. ONGLEY, E. (1998). "Modernization of water quality programs in developing countries: issues of relevancy and cost efficiency". Water Quality International Sep/Oct, p. 37-42.
20. PESCE, S. F., WUNDERLIN, D. A. (2000). "Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba city (Argentina) on Suquia river". Water Research 34, p.2915-2926.
21. Ross, T. J. (2004). "Fuzzy logic with engineering applications". New York: John Wiley & Sons.
22. SAID, A, *et al.* (2004). "An innovative index for evaluating water quality in streams". Environ Manage, 34:406-14.
23. SDD (1976). "Development of a Water Quality Index". Scottish Development Department, Report ARD3, Edinburgh, p.35.
24. SILVA, G. S.; JARDIM, W. DE F. (2006). "Um novo índice de qualidade de águas para proteção de vida aquática aplicado ao rio Atibaia, região de Campinas/Paulínea – SP". Química Nova 29, No. 4, p. 689-694.
25. SILVERT, W. (1997). "Ecological impact classification with fuzzy sets". Ecological Modeling 96, p.1-10.
26. SILVERT, W. (2000). "Fuzzy indices of environmental conditions". Ecological Modeling 130, p.111-119.
27. STAMBUK-GILJANOVIC N. (1999). "Water quality evaluation by index in Dalmatia". Water Research 16, pp. 3423-3440.



28. YAGER, R. R., FILVEL, D.P. (1994). *“Essentials of Fuzzy Modeling and Control”*. New York: John Wiley & Sons.
29. YEN, J., LANGARI, R. (1999). *“Fuzzy logic: intelligence, control, and information”*. Prentice-Hall, Inc.
30. ZADEH, L.A. (1965). *“Fuzzy Sets”*. Information and Control 8, p. 338-353.